Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 56 (1965)

Heft: 1

Artikel: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore

Autor: Berger, K. / Vogelsanger, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916326

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: 09.07.2025

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

Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore

Von *K. Berger* und *E. Vogelsanger*, Zürich

551.594.22.001.5

Im Anschluss an frühere Berichte wird über Gewitterbeobachtungen und die oszillographischen Blitzstrommessungen auf dem Monte San Salvatore in den Jahren 1955...1963 berichtet. Die in dieser Zeit durchgeführte Weiterentwicklung der Messeinrichtung wird beschrieben. Beobachtungen über Gewitterhäufigkeit sind zusammengestellt. Die während Gewittern durch Glimmentladungen an den Turmspitzen der Meßstation bedingten Ströme sind besprochen und die dadurch von der Atmosphäre zur Erde transportierte Ladung ermittelt. Der zeitliche Verlauf der Blitzströme wird an Hand von zahlreichen Oszillogrammbeispielen besprochen. Die Unterschiede zwischen positiven und negativen Blitzströmen werden hervorgehoben und die Blitze eingeteilt in solche, die an die auf Bergspitzen stehende Türme gebunden sind (mit von der Turmspitze aufwärts wachsender Vorentladung) und solche, die auch in ebenem Gelände auftreten können (mit von der Wolke abwärts wachsender Vorentladung). Die Häufigkeit der verschiedenen Entladungsformen wurde ausgezählt und tabellarisch zusammengestellt. Verschiedene den Blitzstrom charakterisierende Grössen, wie Stromscheitelwert, Frontsteilheit, transportierte Ladung, Zahl der Teilblitze u. a. sind in Häufigkeitskurven dargestellt. Abschliessend wird die Bedeutung dieser Grössen für den Blitzschutz diskutiert.

Faisant suite aux rapports antérieurs, les auteurs décrivent les observations d'orages et les enregistrements oscillographiques des courants de foudre au Monte San Salvatore, durant les années 1955 à 1963. Ils indiquent d'abord les perfectionnements apportés à l'équipement de mesure. La fréquence des orages est indiquée alors. Les courants d'effluves aux pointes des deux tours de mesure sont étudiés et la charge transportée de ce fait entre l'atmosphère et la terre est calculée. L'allure des courants de foudre est examinée à l'aide de nombreux relevés oscillographiques, ceci pour les courants positifs et négatifs. Les coups de foudre sont classés en ceux causés par les tours situées aux sommets de la montagne (avec décharge préliminaire se développant de la pointe de la tour vers les nuages) et ceux qui peuvent également atteindre la plaine (avec décharge préliminaire se développant du nuage vers le sol). La fréquence des diverses formes de décharges a été comptée et groupée dans des tableaux. Les grandeurs caractéristiques du courant de foudre, telles que valeur de crête, raideur du front, charge transportée, nombre de décharges partiels, etc., sont représentées en courbes de leur fréquence. Pour terminer, les auteurs traitent de l'importance de ces grandeurs pour la protection contre la foudre.

Seit 1943 unterhält die Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) auf dem Monte San Salvatore bei Lugano eine Blitzmess-Station. Bei Einschlägen in zwei Auffangtürme werden die Blitzströme oszillographisch aufgezeichnet, und zur Nachtzeit werden alle Blitze der Umgebung photographisch aufgenommen, z. T. auf bewegtem Film, so dass die einzelnen Phasen des Blitzvorganges auseinandergehalten werden können. Im Bulletin des SEV 1955 wurde über den damaligen Stand der Meßstation und über die bis und mit Sommer 1954 erzielten Messresultate ausführlich berichtet [1; 2][1]). In der Zwischenzeit wurden die Messungen weitergeführt und die Messeinrichtungen ausgebaut [3; 4]. Im vorliegenden Aufsatz soll zusammenfassend über den weiteren Ausbau des elektrischen Teiles und die seit 1955 damit gewonnenen Messresultate berichtet werden.

1. Messeinrichtung

Fig. 1 zeigt den Situationsplan der Einrichtungen auf dem Berggipfel, mit dem oberen Turm, dem Oszillographenraum und der die Photoeinrichtung beherbergenden Kirche.

1.1 Blitzauffang-Türme

Von den 1955 beschriebenen Türmen ist derjenige auf dem Vorgipfel San Carlo (Turm 2) auch heute im Betrieb. Der ältere Holzturm auf dem Hauptgipfel (Turm 1) musste im Frühling 1958 einem PTT-Sende-Turm für Fernsehen und UKW-Rundfunk Platz machen.

Blitzantenne und Mess-Shunt wurden auf dem PTT-Turm montiert, und durch ein 125 m langes Kabel mit 9 konzentrischen Einzelmesskabeln mit dem Oszillographenraum verbunden. Die Erdseite des Shunts ist mit der Turmstruktur verbunden, welche ihrerseits am bestehenden Erdnetz geerdet ist. Fig. 2 zeigt den neuen Turm auf dem Gipfel. Der Turm ist bis zur obersten Plattform, auf der der Mess-Shunt aufgebaut ist, 60 m hoch und wird durch die Blitzantenne noch um 10 m überragt.

1.2 Mess-Shunt

Die Mess-Shunts in beiden Türmen sind gleich aufgebaut wie schon 1955 beschrieben, d. h. mit zwei Stufen, die eine für die Messung der hohen Stoßströme, und die andere für die Erfassung der relativ kleinen Ströme langer Dauer. Das heute für jeden Turm gültige Prinzipschema der ganzen Mess-Einrichtung bestehend aus Shunt, Kabel und Oszillographen ist in Fig. 3 dargestellt. Im Laufe der Berichtsjahre wurden einige Änderungen im Widerstandswert und im Aufbau vorgenommen. Der Widerstand des Strom-Shuntes wurde ab 1955 von 0,02 Ω auf 0,05 Ω erhöht. Damit wurde die vom Kabel übertragene Meßspannung vergrössert und der relative Fehler durch den Spannungsabfall des durch den Kabelmantel fliessenden Blitzstromanteils verkleinert. Der modifizierte Shunt ist aus drei konzentrischen Konstantan-Röhren gemäss Fig. 4 aufgebaut. Diese Anordnung ist einem einfachen Zylinder gleichwertig. Das magnetische Feld des Shunt-Stromes erfüllt nur den schraffierten äusseren Raum. Die durch Messader und Shunt gebildete Schleife ist feldfrei, so dass im Messkreis keine Fehlerspannung induziert wird.

Der seriegeschaltete Shunt zur Messung der kleineren Ströme wird infolge seines höheren Widerstandes durch die hohen Ströme thermisch und dynamisch stark beansprucht. Dieser Shunt-Teil wurde mehrmals vom Blitzstrom beschädigt, was jeweils die Verstärkung des Shuntes bedingte. Zunächst wurde er mit dickerem Konstantanband ausgeführt und sein Widerstand von 1,0 Ω auf 0,8 Ω reduziert. Ein solcher Widerstand wurde aber 1959 bei einem positiven Blitzeinschlag in den PTT-Turm durch elektrodynamische Kräfte stark beschädigt. Es wurde daher eine robustere Neukonstruktion gewählt mit gewelltem Chromnickelband, das in rechteckige Hartpapierkanäle eingepresst wird (Fig. 5). 6 bzw. 8 solcher Widerstandstäbe wurden parallel geschaltet und zylindrisch um den bisherigen Träger aus Eternit angeordnet. Beim PTT-Turm wurde der Umbau 1960 vorgenommen und mit sechs parallelen Stäben ein Widerstand von 0,8 Ω eingehalten. Auf dem Turm 2 wurden im Frühling 1961 acht parallele Stäbe montiert mit einem Widerstand von 0,56 Ω und einem Gesamtgewicht des Chrom-Nickelbandes von 62 kg. Die weitere Reduktion des Widerstandswertes drängte sich auf, nachdem bei einem positiven Blitz mit 180 kA der Spannungsabfall am Shunt zu einem Überschlag zwischen Antenne und Turmkonstruktion geführt hatte.

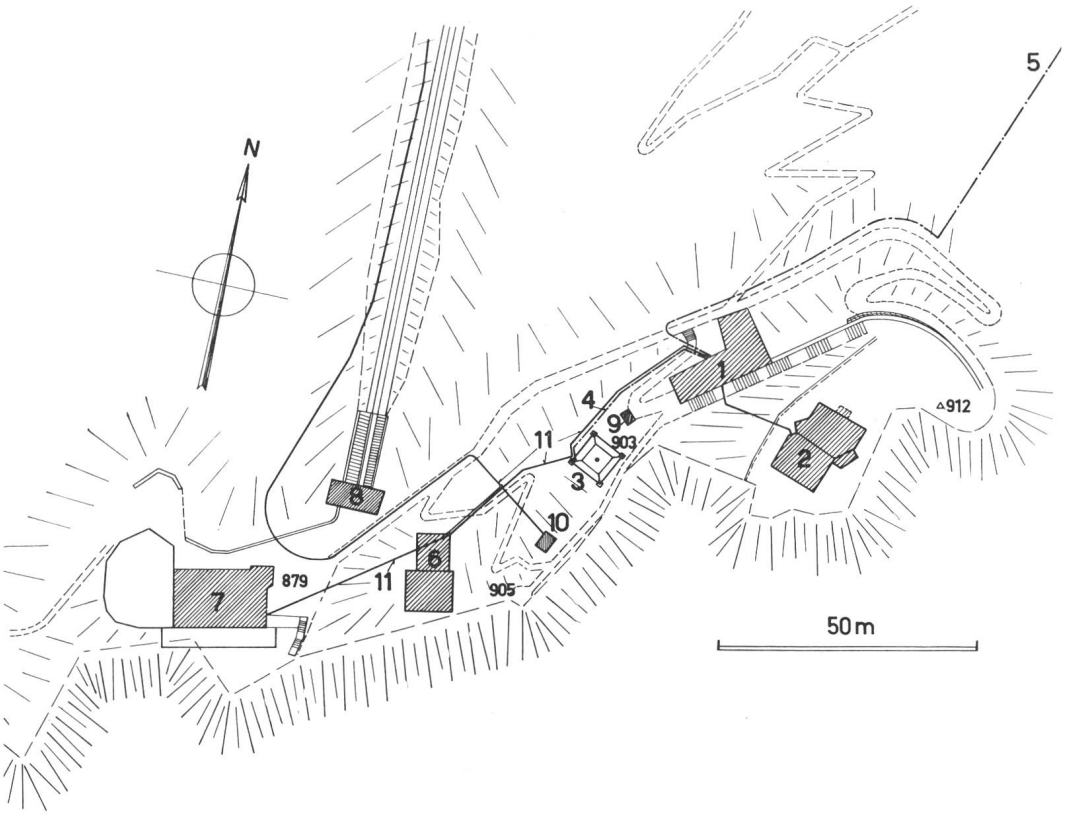
1.3 Oszillographen

Der 1955 beschriebene Schleifen-Oszillograph (SO) wurde ab 1956 mit zwei weiteren Schleifen versehen, um die positiven

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

335/15-560

Fig. 1
Situationsplan der Gebäude und Einrichtungen auf dem Gipfel des Monte San Salvatore
1 Gebäude mit Messraum;
2 Kirche mit Photoraum;
3 Turm *1* (Sendeturm der PTT);
4 Messkabel vom Turm *1*;
5 Messkabel vom Turm *2*;
6 Sendegebäude der PTT;
7 Hotel San Salvatore Vetta;
8 Bergstation der Drahtseilbahn;
9, 10 Wasser-Reservoir;
11 Wasserleitungen



und negativen Maxima der Stoßströme an beiden Türmen getrennt messen zu können. Mit den insgesamt 8 Meßschleifen werden, getrennt für Turm 1 und 2, die folgenden Messgrössen während einer Sekunde aufgezeichnet:

Stromverlauf im Bereich bis 5000 A
Stromverlauf im Bereich bis 300 A
Positives Strommaximum
Negatives Strommaximum

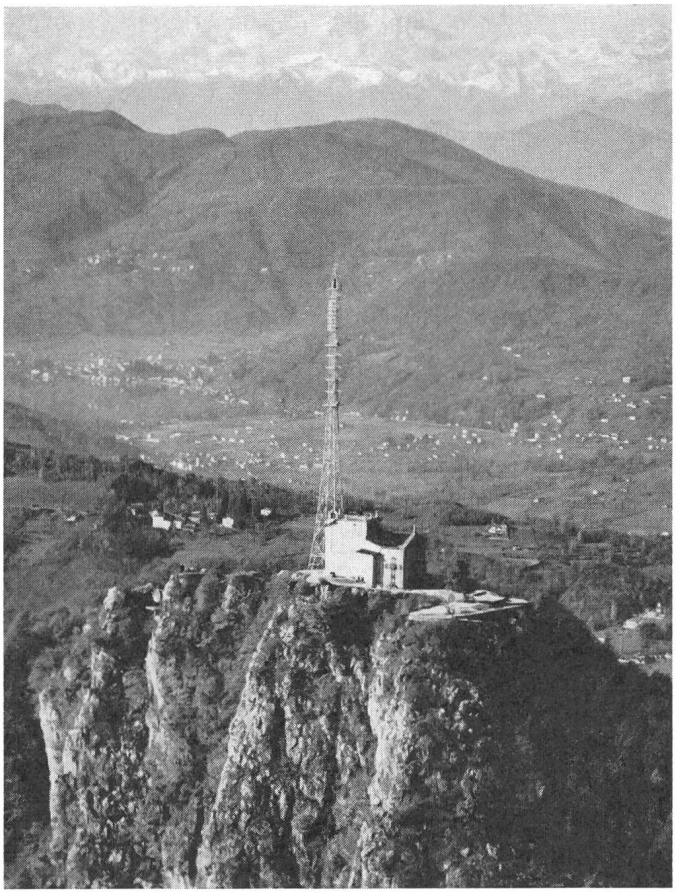


Fig. 2
Luftaufnahme des Monte-San-Salvatore-Gipfels mit Sendeturm der PTT und Kirche
Auf der Spitze des Turmes ist die Blitzauffang-Antenne sichtbar, unmittelbar darunter der Messhunt. Der Photoraum befindet sich im Aufbau der Kirche unter der Aussichtsterrasse

Zur Messung der rasch veränderlichen Stoßströme wurde ab 1958 ein neuer Kathodenstrahl-Oszillograph (KO) verwendet, der nach unseren Wünschen speziell für die Anforderungen der Blitzstrommessung hergestellt und durch die finanzielle Unterstützung des Schweiz. Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung angeschafft werden konnte (Fig. 6). Er enthält 2 Messröhren mit je 2 Strahlen, mit denen die Ströme beider Türme in 2 verschiedenen Maßstäben aufgezeichnet werden. Die Bildschirme der Röhren werden während einer Sekunde auf ein Photopapier abgebildet, das sich auf der Mantelfläche einer langsam rotierenden Trommel befindet. Diese dreht sich einmal in der Sekunde und bewirkt damit eine erste «mechanische Zeitablenkung». Damit können langsam veränderliche Blitzströme aufgezeichnet, bzw. aufeinander folgende Stromstösse mit einer dem zeitlichen Abstand entsprechenden Verschiebung abgebildet werden. Während der Umlaufzeit der Trommel von einer Sekunde findet eine der geringen Schreibgeschwindigkeit angepasste Aufhellung der Strahlen statt, deren Auslösung mit derjenigen des SO erfolgt. Um auch die raschveränderlichen Stoßströme innerhalb des Blitzes aufzeichnen zu können, ist eine zusätzliche, viel raschere Zeitablenkung nötig. Sie wird in bekannter Weise durch eine elektrische Ablenkung der Kathodenstrahlen bewirkt. Diese der mechanischen Zeitablenkung überlagerte «elektrische Zeitablenkung» kann für jeden Strahl wahlweise auf Vor- und Rücklaufzeiten von 30 und 100 µs oder 200 und 1000 µs eingestellt werden. Der Kathodenstrahl ist beim Vor- und Rücklauf der hohen Schreibgeschwindigkeit entsprechend aufgehellt. Die elektrische Zeitablenkung wird bei jedem Stromanstieg ausgelöst, dessen Steilheit einen eingestellten Wert (ca. 1 kA/µs) übersteigt. Im allgemeinen führt jeder im Blitzstrom auftretende Stoss zu einer elektrischen Zeitablenkung. Fig. 19...22 zeigen Beispiele solcher Oszillogramme. Auf Grund der ersten Erfahrungen wurden ab 1960 für die beiden jedem Turm zugeordneten Strahlen Strombereiche und Ablenkzeiten wie folgt gewählt:

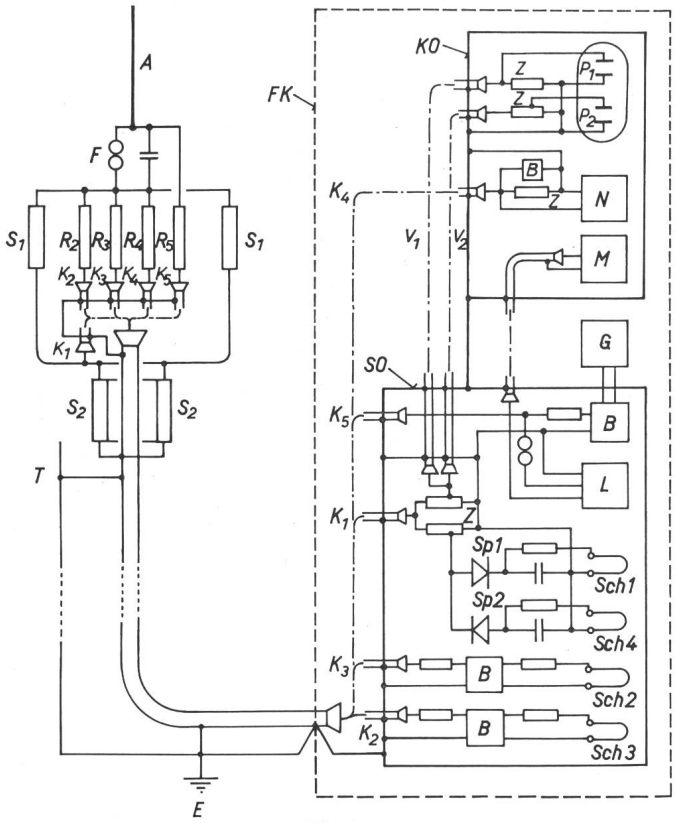


Fig. 3
Prinzipschema der Messeinrichtung für einen Auffangturm
A Blitzantenne; *B* Spannungsbegrenzer; *E* Erdungsnetz mit Verbindung an das Bahngeleise, Speisekabel und PTT-Kabel; *F* Funkenstrecke. Diese trennt im Ruhezustand die Antenne vom Shunt ab, so dass allfällige Glimmströme über das Registrierinstrument *G* fliessen müssen. Die Funkenstrecke spricht an, wenn durch einen Strom von mindestens 20 A der parallel geschaltete Kondensator von 0,5 µF auf die Ansprechspannung von ca. 10 kV aufgeladen wird. Dadurch werden auch die Oszillographen ausgelöst; *FK* Faraday-Käfig; *G* Registrierinstrument zur Messung kleiner Antennenströme (Glimmströme und Verschiebungsströme bei entfernten Blitzschlägen); K_1...K_3 Messkabel; K_4, K_5 Auslösekabel; *KO* Kathodenstrahloszillograph; *L* Auslöseelement für SO-Lampe; *M* Auslöseelektronik für 1s-Aufhellung des *KO*; *N* Auslöseelektronik für Zeitablenkung und kurzzeitige Vollaufhellung des *KO*; P_1, P_2 Messplatten für Bereich 65 kA und 200 kA; R_1...R_5 Vorschaltwiderstände; S_1 Mess-Shunt 0,8 Ω (Turm 1), bzw. 0,56 Ω (Turm 2); S_2 Messhunt 0,05 Ω; Sch_1, Sch_4 Mess-Schleifen für positive und negative Maximalwerte der Stoßströme; Sch_2, Sch_3 Mess-Schleifen für Strombereich 5000 A und 300 A; Sp_1, Sp_2 Speicherschaltung zur Messung der positiven und negativen Maximalwerte; *T* Turmstruktur; V_1, V_2 Verzögerungskabel; *Z* Abschlusswiderstände der Kabel

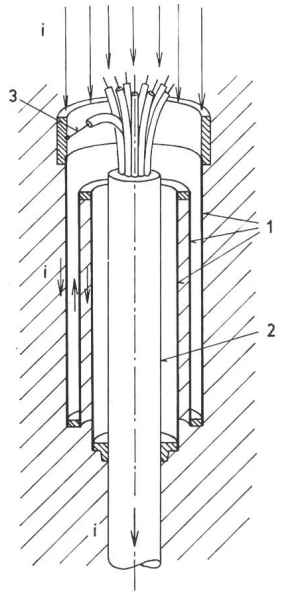
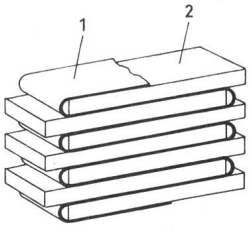


Fig. 4
Prinzipieller Aufbau des 0,05-Ω-Messshuntes zur Messung des Stoßstromes
1 Zylinder aus dünnem Konstantan-Blech; *2* Messkabel; *3* Kabelader zur Messung der Shuntspannung; *i* Shuntstrom
Der Shuntstrom fliesst über den Kabelmantel an die Turmstruktur und die Erdung. Das magnetische Feld des Shuntstromes erfüllt nur den schraffierten Raum. Die aus Shunt und Messader gebildete Schleife umfasst einen feldfreien Raum

Fig. 5
Prinzipieller Aufbau der Widerstandsstäbe, aus denen der Shunt zur Messung kleiner Blitzströme aufgebaut ist
1 Chromnickelband; *2* Isolierplatten



bis 65 kA: 30/100 µs
bis 200 kA: 200/1000 µs

Da die Auslösung der elektrischen Zeitablenkung mit einer Verzögerung von ca. 1 µs erfolgt, konnten in den ersten beiden Betriebsjahren mit dem neuen KO (1958 und 1959) die sehr steilen Fronten der Folge-Stösse in Mehrfach-Blitzen nicht abgebildet werden. Es wurden daher im Frühling 1960 Verzögerungskabel eingebaut. Die gewählten Delax-Kabel mit einer Grenzfrequenz von 15 MHz ergaben bei 7 m Länge eine Verzögerung von 1,8 µs.

1.4 Tintenschreiber für die dauernde Registrierung der Turmströme

Da sich gezeigt hatte, dass die Glimmströme an den Türmen höchstens einige mA erreichen, wurden diese Instrumente auf grössere Empfindlichkeit umgebaut. Der Messbereich wurde damit von 50 auf 10 mA reduziert.

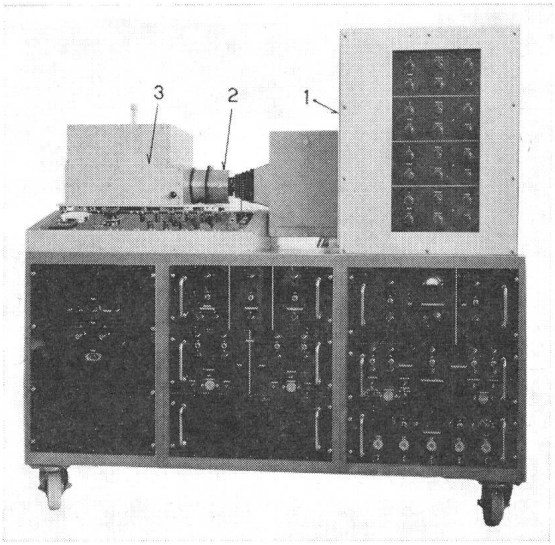


Fig. 6
Ansicht des Kathodenstrahloszillographen *(KO)*
Die beiden 2-Strahl-Meßröhren befinden sich im Kasten *1*. Ihr Schirm wird durch die Optik *2* auf die im Kasten *3* rotierende Filmtrommel abgebildet

1.5 Energieversorgung

Ab 1958 konnte die Energieversorgung der Meßstation über ein geschirmtes Kabel an diejenige des neuen Fernsehsenders angeschlossen werden. Die beim früheren Freileitungsanschluss zwischengeschaltete grosse Drosselspule fiel damit weg. Die seit 1943 bestehende Umformergruppe zur Speisung der elektrischen Apparate aus der Batterie wurde mit dem Anschluss des neuen KO überlastet. Daher wurde eine neue Gruppe mit einer Leistung von 4 kW installiert, die eine von der Netzspannung unabhängige Speisung aller Einrichtungen gewährleistet. Eine solche Speisung ist nicht nur wegen allfälliger Unterbrüche der Netzspannung notwendig, sondern auch wegen der bei Gewittern häufigen kurzzeitigen Netzspannungs-Schwankungen, die bei Netzspeisung jeweils zu einer Auslösung des KO führen würden. Um die Batterie nicht zu schnell zu entladen, wird sie gleichzeitig aus dem Netz

nachgeladen. Der Ladestrom wird jedoch etwas kleiner eingestellt als der Entladestrom, damit bei einem plötzlichen Ausfall des Netzes die Spannungsänderung an der Batterie möglichst gering bleibt.

2. Messfehler und Messgenauigkeit bei den oszillographischen Messungen

Bei den Strommessungen müssen Werte im Bereich von 20...200 000 A, d. h. in einem Bereich von vier Zehnerpotenzen mit vier Messkanälen (2 im SO und 2 im KO) erfasst werden. Dabei gibt es natürlich Strombereiche, die ungünstig liegen; die Ablesung kann in diesen Fällen mit Fehlern bis zu 20% behaftet sein. Die Scheitelwerte der grösseren Stoßströme sind aber auf 1...2% genau ablesbar.

Ein systematischer Fehler in der Strommessung wird durch die Ströme im Mantel des Messkabels verursacht. Dies besonders im Turm 2, der an seinem Standort nur eine schlechte Erdung aufweist, so dass ein wesentlicher Anteil des Blitzstromes über den Mantel des Messkabels in die Erdung von Turm 1 und zur Meßstation hin fliesst. Der Ohmsche Spannungsabfall im Kabelmantel (an der Innenhaut gemessen) überlagert sich der Meßspannung, so dass der Strom etwas zu hoch gemessen wird. Die Messkabel wurden deswegen mit einem besonders kräftigen Mantel aus Kupferdrähten versehen. Beim Kabel zum Turm 2 beträgt der Ohmsche Widerstand des Mantels 0,02 Ω. Leider lässt sich nicht feststellen, welcher Anteil des Blitzstromes über den Kabelmantel fliesst. Um zu einer groben Abschätzung des Fehlers zu kommen, sei im Mittel über die ganze Kabellänge der halbe Blitzstrom angenommen. Bei der Messung kleiner Ströme mit dem vollen Shunt, der heute auf Turm 2 0,612 Ω beträgt, ergibt sich damit ein unbedeutender Fehler von $\frac{1}{2} \cdot 0{,}02/0{,}63 = 1\frac{1}{2}\%$.

Bei der Messung grosser Blitzströme nur mit dem Stoßstrom-Shunt von 0,05 Ω würde hingegen die gleiche Rechnung einen Fehler von $\frac{1}{2} \cdot 0{,}02/0{,}05 + 0{,}02 = 14\%$ ergeben. Dies gilt aber nur für langsam veränderliche Ströme,

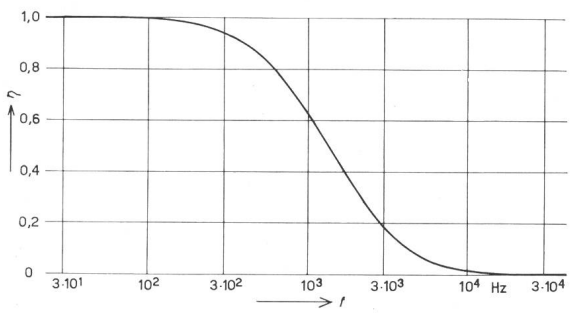


Fig. 7

Frequenzgang der Stromdichte an der Innenhaut des Kabelmantels, wenn dieser Wechselstrom führt

$$\eta = \left| \frac{j_i}{j_m} \right|$$

j_i Stromdichte an der Innenhaut des Kabelmantels; $j_m = \frac{i}{F}$ mittlere Stromdichte; i Mantelstrom; F Mantelquerschnitt; f Frequenz des Mantelstromes

Die Kurve ist für einen 5 mm dicken kompakten Kupfermantel berechnet, nach der Formel:

$$\left| \frac{j_i}{j_m} \right| = \frac{2kd}{\sqrt{\cosh 2kd - \cos 2kd}} \; ; \; k = \sqrt{\frac{\pi \mu f}{\rho}}$$

d Manteldicke; μ absolute Permeabilität des Mantelmaterials; ρ spezifischer Widerstand des Mantelmaterials

Die Formel gilt unter der Voraussetzung, dass der Manteldurchmesser gross ist gegenüber der Manteldicke d

während die grossen Blitzströme (vielleicht mit Ausnahme einiger weniger positiver Blitze) immer rasch veränderliche Stoßströme sind. Infolge der Stromverdrängung ist dann die massgebende Stromdichte j_i an der Innenfläche des Mantels kleiner als bei gleichmässiger Stromverteilung mit der Stromdichte j_m. Der für die gleichmässige Stromverteilung ermittelte Fehler muss dann noch mit dem Faktor $\eta = j_i/j_m$ multipliziert werden. Für sinusförmige Ströme und einen kompakten Mantel, dessen Dicke im Verhältnis zum Kabeldurchmesser klein ist, lässt sich dieser Faktor berechnen. Für das Messkabel von Turm 2 ergibt sich der in Fig. 7 gezeigte Frequenzgang, wenn der aus 2 Lagen mit zusammen 64 runden Kupferdrähten von 3,3 mm Durchmesser bestehende Mantel durch einen kompakten Kupfermantel von 5 mm Dicke angenähert wird. Dabei ist die Wirkung der inneren Mäntel um die einzelnen Messadern noch nicht berücksichtigt, sie würde den Fehler noch etwas weiter reduzieren.

Negative Stösse im Blitzstrom haben Halbwertdauern in der Grössenordnung von 100 µs und dürften sich etwa wie Wechselströme von einigen kHz verhalten: Das Verhältnis $\eta = j_i/j_m$ wird dabei 0,1...0,2 und der durch den Mantelstrom verursachte Fehler sinkt auf wenige Prozent. Weniger günstig liegen die Verhältnisse bei Stromstössen mit Halbwertdauern in der Grössenordnung einer ms, wie sie in Entladungen aus positiven Wolken vorkommen.

Hier ist die Stromverteilung über den Mantelquerschnitt noch angenähert gleichförmig, so dass sich der geschätzte Fehler von etwa 14% nur noch unwesentlich verringert. Der wirkliche Strom müsste also um diesen Fehler unter dem Messwert liegen. Die Schätzung, die auf einer reinen Annahme über den auf dem Kabelmantel fliessenden Blitzstromanteil beruht, ist aber zu unsicher, als dass auf Grund derselben eine Korrektur der Messwerte vorgenommen werden könnte.

Was die Messgenauigkeit der Zeitgrössen anbetrifft, so sind Zeiten von einigen ms an aufwärts ziemlich genau zu messen (Fehler kleiner als 5%). Wenn einwandfreie Kathodenstrahl-Oszillogramme vorliegen, gilt dies auch für Zeiten von etwa 5...500 µs. Dazwischen liegt ein ungünstiger Bereich, wo weder die elektrische Zeitablenkung des KO noch die mechanische Ablenkung durch die Trommelrotation eine genaue Ablesung ermöglicht. In diesem Bereich ist mit Ungenauigkeiten der Zeitauswertung bis zu 20% zu rechnen. Halbwertzeiten oder Zeitkonstanten von Stössen sind z. T. ungenau messbar, weil die Stromkurve den massgebenden Stromwert sehr flach schneidet. Auch bei diesen Zeitangaben können daher die Ungenauigkeiten bis zu 20% ausmachen.

Am schwierigsten ist die Messung sehr kurzer Frontzeiten. Es hat sich gezeigt, dass speziell bei Folgestössen innerhalb von Mehrfachblitzen häufig Frontzeiten von etwa 1 µs oder weniger auftreten. Die Auswertung derselben wird, abgesehen von der geringen Zeitauflösung, noch durch Störeffekte

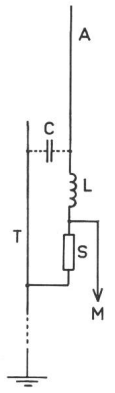


Fig. 8

Prinzipschema für den aus Blitzantenne, Shunt und Turmstruktur gebildeten Schwingkreis

A Blitzantenne; C Kapazität zwischen Blitzantenne und Turmstruktur; L Induktivität des Kreises Shunt-Turmstruktur; S Shunt zur Messung der Stoßströme; M Messader zur Messung der Stoßströme; T Turmstruktur

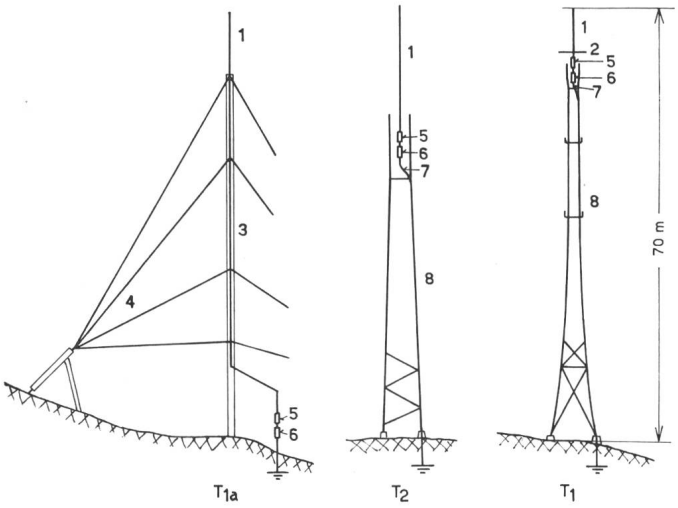


Fig. 9

Anordnung von Blitzantenne und Messhunt bei den drei Türmen

T_{1a} alter Holzturm auf dem Berggipfel (bis und mit 1957) mit Abspannseilen nach 4 Richtungen; T_1 neuer Turm *1* (PTT-Turm) auf dem Berggipfel (Grundriss quadratisch); T_2 Turm *2* auf dem Vorgipfel «San Carlo» (Grundriss dreieckig); *1* Blitzantenne; *2* radiale Blitzauffangstäbe (4 Stück); *3* mit der Blitzantenne verbundene Turmstruktur; *4* mit der Blitzantenne verbundene Abspannseile; *5* Messhunt zur Messung kleiner Ströme; *6* Messhunt zur Messung der Stossströme; *7* Mess- und Auslösekabel; *8* geerdete Turmstruktur

erschwert, die von den steil ansteigenden Blitzströmen ausgehen. Bei Blitzschlägen mit steilen Stoßströmen im PTT-Turm, der nur ca. 20 m vom Messraum entfernt ist, dringen vermutlich Störfelder in die Abschirmung der Messapparatur ein. Weitere Störungen entstehen durch die Auslöseleitungen, die mit der Messleitung durch den Innenraum des unteren Shunts geführt sind. Bei steilen Stössen treten in den Auslöseleitungen Ströme auf, welche in der Messleitung eine rasche und stark gedämpfte Schwingung induzieren, die sich der Meßspannung überlagert. Dies sind die Gründe, warum Frontzeiten unter einer µs bisher nicht einwandfrei gemessen werden können.

Es muss noch erwähnt werden, dass durch die räumliche Ausdehnung von Antenne und Shunt der Messung sehr kurzer Fronten eine prinzipielle Grenze gesetzt ist. Dem Stromweg über den Shunt, der mit Induktivität behaftet ist, liegt die Streukapazität zwischen Antenne und Turmstruktur parallel. In erster Näherung können die Verhältnisse durch das Schema in Fig. 8 dargestellt werden. Stossfronten, die kürzer sind als die Eigenzeit $\sqrt{LC}$ des Kreises, werden daher nicht mehr richtig abgebildet. Sie regen vielmehr die Eigenschwingung des Kreises an. Die so bedingten Grenzfrequenzen liegen allerdings ziemlich hoch, nämlich bei ca. 10 MHz beim PTT-Turm, wo der Shunt auf der Turmspitze montiert ist, und bei ca. 5 MHz bei Turm 2, wo der Shunt unterhalb der Spitze eingebaut ist (Fig. 9).

Prinzipiell können somit Frontzeiten von einigen Zehntel-Mikrosekunden noch erfasst werden. Wesentlich ungünstiger lagen in dieser Beziehung die Verhältnisse beim alten Holzturm bis und mit 1957. Mit dem am Boden aufgestellten Shunt und den die Antennenkapazität vergrössernden Abspannseilen hatte er eine Eigenfrequenz von nur 0,35 MHz. In den Kathodenstrahl-Oszillogrammen von steilen Folgestössen innerhalb von Mehrfach-Blitzen wurde damit stets der Einschwing-Vorgang der Blitzantenne an Stelle der wirklichen Front des Blitzstromes aufgezeichnet. Fig. 9, die die drei Türme mit Blitzantenne und Shunt schematisch, aber im gleichen Maßstab darstellt, zeigt die erwähnten Unterschiede deutlich.

Auch der Stoßstrom-Shunt selber hat eine untere Zeitgrenze. Die Eigenzeit (response-time) eines rohrförmigen Shuntes ist durch die Stromverdrängung bedingt, welche bei kurzen Stromimpulsen den Strom in die Aussenfläche drängt, bzw. die gleichmässige Stromverteilung über die Wandstärke verzögert. Nach Publ. 60 des CEI [5] ist die Eigenzeit T in µs

$$T = 0{,}2\,\frac{d^2}{\varrho}$$

mit d Wandstärke des Rohres [m] und ϱ spezifischer Widerstand des Rohrmaterials [Ωm].

Für die verwendeten Konstantanröhren von 0,2 mm Wandstärke wird $T = 0{,}016$ µs. Diese Eigenzeit ist viel kleiner als die Schwingungsdauer des bereits betrachteten Einschwingvorganges und somit bedeutungslos. Da der Shunt gemäss Fig. 4 aus drei ineinandergeschobenen Röhren besteht, ist er auch mit Kapazität behaftet. Die aus dieser Kapazität und dem Shuntwiderstand resultierende Zeitkonstante ist aber noch um Grössenordnungen kleiner als die aus der Stromverdrängung ermittelte Eigenzeit.

3. Beobachtungen über Gewitterhäufigkeit

Die Häufigkeit der Gewittertage und deren Verteilung über Jahre und Monate ist für die Berichtsperiode in den Tabellen I und II dargestellt. Als Gewittertag gilt gemäss internationaler Definition jeder Tag, in dessen Verlauf mindestens einmal ein Donner gehört wurde. Diese Definition ist der Auswertung der Tabelle I zu Grunde gelegt. Es wird angenommen, dass damit Gewitterherde in einem Umkreis mit ca. 20 km Radius erfasst werden. Die durchschnittliche Zahl der Gewittertage pro Jahr wird in der meteorologischen Literatur als «Isoceraunic-Level» bezeichnet.

Zahl der Gewittertage pro Monat und Jahr

Kriterium für Gewittertag:
Mindestens einmal Donner hörbar (Isoceraunic-Level)

Tabelle I

Jahr	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Total	Beobachtungsperiode
1955	—	0	6	10	17	10	6	2	51	5.4....18.10.
1956	—	4	3	8	13	15	4	2	49	16.4.... 6.10.
1957	0	2	5	20	9	11	4	1	52	21.3....14.11.
1958	0	2	3	4	9	9	3	2	34	17.3.... 8.10.
1959	—	0	10	14	12	11	1	—	48	20.4....23.9.
1960	—	1	7	13	9	11	5	0	46	26.4....22.12.
1961	0	8	10	13	11	5	0	—	47	19.3....13.9.
1962	—	3	5	8	17	10	5	0	48	2.4.... 3.10.
1963	1	12	14	16	17	13	8	2	83	18.3....21.10.
Durchschnitt:										
1955...63	0,1	3,5	7	12	12,7	10,5	4	1	50,8	
1947...54	—	4	9,6	11,8	10,1	10,4	4,5	0,5	51	
1947...63	0,06	3,8	8,2	11,9	11,5	10,5	4,2	0,8	51	

Tabelle II zeigt in der gleichen Darstellung die Anzahl der Gewittertage, wenn als Kriterium für das Vorhandensein eines Gewitters das Auftreten deutlicher Verschiebungsströme in den Blitzantennen zu Grunde gelegt wird. Auf Grund der Beobachtung entfernter Gewittertätigkeit darf angenommen werden, dass auf diese Weise Gewitter in einem Umkreis von 10...15 km Radius erfasst werden. Die Verschiebungsströme äussern sich als einem allfälligen Glimmstrom überlagerte Spitzen im Diagramm der Tintenschreiber, welche die Turm-

ströme dauernd überwachen. Da die Dauer dieser Stromimpulse viel kürzer ist als die Schwingungsdauer des mechanischen Meßsystems, sind die betreffenden Ausschläge der durch die Stromimpulse geführten Ladung proportional. Für einen deutlichen Ausschlag ist eine Ladung von ca. $\frac{1}{2} \cdot 10^{-4}$ C erforderlich.

Zahl der Gewittertage pro Monat und Jahr
Kriterium für Gewittertag:
Stromimpulse in den Blitzantennen

Tabelle II

Jahr	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	Total	Beobachtungsperiode
1955	—	0	4	6	12	7	8	0	37	5.4....18.10.
1956	—	4	3	6	9	14	4	0	38	16.4.... 6.10.
1957	0	2	5	18	9	8	4	0	46	21.3....14.11.
1958	0	0	1	5	9	6	2	0	23	17.3.... 8.10.
1959	—	0	3	11	12	9	0	—	35	20.4....23.9.
1960	—	0	11	14	6	9	6	0	46	26.4....22.12.
1961	0	6	7	12	11	2	0	—	34	19.3....13.9.
1962	—	2	7	5	5	8	4	0	31	2.4.... 3.10.
1963	0	3	10	14	13	10	11	0	61	18.3....21.10
Durchschnitt:										
1955...63	0	1,9	5,7	10,1	9,6	8,1	4,3	0	39	
1947...54	0	2,7	7,1	10,1	7,9	8,9	4,0	0,2	41	
1947...63	0	2,3	6,4	10,1	8,7	8,5	4,2	0,1	40	

In der früheren Beobachtungsperiode 1947...1954 wurden die Verschiebungsstrom-Impulse im alten Holzturm zu Grunde gelegt. Diese waren 4...5 mal grösser, weil dieser Turm mit seinen Abspannseilen gegenüber fernen Gewitterwolken eine entsprechend grössere Kapazität aufwies als die jetzigen Antennen (vgl. Fig. 9). Da aber gleichzeitig auch die Registrier-Instrumente damals eine 5mal kleinere Empfindlichkeit aufwiesen, war die Grenze der wahrnehmbaren Gewitter praktisch die gleiche wie jetzt. Die früheren Resultate können also mit den jetzigen unmittelbar verglichen werden. Den Mittelwerten über die Berichtsperiode sind in Tabelle I und II diejenigen der vorhergehenden Beobachtungs-Periode 1947...1954 gegenübergestellt. Ferner ist auch der Gesamtdurchschnitt von 1947...1963 eingetragen. In den Monaten März/April und September/Oktober war die Meßstation nur teilweise bedient. Die Dauer der Beobachtungsperiode ist daher in der Tabelle angegeben.

Beim Vergleich der Tabellen I und II fällt auf, dass Tabelle II für einzelne Monate mehr Gewittertage nachweist, obwohl sie nur die Gewitter in einem kleineren Umkreis erfasst, als Tabelle I. Dies muss damit zusammenhängen, dass die Hörbarkeit des Donners ein sehr unsicheres Kriterium darstellt. Während der meisten Zeit ist in unserer Meßstation nur *ein* Beobachter anwesend, und wenn dieser mit Arbeiten in abgeschlossenem Raum, z. B. in der Dunkelkammer beschäftigt ist, kann ihm ein schwacher Donner leicht entgehen.

Schliesslich zeigt Fig. 10 den Tagesgang der Gewittertätigkeit für die Berichtsperiode und die vorhergehende Beobachtungsperiode. Zu jeder Tageszeit ist die mittlere Anzahl der Tage pro Jahr eingetragen, an denen zur betreffenden Zeit ein Gewitter registriert wurde. Dabei wurde, wie in Tabelle II, auf das Auftreten von Verschiebungs-Stromimpulsen in den Blitzantennen abgestellt.

Während die Gewittertätigkeit von Jahr zu Jahr starken Schwankungen unterworfen ist, stimmen die über die acht- bzw. neunjährigen Beobachtungsperioden genommenen Mittelwerte beachtlich gut überein. Sie decken sich auch weit-

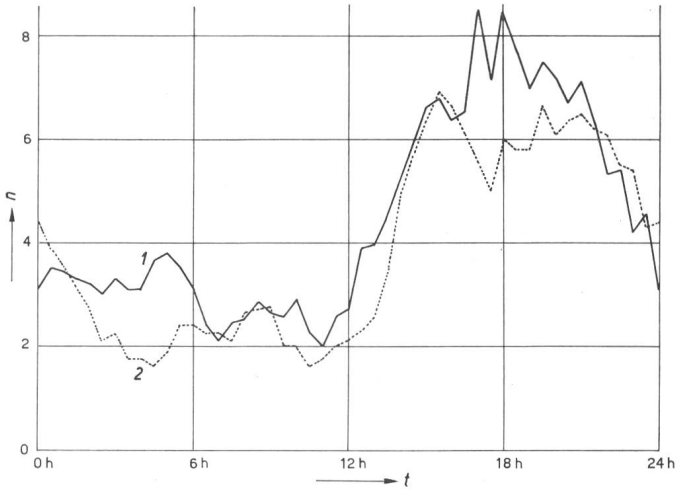


Fig. 10
Tagesgang der Gewittertätigkeit
n mittlere Anzahl der Tage pro Jahr, an denen zur Zeit *t* ein Gewitter registriert wurde
Als Kriterium für das Vorhandensein eines Gewitters werden durch Verschiebungsströme bedingte Ausschläge in den Diagrammen der Turmströme zu Grunde gelegt
Kurve *1*: für die Berichtsperiode 1955...1963
Kurve *2*: für die Beobachtungsperiode 1947...1954

gehend mit den vom Meteorologischen Observatorium in Locarno-Monti beobachteten Mittelwerten [6]. Dies gilt sowohl für die Gesamtzahl der Gewittertage, als auch für deren Verteilung über die Monate und für die Verteilung der Gewitter über die Tageszeiten.

4. Glimmströme an den Blitzantennen

Die kräftigen atmosphärischen Felder während Gewittern führen zu Glimmentladungen an den Blitzantennen, die mit messbaren Strömen verbunden sind. Die Ströme in beiden Antennen wurden durch die schon erwähnten zwei Tintenschreiber mit der Papiergeschwindigkeit von 10 cm/h dauernd registriert. Während Gewittern treten an den jetzigen Antennen im allgemeinen Glimmströme bis 2 mA, in wenigen Fällen bis 3,5 mA auf.

Die Fig. 11 und 12 zeigen zwei Beispiele von Antennenstromdiagrammen während Gewittern. Blitzeinschläge oder Wolkenentladungen in der Umgebung der Türme verursachen jeweils neben der sprunghaften Änderung des stationären Glimmstromes eine Stromspitze, die hauptsächlich durch den Verschiebungsstrom bedingt ist, denn durch die rasche Feldänderung werden die Blitzantennen entladen oder umgeladen. Es kann aber auch eine Spitze des Glimmstromes darin enthalten sein, wenn z. B. durch einen von der Wolke gegen Erde wachsenden Ladungskanal die Feldstärke an der Turmspitze kurzzeitig stark erhöht wird. Die Tintenschreiber messen natürlich nur den Gesamtstrom. Sie können auch die kurzdauernden und hohen Stromspitzen nicht im richtigen Maßstab wiedergeben, einerseits wegen der Trägheit der Instrumente, anderseits weil durch einen Überlastungsschutz der Strom in den Instrumenten begrenzt wurde. Nur bei schwachen Impulsen entfernter Blitze, bei denen der Überlastungsschutz nicht in Funktion tritt, kann — wie im vorhergehenden Abschnitt ausgeführt wurde — mit einer Proportionalität zwischen Ausschlag und Ladung gerechnet werden.

In der Dunkelheit wurden verschiedentlich gleichzeitig mit einem Wolkenblitz auftretende Elmsfeuer an den Turmspitzen

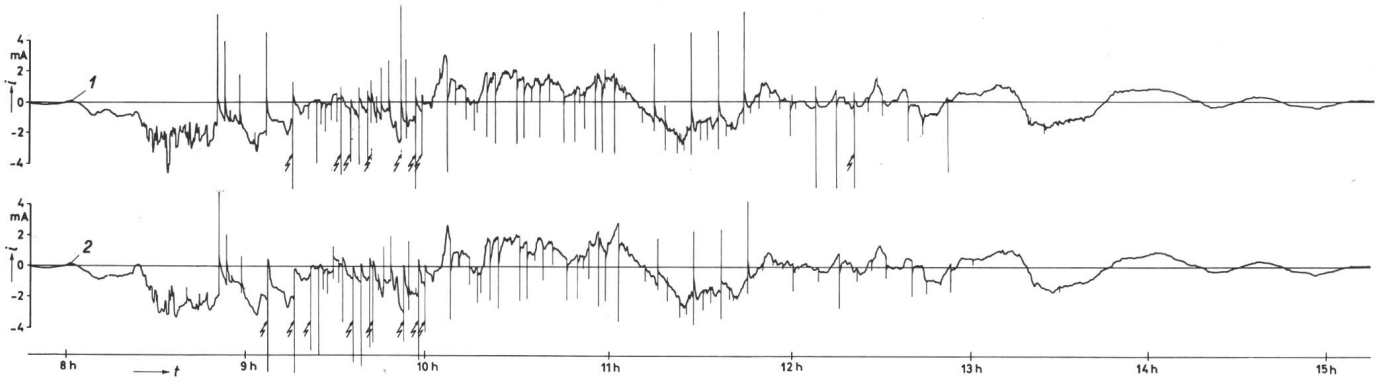


Fig. 11
Ausschnitt aus den Diagrammen der Registrierinstrumente mit einem 5 h dauernden Gewitter vom 3. Mai 1963
Kurve *1*: Strom im Turm *1*; Kurve *2*: Strom im Turm *2*
Bei den mit ⇘ bezeichneten Spitzen erfolgten Einschlägen in den Turm.
Es waren bei diesem Gewitter lauter Aufwärtsblitze (s. Abschnitt 5.2) mit langen kontinuierlichen Strömen

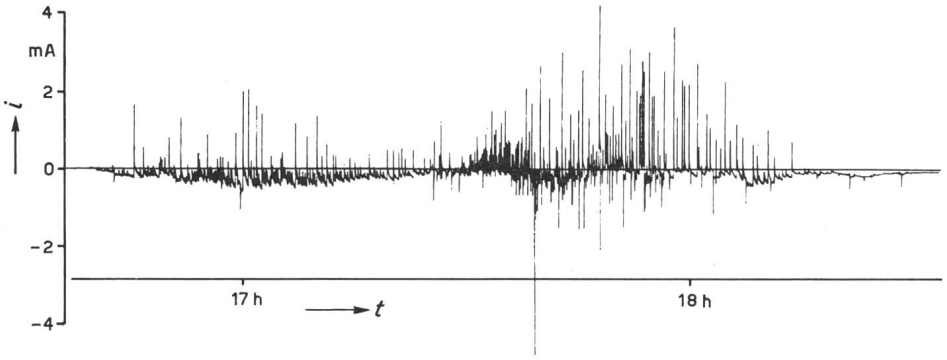


Fig. 12
Ausschnitt aus dem Diagramm des Registrierinstrumentes vom Turm *1* mit einem heftigen Gewitter von hoher Blitzdichte vom 7. August 1963
Zwischen 17.35 und 17.45 Uhr erfolgten 7 Einschäge in die Türme; es waren lauter Abwärtsblitze (siehe Abschnitt 5.2) mit z. T. heftigen Stössen

beobachtet, die von einem peitschenhiebartigen Knall begleitet waren. Dies zeigt, dass in solchen Momenten Entladungen an den Antennen auftreten, deren Ströme vermutlich wesentlich höher sind als die registrierten stationären Glimmströme. Oft wurden dabei auch die Oszillographen ausgelöst, die Oszillogramme zeigten jedoch keine sichtbaren Ausschläge.

Für die beiden gewitterreichen Jahre 1960 und 1963 wurde die gesamte durch den Glimmstrom transportierte Ladung aus den Registrierstreifen ausgewertet. Die Resultate sind in Tabelle III zusammengestellt. Die in den kurzzeitigen Entladungs-Impulsen enthaltene zusätzliche Ladung lässt sich allerdings nicht erfassen. Zum Vergleich sind auch die Ladungen eingetragen, die in den gleichen Zeiträumen durch Blitzeinschläge transportiert wurden. Die Tabelle zeigt, dass die durch Glimmströme aus den Wolken abgeleiteten Ladungen relativ klein sind. Im Durchschnitt betragen sie nur ca. einen Zehntel der im gleichen Zeitraum durch Blitze übertragenen Ladungen. Ein einziger kräftiger Blitz kann mehr Ladung transportieren als der Glimmstrom einer Turmspitze während eines ganzen Sommers. Der zunächst einleuchtende Gedanke *Benjamin Franklins,* durch glimmende Blitzableiterspitzen die für die Entstehung der Blitze verantwortliche Wolkenladung zu schwächen und auf diese Weise Blitzeinschläge zu verhindern, hält somit einer quantitativen Überprüfung nicht stand.

Der Vergleich der Polaritäten in Tabelle III zeigt, dass in beiden Türmen und in beiden Jahren mehr negative als positive Ladung durch Glimmströme von der Atmosphäre zur Erde geflossen ist. Im Durchschnitt macht der Unterschied etwa 60% aus. Turm 1 zeigt für beide Polaritäten und in beiden Jahren etwas grössere Ladungen als Turm 2. Der Unterschied ist allerdings gering, im Durchschnitt etwa 15%. Er kann sowohl durch die stärker exponierte Lage von Turm 1 auf dem Berggipfel als durch die verschiedene Ausbildung der beiden Blitzantennen — insbesondere die vier horizontalen Stäbe bei Turm 1 (vergleiche Fig. 9) — verursacht sein. Beim alten, bis 1957 bestehenden Holzturm mit seinen vielen Abspannseilen waren die stationären Glimmströme im Durchschnitt etwa 40...50% höher als beim Turm 2.

Durch Glimmströme und Blitzströme von den Blitzantennen abgeleitete Wolkenladungen in den Jahren 1960 und 1963

Tabelle III

	Jahr	Turm	Q^+ C	Q^- C	T h
Glimmströme	1960	1	34	43	150
		2	28	38	150
	1963	1	52	100	240
		2	50	82	240
Blitzströme	1960	1	255	430	
		2	735	350	
	1963	1	730	1305	
		2	360	675	

Q^+ Von den Wolken zur Erde abgeleitete positive Ladung
Q^- Von den Wolken zur Erde abgeleitete negative Ladung
T Gesamtdauer der Perioden mit messbaren Glimmströmen

Es ist noch zu erwähnen, dass die grössten Glimmströme fast immer bei Regen auftreten. Dabei wird natürlich ein Summenstrom gemessen, der sich aus dem Glimmstrom und dem durch die Ladung der auftreffenden Regentropfen vermittelten Konvektionsstrom zusammensetzt. Nach Messungen der Meteorologen sind aber die Regenströme höchstens in der Grössenordnung von einigen 10^{-8} A/m² [7]. Sie können daher bei unseren Turmspitzen kaum einen messbaren Anteil ergeben. Man kann daher annehmen, dass die registrierten Beträge auch bei Regenwetter im wesentlichen den Glimmströmen zuzuschreiben sind.

5. Resultate der Blitzstrommessungen

5.1 Allgemeines über den Verlauf des Blitzstromes und Definitionen

Wie schon die früheren Oszillogramme, zeigen auch die seit 1955 gewonnenen eine grosse Vielfalt. Als Kriterien für eine allgemeine Einteilung kommen im wesentlichen die Polarität und der zeitliche Verlauf des Blitzstromes in Frage.

Zur Festlegung der Polarität wird, wie bereits früher, als positive Stromrichtung jene von der Wolke zur Erde gewählt. Ein positiver Blitz bringt also einen Ladungsaustausch zwischen positiven Wolken und negativer Erde, ein negativer Blitz einen solchen zwischen negativen Wolken und positiver Erde. Auch Blitze mit wechselnder Stromrichtung kommen vor, d. h. Blitze, bei denen der Strom von einer Polarität auf die andere übergeht. Meist fangen diese Blitze mit negativem Strom an, und wechseln dann zu positivem Strom, seltener nachher wieder auf negativen Strom zurück. Diese Blitze sind aber selten; sie machen in der Beobachtungsperiode nur 2,5% aller Blitze aus.

Den grössten Anteil bilden die negativen Blitze mit 85,5%, dann folgen die positiven mit 12%. Mengenmässig sind also die negativen Blitze weitaus die wichtigsten; über sie liegt auch am meisten Beobachtungsmaterial vor.

Im zeitlichen Verlauf der Blitzströme lassen sich zwei Komponenten mit gegensätzlichen Formen erkennen, die einzeln oder in bunter Zusammensetzung den Gesamtblitz (Stroke, Flash)[2]) bilden. Sie werden im folgenden als Stoßströme (Current Peaks) und kontinuierliche Ströme (Continuing Currents) bezeichnet. Die beiden Stromformen lassen sich wie folgt umschreiben:

Als *Stoßstrom* sei ein Stromimpuls mit steiler Front und relativ kurzer Dauer bezeichnet. Die Steilheit des Stromanstieges soll mindestens einige 100 A/µs betragen, und die Halbwertdauer höchstens 2000 µs; bei negativen Blitzen bleibt die Halbwertdauer unter 500 µs. Solche Stösse haben im allgemeinen Scheitelwerte von 2...50 kA. Es kommen aber auch höhere Werte vor; bei den negativen Stössen wurde ein Höchstwert von 105 kA, bei den positiven ein solcher von 180 kA gemessen.

Als *kontinuierlicher Strom* sei ein Strom mit flachem, in der Regel unregelmässig schwankendem Verlauf von mindestens einigen ms Dauer definiert. Er kann auf einen Stoss folgen oder mit flachem Stromanstieg einsetzen und bis zu einigen Zehntelsekunden dauern. Es kommen dabei Ströme von der unteren Messgrenze (ca. 10 A) bis zu einigen hundert A vor, in Ausnahmefällen auch Ströme bis wenige tausend A bei negativen Blitzen, oder einige zehntausend A bei positiven Blitzen.

Negative und positive Blitze zeigen in ihrer Zusammensetzung einige generelle Unterschiede.

Negative Blitze sind oft Mehrfachblitze (Multiple Strokes), d. h. sie setzen sich aus mehreren Teilentladungen zusammen, zwischen denen der Strom auf Null, bzw. unter die Messgrenze sinkt (jetzt ca. 10 A, bei der früher angewandten empfindlicheren Schaltung ca. 2 A). Es lassen sich also *Teilblitze* erkennen, die durch *Strompausen* getrennt sind. Aufeinanderfolgende kräftige Stösse sind immer durch Strompausen getrennt, nur relativ schwache Stösse können auch einem kontinuierlichen Strom überlagert sein. Die Stösse sind kurz (Halbwertzeit meist nur 100 µs) und haben steile Fronten. Sie können damit von den kontinuierlichen Strömen und den darin vorkommenden Spitzen eindeutig unterschieden werden. Nach einem Stoss reisst der Strom meistens ab; an den Stoss anschliessende kontinuierliche Ströme sind weniger häufig. Nur der erste Teilblitz beginnt oft mit einem kontinuierlichen Strom, alle folgenden Teilblitze beginnen stets mit einem Stoss.

Positive Blitze bestehen fast immer aus einem *einzigen Teilblitz* (Single Stroke). Unter den Oszillogrammen der Berichtsperiode befinden sich nur zwei Ausnahmen mit zwei positiven Teilblitzen. Die Stösse sind relativ lang (Halbwertzeit meist um 1000 µs) und ihre Fronten sind flach. Die Stösse gehen fast immer in kontinuierliche Ströme über, die oft noch Stromstärken von einigen tausend A aufweisen. Eine scharfe Grenze zwischen Stössen und kontinuierlichen Strömen existiert hier nicht. Der positiven Hauptentladung kann ein kontinuierlicher negativer Strom vorausgehen, der ohne Pause in den positiven Strom übergeht.

5.2 Abwärts- und Aufwärtsblitze

Das Auftreten von Stössen im Blitzstrom setzt das Vorhandensein eines geladenen Blitzkanals voraus, der sich von der Wolke her aufgebaut hat und sich sehr rasch entladen oder umladen kann, wenn er in leitende Verbindung mit der Erde kommt. Aus photographischen Untersuchungen ist bekannt, dass der Blitz im allgemeinen mit einer sehr schwach leuchtenden Vorentladung, einem sog. Leitblitz (Leader) beginnt, die in Ruckstufen relativ langsam (mit einer Geschwindigkeit von 100 bis einigen 100 m/ms) von der Wolke gegen Erde vorwächst (Initial Downward Stepped Leader) [2; 12; 13]. Erst wenn diese Vorentladung den Erdboden erreicht, tritt der stark leuchtende Hauptblitz (Return Stroke) auf, der dann mit wesentlich grösserer Geschwindigkeit (bis ⅓ Lichtgeschwindigkeit) von der Erde gegen die Wolke vorwächst. Durch den Leitblitz wird von der Wolke her ein geladener Kanal aufgebaut. Wenn sich der Kanal der Erde oder in unserem Fall der Turmspitze genügend genähert hat, setzt ein Überschlag ein und der Kanal entlädt sich nach Erde. Dies ergibt den Stromstoss, der an der Erdoberfläche gemessen wird. Damit ist der Kanal durchgehend leitend geworden und weitere Ladung kann über ihn von der Wolke nach Erde fliessen. Das bedeutet, dass ein kontinuierlicher Strom an den Stoss anschliesst. Bei positiven Stössen ist dies praktisch immer der Fall. Bei negativen Stössen reisst in den meisten Fällen die Entladung am Boden ab, nachdem der Kanal entladen ist, d. h. der Stoßstrom klingt innert weniger Millisekunden auf Null ab[3]). Die von der Wolke dem Kanal weiterhin zufliessende Ladung führt dann zu einer Wiederaufladung, und der Kanal kann sich erneut über einen Stoßstrom nach Erde entladen. Der gleiche Vorgang wiederholt sich oft mehrmals in Abständen von etwa 20...200 ms, was Blitze mit mehreren aufeinanderfolgenden Stössen ergibt. Alle solchen Blitze, die durch einen von der Wolke nach Erde vorwachsenden Leitblitz eingeleitet werden, sind nachstehend als *Abwärtsblitze* bezeichnet. Im Oszillogramm sind sie durch einen Stoss am Anfang des Stromes gekennzeichnet.

Ebenfalls von photographischen Untersuchungen ist bekannt, dass an Türmen oder sehr hohen Gebäuden (wie das Empire State Building, New York) Blitze auftreten die, mit

[2]) Für die wichtigsten verwendeten Begriffe sind die üblichen Bezeichnungen der englischen Fachliteratur in Klammern angegeben. Die Ausdrücke «Stroke» und «Flash» sind nicht einheitlich verwendet. Bei den amerikanischen Autoren [8, 9, 10] ist «Stroke» der Gesamtblitz, während *Schonland* [11] die Teilblitze als «Strokes» und den Gesamtblitz als «Flash» definiert.

[3]) Die im Kanal zurückbleibende positive Ladung schwächt das Feld am unteren Ende des Kanales und dürfte damit für das Abreissen des Stromes an dieser Stelle verantwortlich sein [1; 2].

einem von der Turmspitze gegen die Wolke vorwachsenden Leitblitz beginnen (Initial upward Leader) [3; 13]. In diesem Fall wird von der Turmspitze aus ein geladener Kanal aufgebaut, der sich nach oben verzweigen kann und während einigen Hundertstel- oder Zehntelsekunden Strom zwischen Wolke und Erde führt. Dies ergibt im Turm einen relativ kleinen, langdauernden Strom, der vorstehend als kontinuierlicher Strom bezeichnet wurde. Der von der Turmspitze vorwachsende Kanal kann eventuell mit in der Wolke gebildeten Kanälen zusammentreffen, wobei dem kontinuierlichen Strom jeweils ein Stoßstrom überlagert wird. Die Entladung kann an ihrem unteren Ende abreissen, während dem Kanal weiterhin Ladung aus der Wolke zufliesst. Erfolgt dann eine Entladung nach Erde, so erscheint im Oszillogramm nach einer Strompause von einigen Hundertstelsekunden noch ein Stoss, der bei längerdauerndem Zufluss von Ladung aus der Wolke von weiteren Stössen gefolgt sein kann. Alle solchen Blitze, die mit einem von der Turmspitze gegen die Wolke vorwachsenden Leitblitz beginnen, werden nachstehend als *Aufwärtsblitze* bezeichnet. Im Oszillogramm sind sie durch einen kontinuierlichen Strom am Anfang des Blitzstromes gekennzeichnet.

Aus dem Gesagten geht hervor, dass alle Aufwärtsblitze an das Vorhandensein eines Turmes oder eines anderen den Boden entsprechend überragenden Leiters gebunden sind. Bei den Abwärtsblitzen ist dies nicht der Fall. Der von der Wolke abwärts wachsende Kanal kann den Boden irgendwo treffen. Er wird durch einen Turm nur dann beeinflusst, wenn sein Kopf nahe an die Turmspitze herankommt. Der Überschlag kann dann auf diese anstatt gegen den Boden erfolgen. Es stellt sich die Frage, wie hoch ein Turm sein muss, damit Aufwärtsblitze an ihm entstehen können, und ob die exponierte Lage auf einer Bergkuppe hierfür wesentlich ist. Können sich Aufwärtsblitze eventuell auch an Leitungsmasten, alleinstehenden Bäumen oder Bergkanten ausbilden? Hierüber können die photographischen Blitzaufnahmen noch Anhaltspunkte liefern. Auf bewegtem Film liegt eine einzelne Aufnahme vor, die einen Aufwärtsblitz an einer nicht genau zu ermittelnden Stelle in den Abhängen des Val Colla zeigt [2]. Da Verzweigungen von Aufwärtsblitzen stets nach oben gehen, müsste man mindestens einen Teil derselben auch auf den üblichen Blitzphotographien als solche erkennen. Auf unserem ganzen bis und mit 1963 gewonnenen photographischen Material ist, ausser den Einschlägen in unsere Messtürme und einem Einschlag in einen der beiden 125 m hohen Sendetürme auf dem Monte Ceneri, kein nach oben verzweigter Blitz zu finden. Dies betrifft auch die Masten der 150-kV-Leitung Riazzino-Manno-Cunardo, die über einige Kilometer im Blickfeld unserer Photoapparate verläuft. Erst während der Niederschrift des Manuskriptes im Sommer 1964 wurde auf dem Gipfel des Monte Sighignola ein kurzer nach oben gegabelter Blitz aufgenommen, der wahrscheinlich die dort aufgestellte Fahnenstange getroffen hat. Aufwärtsblitze treten also sehr wahrscheinlich nur an auf Bergkuppen stehenden Türmen oder Stangen auf oder an entsprechenden Gebilden wie das Empire State Building in New York. Sollen unsere Messresultate auch über die Einschläge in ebenes Gelände ein richtiges Bild geben, so dürfen nur die Abwärtsblitze berücksichtigt werden, d. h. die Aufwärtsblitze — das sind im Durchschnitt 73% — sind auszuklammern.

Es ist auch der Fall denkbar, dass sich zwei Leitblitze — ausgehend von der Wolke und von der Turmspitze — entgegenwachsen. Drei Oszillogramme von positiven Blitzen geben Anlass zu einer solchen Vermutung. In diesen Oszillogrammen beginnt der Blitz mit stetig ansteigenden kontinuierlichen Strömen, die in 8,5...15 ms etwa 300...400 A erreichen und dann in kräftige Stösse mit 56...87 kA Scheitelwert übergehen. In einem Fall ist der von der Turmspitze ausgehende, ruckartig vorwachsende Leitblitz durch eine Aufnahme auf bewegtem Film belegt. Die Aufnahme umfasst allerdings nur eine Höhe bis 130 m über die Turmspitze. Unter der Annahme gleichbleibender Vorwachsgeschwindigkeit muss dieser Leitblitz in 8,5 ms eine Höhe von 1200 m erreicht haben, und dort vermutlich auf einen in den Wolken aufgebauten Ladungskanal gestossen sein. Dabei erscheint — gleichzeitig mit dem Aufleuchten des Hauptblitzes in der Aufnahme — der Stossstrom im Oszillogramm, der innert 35 µs auf 40 kA und dann langsamer auf 56 kA ansteigt (vergl. Osz. No. 6232 in Fig. 22 und 25). Der positiv geladene Kanal in der Wolke kann durch eine vorhergehende Entladung zwischen den positiven obern Wolkenschichten (in 5...10 km Höhe) und den negativen untern Wolkenschichten entstanden sein [14]. Er hatte somit eine beträchtliche Länge und — entsprechend der Stossladung im Oszillogramm — eine positive Ladung von mindestens 65 C. Es ist nicht ausgeschlossen, dass ein solcher Kanal über die unteren Wolkenschichten hinaus als Leitblitz gegen die Erde vorgewachsen ist, wobei das unter seinem Kopf ansteigende elektrische Feld zur Auslösung des aufwärtswachsenden Leitblitzes an der Turmspitze führte.

Bei solchen Blitzen ist eine eindeutige Zuordnung zu Abwärtsblitzen oder Aufwärtsblitzen nicht möglich. Sie wurden in den statistischen Auswertungen den Abwärtsblitzen zugeteilt. Dabei wurde von der Annahme ausgegangen, dass ein in den Wolken gebildeter Kanal mit so hoher Ladung wahrscheinlich gegen Erde weiterwächst und auch ohne einen aus der Turmspitze entgegenkommenden Leitblitz zu einem Erdblitz führen würde.

5.3 Oszillogramm-Beispiele

In den Fig. 13...22 wurde versucht, an Hand charakteristischer Oszillogramme einen Überblick über die einzelnen Entladungsformen zu geben. Die Fig. 13...18 zeigen im groben Zeitmaßstab der mechanischen Zeitablenkung den Verlauf des Stromes während der gesamten Blitzdauer, während die Kathodenstrahl-Oszillogramme der Fig. 19...22 auch den Verlauf der einzelnen Stoßströme mit Hilfe der zusätzlichen elektrischen Zeitablenkung ersichtlich machen. Fig. 13...15 zeigen zunächst den Stromverlauf *negativer Aufwärts-Blitze* mit beträchtlichen kontinuierlichen Strömen.

Fig. 13 zeigt Blitze mit nur kontinuierlichem Strom, Fig. 14 solche mit kontinuierlichem Strom und überlagerten Stössen und Fig. 15 Blitze mit kontinuierlichen Strömen, die nach ihrem Abklingen und nach einer Strompause von Stössen gefolgt werden.

Ganz konsequent konnte diese Aufteilung allerdings nicht eingehalten werden. Drei der Oszillogramme, nämlich 6206 und 6311 in Fig. 14 sowie 5955 in Fig. 15 zeigen gleichzeitig Einschläge in beide Türme. In diesen Fällen wurden die entsprechenden Kurven der beiden Türme jeweils untereinander gesetzt, auch wenn eine derselben nach der obigen Einteilung in eine der beiden andern Figuren gehört hätte. Der Strom ist jeweils in zwei Maßstäben aufgezeichnet, und die Amplituden der Stösse, die mit dem KO gemessen wurden, sind in die Oszillogramme eingeschrieben.

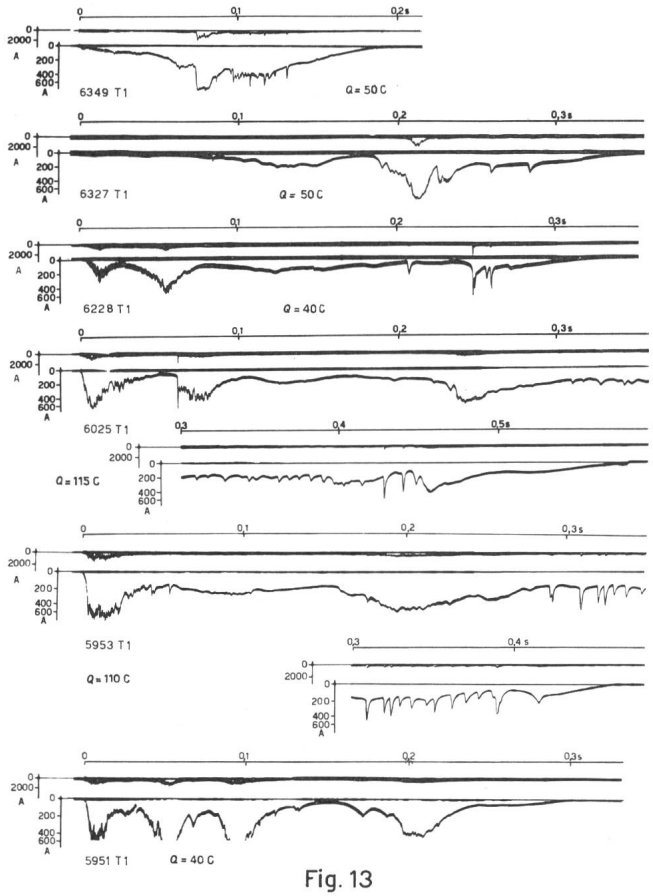


Fig. 13

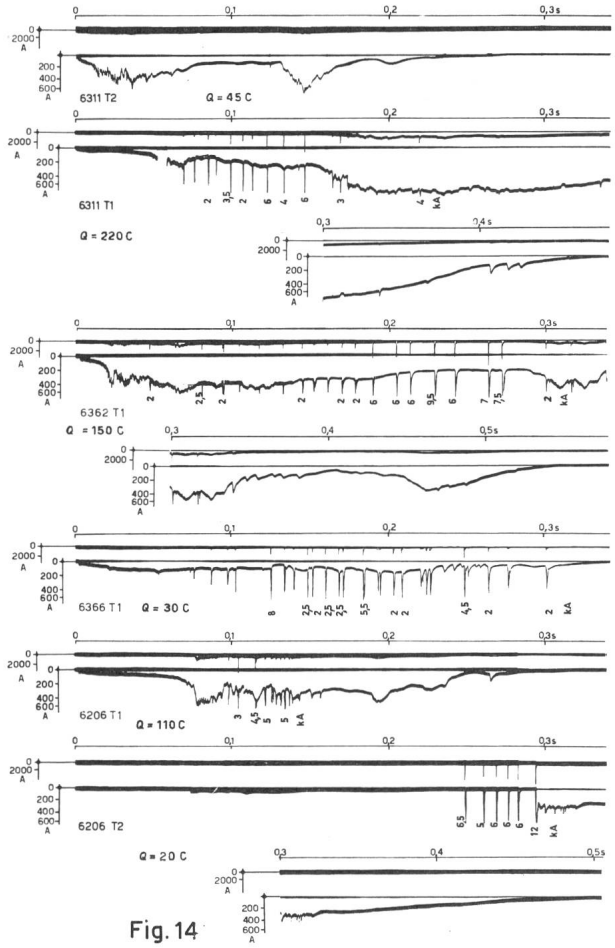


Fig. 14

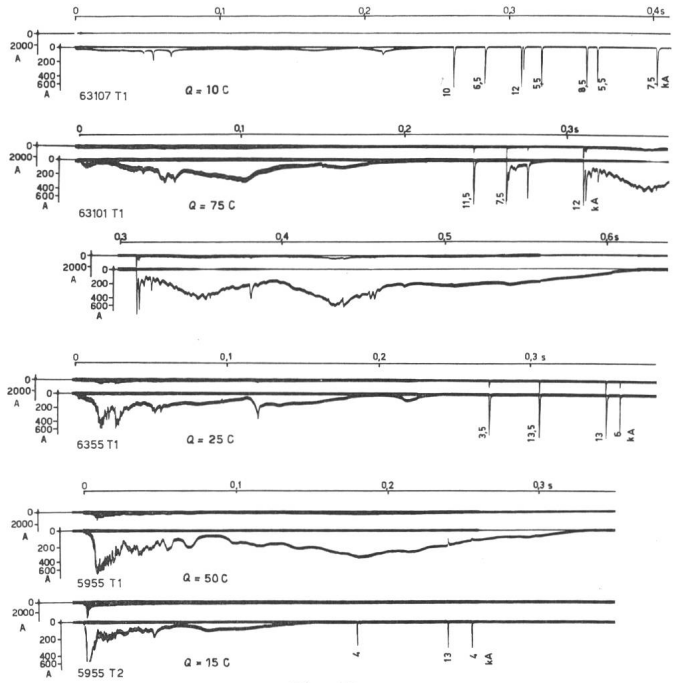


Fig. 15

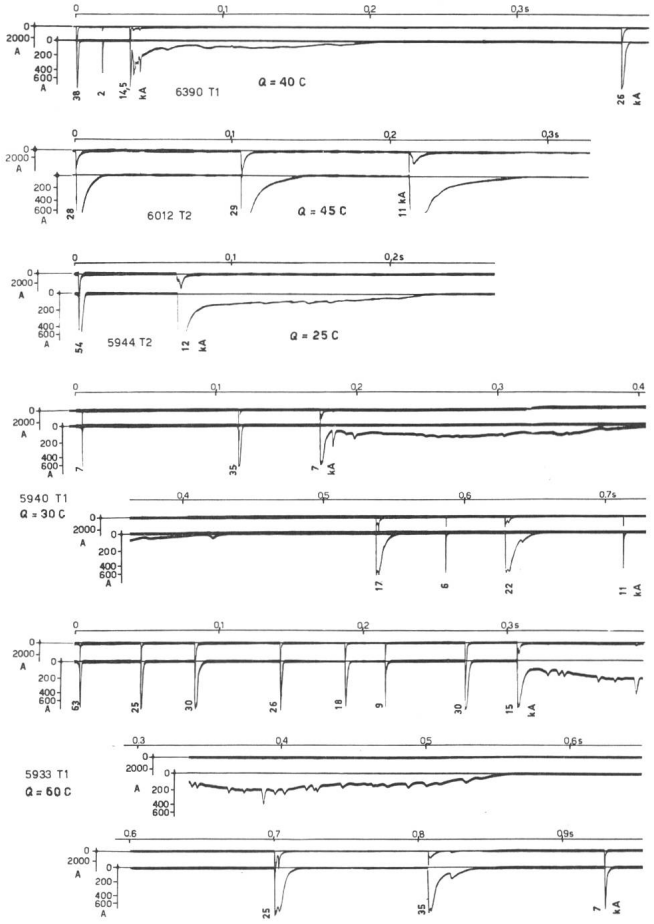


Fig. 16

Fig. 13...16
Schleifenoszillogramme mit zwei Strommaßstäben von negativen Blitzen

Fig. 13: Aufwärtsblitze mit nur kontinuierlichen Strömen
Fig. 14: wie Fig. 13, aber mit kontinuierlichem Strom und überlagerten Stössen
Fig. 15: wie Fig. 13, aber mit kontinuierlichem Strom und nachfolgenden Stössen
Fig. 16: Abwärtsblitze mit mehreren Stössen, die z. T. sehr langsam auslaufen oder in kontinuierliche Ströme übergehen

Im Verlauf der kontinuierlichen Ströme lassen sich kaum charakteristische Formen finden. Dies gilt auch für den Anfang des Stromes, also denjenigen Teil, in dem der nach oben wachsende Ladungskanal aufgebaut wird. In einigen Oszillogrammen steigt der Strom sehr langsam an, während in andern schon nach wenigen ms die grösste Stromspitze von 1000... 2000 A erreicht wird. Unter den reproduktionsfähigen Oszillogrammen wurden vor allem solche mit langer Dauer und hoher Gesamtladung herausgesucht. Die längste Dauer eines solchen Stromes beträgt 0,58 s bei Osz. 6025 T 1 in Fig. 13. Sie ist etwas kürzer als die entsprechende Höchstdauer von 0,67 s in der früheren Beobachtungsperiode (1946...1954). Werte von 0,3...0,4 s sind ziemlich häufig. Die von diesen Strömen transportierten Ladungen sind relativ hoch. Werte von 50... 100 C sind keine Seltenheit. Das ist ein Mehrfaches der grössten gemessenen Stossladung (15 C). Der Maximalwert beträgt 220 C (Osz. 6311 T 1 in Fig. 14).

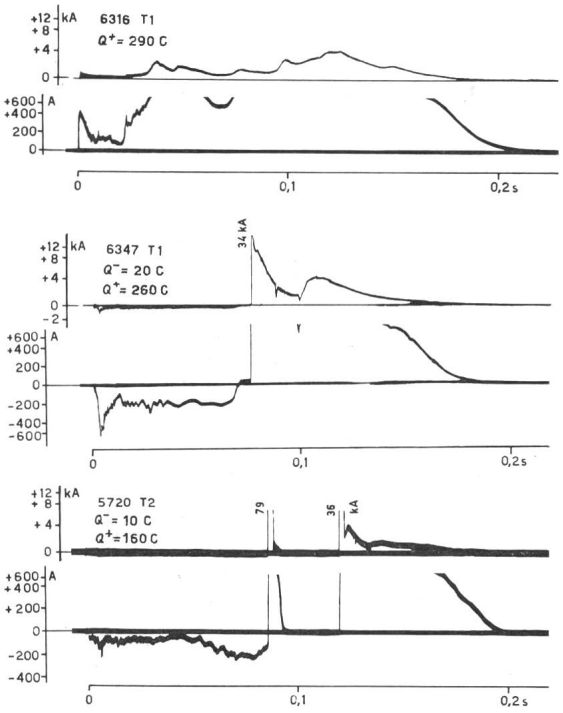


Fig. 17
Schleifenoszillogramme mit 2 Strommaßstäben von Aufwärtsblitzen mit positivem oder wechselndem Strom

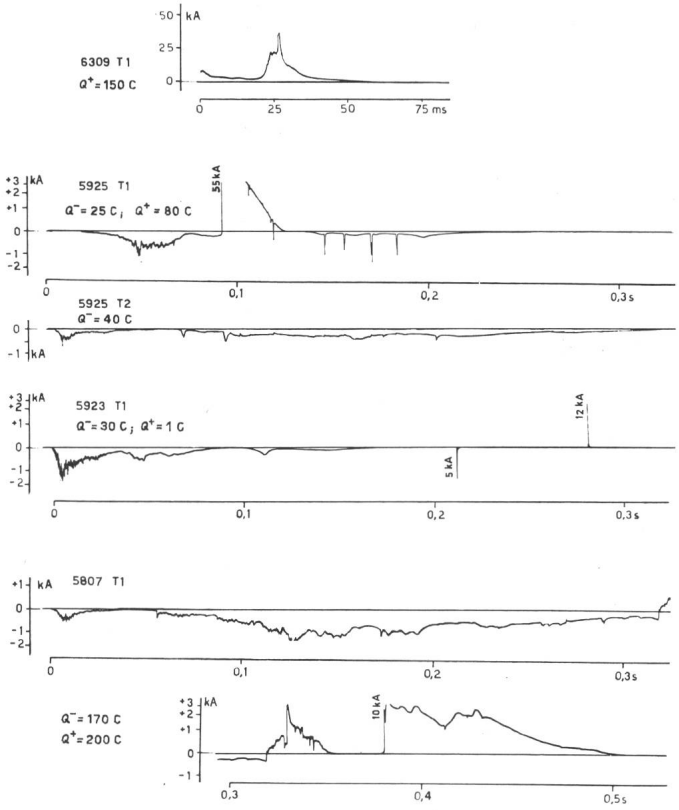


Fig. 18
Kathodenstrahloszillogramme mit langsamer Zeitablenkung von Aufwärtsblitzen mit positiver oder wechselnder Polarität

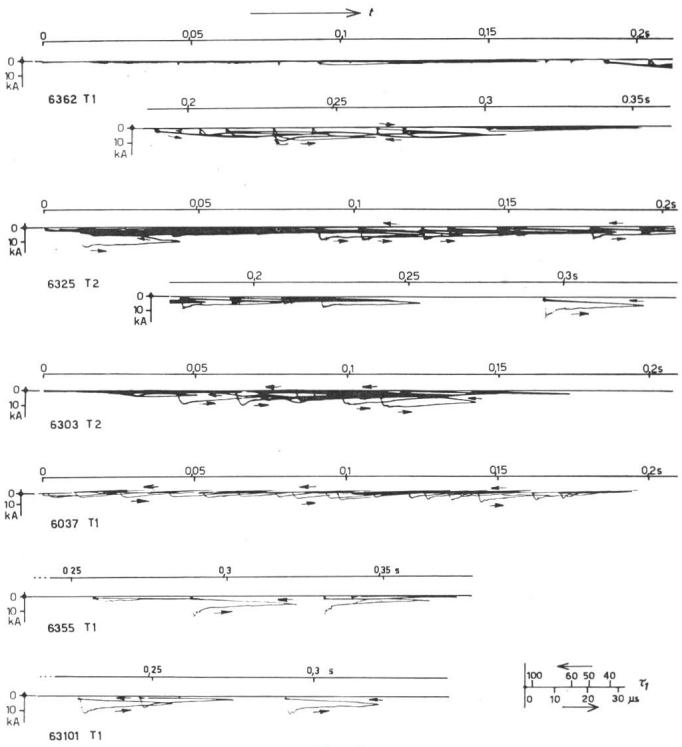


Fig. 19
Kathodenstrahloszillogramme von negativen Blitzen mit vielen kleinen Stössen

Der mechanischen Zeitablenkung t ist die elektrische Zeitablenkung τ_1 überlagert, deren Zeitmaßstab dem Schema rechts unten zu entnehmen ist. Überlagerte kontinuierliche Ströme sind in dem groben Strommaßstab nicht mehr erkennbar

Kontinuierliche Ströme mit überlagerten Stössen, wie sie in Fig. 14 zusammengestellt wurden, sind relativ selten. Die Stösse sind immer nur klein, aber oft in grosser Anzahl vorhanden. Auch unter den Stössen, die nach dem Abklingen eines kontinuierlichen Stromes nachfolgen (Fig. 15), finden sich selten hohe Scheitelwerte. Mit einer Ausnahme von 55 kA erreichen sie höchstens 20 kA. An einen solchen Stoss kann erneut ein kontinuierlicher Strom anschliessen, der wieder eine bedeutende Ladung überträgt z. B. Osz. 63101 T 1 in Fig. 15.

Fig. 16 zeigt an Hand von Schleifen-Oszillogrammen den Gesamtverlauf von 5 Abwärtsblitzen mit mehreren Stössen. Die Stösse sind bei diesen Beispielen meist durch ein langsames Auslaufen während mehreren ms oder durch einen anschliessenden kontinuierlichen Strom charakterisiert. Osz. 5933 T 1 zeigt den längsten Blitz der Beobachtungs-Periode, mit 0,93 s Gesamtdauer. Er ist aber damit nur halb so lang wie der bisher längste Blitz, der 1946 aufgenommen wurde. Osz. 5940 enthält den einzigen Abwärtsblitz der — offenbar mit 2 Ästen — beide Türme gleichzeitig getroffen hat. Es wurde hier

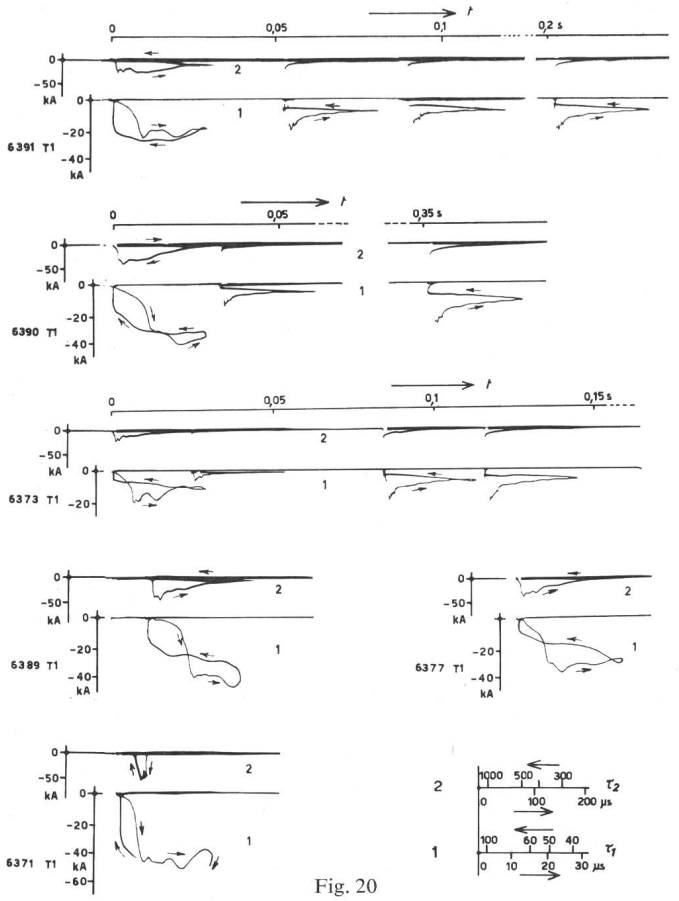


Fig. 20

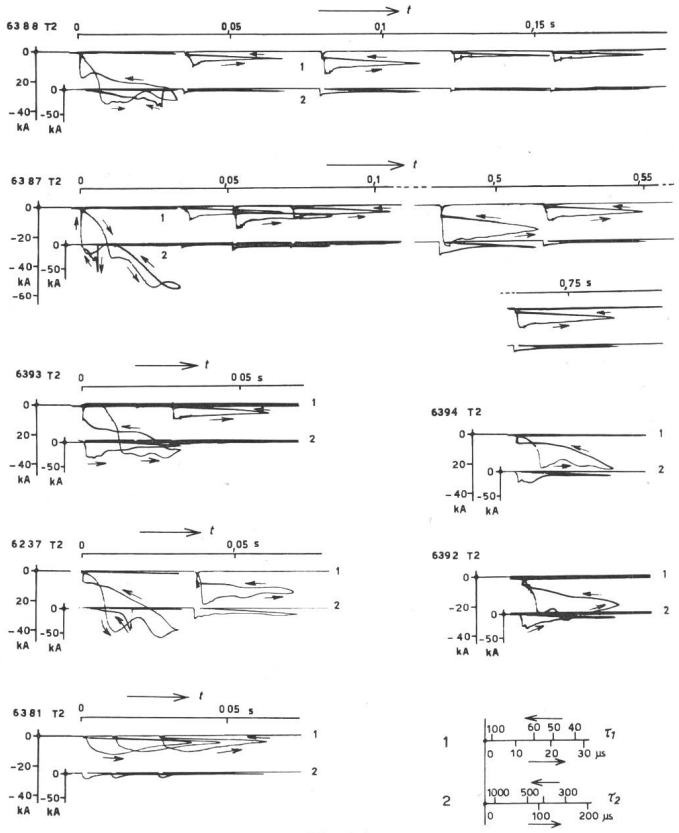


Fig. 21

Fig. 20 und 21

Kathodenstrahloszillogramme mit zwei Strommaßstäben von negativen Abwärtsblitzen mit einem oder mehreren kräftigen Stössen

Der mechanischen Zeitablenkung t ist die elektrische Zeitablenkung τ_1 bzw. τ_2 überlagert, deren Zeitmaßstab dem Schema rechts unten zu entnehmen ist. Mit dem groben Strommaßstab ist die 1000-µs-Zeitablenkung τ_2, mit dem feineren Strommaßstab die 100-µs-Zeitablenkung τ_1 kombiniert. Die Schreibrichtung ist durch Pfeile angedeutet

nur das Oszillogramm von Turm 1 reproduziert, dasjenige von Turm 2 zeigt nur einen Einzelstoss von 19 kA am Anfang des Oszillogramms, gleichzeitig mit dem kleinen Stoss von 7 kA im Turm 1.

In Fig. 17 und 18 ist eine Auswahl von Blitzströmen mit positiver oder wechselnder Polarität zusammengestellt. Es sind alles Ströme mit länger dauernden Entladungen, die mit langsamer Zeitablenkung während der ganzen Blitzdauer aufgeschrieben sind. In Fig. 17 sind es Schleifen-Oszillogramme, in Fig. 18 Kathodenstrahl-Oszillogramme, die aber ebenfalls nur mit einer langsamen Zeitablenkung geschrieben sind.

Die Oszillogramme 6316 T 1 und 6309 T 1 zeigen positive, kontinuierliche Ströme, die bereits einen Begriff von der Grössenordnung der in diesen positiven Blitzen vorkommenden Ströme und Ladungen vermitteln. Alle weiteren hier gezeigten Oszillogramme beginnen mit einem negativen kontinuierlichen Strom, der meist mit einem Stoss in den positiven Strom übergeht. Nur bei Oszillogramm 5807 T 1 erfolgt der Übergang ohne Stoss. Im Oszillogramm 5925 T 1 erfolgen sogar 2 Polaritätswechsel, indem der positive Strom nach kurzer Pause wieder von einem negativen kontinuierlichen Strom gefolgt wird. Bei diesem Blitz zeigt der zweite Turm gleichzeitig eine Entladung mit rein negativem kontinuierlichem Strom. Diese Kurve wurde ebenfalls in Fig. 18 aufgenommen.

Osz. 5720 T 2 in Fig. 17 zeigt den einzigen Blitz mit 2 positiven Stössen. Leider gibt es kein Oszillogramm der Stossform, da dieser Blitz im Jahre 1957 registriert wurde, also vor der Installation des neuen KO. Im Oszillogramm 5923 T 1 folgt auf den kontinuierlichen negativen Strom nach einer Pause von 40 ms noch ein negativer Stoss und dann nach weitern 70 ms ein positiver.

In den Figuren 19...22 sind sodann Kathodenstrahl-Oszillogramme mit zusätzlicher elektrischer Zeitablenkung zusammengestellt.

In Fig. 19 zeigen die ersten 4 Oszillogramme Blitzströme mit einer grossen Anzahl kleiner Stösse. In Oszillogramm 6362 T 1 sind die Stösse einem kontinuierlichen Strom überlagert, wie dies aus dem in Fig. 14 gezeigten Schleifen-Oszillogramm desselben Blitzes im feinen Strommaßstab hervorgeht.

Neben den mit der elektrischen Zeitablenkung gezeichneten Stössen ist noch eine grosse Anzahl Stromspitzen von 1...2 kA vorhanden, die offenbar zu flach waren, um die rasche Zeitablenkung des KO auszulösen. Bei Oszillogramm 6325 T 2 ist kein kontinuierlicher Strom überlagert, der Strom geht zwischen den Stössen ganz auf Null. Zu den beiden weiteren Oszillogrammen 6303 T 2 und 6037 T 1 fehlen leider die Schleifen-Oszillogramme, so dass die Frage nach einem allfällig überlagerten kontinuierlichen Strom nicht beantwortet werden kann. Es scheint aber, dass derartige Blitze entweder mit einem kurzen kontinuierlichen Strom oder dann mit sehr kleinen und sehr flachen Stössen beginnen. Sie wurden daher im allgemeinen den Aufwärtsblitzen zugeordnet.

Die beiden Oszillogramme 6355 T 1 und 63101 T 1 in Fig. 19 sind Ausschnitte aus Oszillogrammen, bei denen die Stösse nach einer Pause auf einen längeren kontinuierlichen Strom folgen. Der Gesamtverlauf der beiden Blitzströme ist aus Fig. 15 ersichtlich.

Fig. 20 und 21 zeigen den Verlauf der Stösse in typischen negativen Abwärtsblitzen. Die Stösse sind in zwei verschiedenen Strom- und Zeitmaßstäben aufgezeichnet. Die Zeitmaßstäbe der elektrischen Zeitablenkung sind rechts unten

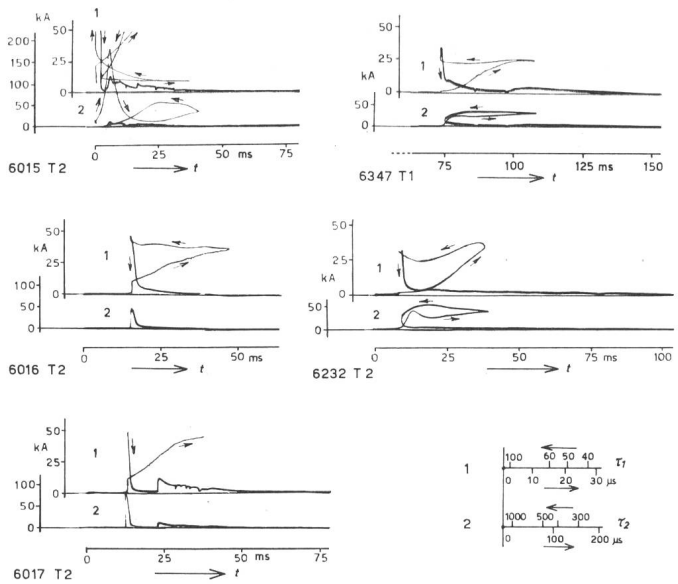


Fig. 22
Kathodenstrahloszillogramme mit zwei Strommaßstäben von positiven Blitzen mit kräftigen Stössen
Erklärungen siehe Fig. 20
Bei den Oszillogrammen 6016 T2 und 6017 T2 wurde die Zeitablenkung τ_2 nicht ausgelöst

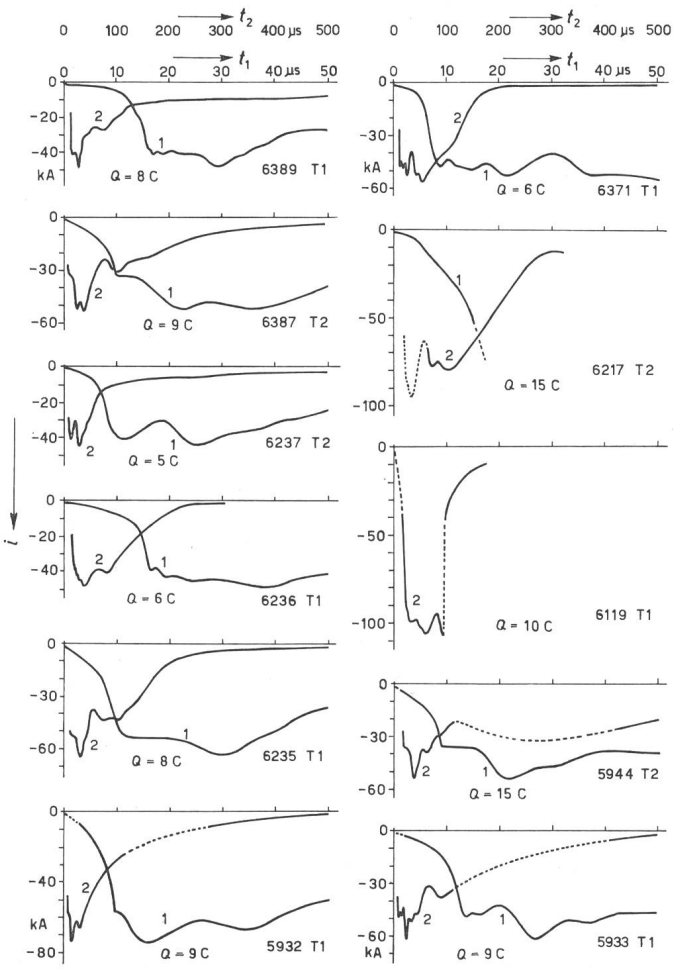


Fig. 23
Kräftige Einzelstösse oder erste Stösse in negativen Abwärtsblitzen in zwei lineare Zeitmaßstäbe umgezeichnet
Kurve *1*: feiner Zeitmaßstab (t_1); Kurve *2*: grober Zeitmaßstab (t_2)
Die punktierten Teile der Kurven können den Oszillogrammen nur andeutungsweise entnommen werden
Bei Oszillogramme 6119 T_1 ist der plötzliche Zusammenbruch des gemessenen Stromes möglicherweise durch einen Überschlag in der Messapparatur bedingt

im Bild angegeben. Es ist zu beachten, dass bei Fig. 20, welche Einschläge in Turm 1 zeigt, die Kurven mit den grossen Strom-Maßstäben und der langsameren Zeitablenkung oben, jene mit den kleinen Strom-Maßstäben und der schnelleren Zeitablenkung unten angeordnet sind, während in Fig. 21, welche Einschläge in T 2 darstellt, die Anordnung umgekehrt ist.

Der bezüglich Strom und Ladung kräftigste Stoss steht praktisch immer am Anfang des Blitzes. Oft besteht auch der Blitz nur aus diesem einen Stoss. Er zeigt eine ganz charakteristische Form der Stossfront, auf die im nächsten Abschnitt näher eingetreten wird. Die Folgestösse weisen im allgemeinen sehr steile Fronten auf, die z. T. wegen der hohen Schreibgeschwindigkeit und wegen überlagerten Stör-Schwingungen im Oszillogramm nicht mehr aufgezeichnet sind.

Zum Abschluss gibt Fig. 22 noch eine Auswahl an Oszillogrammen mit kräftigen positiven Stössen. Oszillogramm 6015 T 2 zeigt mit 180 kA den höchsten Blitzstrom, der bisher auf dem Monte San Salvatore gemessen wurde. Leider hat bei diesem Blitz der Spannungs-Abfall von ca. 200 kV am Shunt und in dessen Zuleitung zu einem Überschlag zwischen Blitzantenne und Turmkonstruktion geführt. Dies ist vermutlich der Grund für den im Oszillogramm gezeichneten raschen Zusammenbruch der Meßspannung. Die wahre Stromkurve hätte vermutlich den Wert von 200 kA überschritten. Die beiden innert einigen Minuten nachfolgenden Blitze 6016 T 2 und 6017 T 2 zeigen beide zwar weniger hohe, aber sehr lange Stromimpulse von etwa 1000 µs Halbwertzeit. Nimmt man für den ersten Blitz eine ähnliche Stoßform mit 200 kA Scheitelwert an, so würde sich eine Stossladung von 200 C ergeben, zu der der anschliessende kontinuierliche Strom noch weitere 175 C beiträgt. Die Blitze 6016 und 17 T 2 sowie 6232 T 2 beginnen mit kontinuierlichen Strömen von 8...15 ms Dauer, die stetig ansteigen und bei 300...400 A in den Stoßstrom übergehen. Die Bedeutung dieser Erscheinung wurde bereits im Abschnitt 5.2 besprochen.

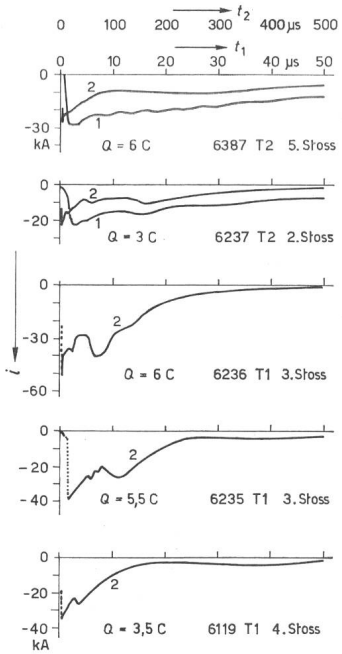
Der Stoss in Oszillogramm 6347 T 1 folgt auf einen negativen kontinuierlichen Strom, wie dies aus dem Schleifen-Oszillogramm in Fig. 17 ersichtlich ist. Allerdings geht der kontinuierliche Strom noch 5,5 ms vor Stossbeginn auf einen kleinen positiven Wert (ca. 50 A) über.

Die Stossfronten sind bei allen positiven Stössen relativ flach. Der scheinbare Sprung beim Beginn der 3 Stösse in den Oszillogrammen 6015-17 T 2 kommt daher, dass der erste Teil der Stossfront zu flach war, um die elektrische Zeitablenkung auszulösen. Bei fast allen positiven Stössen schliesst ein kontinuierlicher Strom an den Stoss an, der ganz erhebliche Ladungsmengen aufweisen kann.

5.4 Typische Stossformen

Aus den Fig. 19...21 ist ersichtlich, dass die *negativen Stösse* im allgemeinen einen ganz typischen Verlauf der Stossfront aufweisen, der allerdings verschieden ist, je nachdem ob es sich um den ersten Stoss eines Abwärtsblitzes oder um einen Folgestoss innerhalb eines Mehrfach-Blitzes handelt. Um die Stossform besser überblicken zu können, wurde in Fig. 23 und 24 eine Auswahl der kräftigsten negativen Stösse in zwei lineare Maßstäbe umgezeichnet. Fig. 23 zeigt jeweils den ersten Stoss oder den einzigen Stoss eines Abwärtsblitzes. Die Front verläuft stets in einer konkaven Kurve, d. h. sie beginnt relativ flach und geht dann in einen steilen Teil über. Obwohl die ge-

Fig. 24
Kräftige Folgestösse in negativen Mehrfachblitzen, in zwei lineare Zeitmaßstäbe umgezeichnet



samte Frontdauer etwa 10...17 µs beträgt, liegt die maximale Steilheit mit 10...20 kA/µs ziemlich hoch. Die Front geht dann, oft mit einem scharfen Knick, in einen flacheren Teil über. Der Strom kann dabei in einer langsamen Schwingung weiter steigen und sein Maximum erst nach 20...40 µs erreichen.

Die Front kann erst von dem Moment an einigermassen genau ausgewertet werden, wo die elektrische Zeitablenkung einsetzt. Einige Oszillogramme zeigen aber deutlich, dass ein schwacher Strom schon einige hundert µs bis eine ms vorher einsetzt und einige hundert A erreichen kann, bis die elektrische Zeitablenkung auslöst. Vielleicht ist dieser Vorgang auf der Mehrzahl der Oszillogramme nur deswegen nicht sichtbar, weil die Auslösung des SO und die Grundauf hellung des KO auch erst mit der elektrischen Zeitablenkung erfolgten. Diese Beobachtung zeigt, dass die Entwicklung der Fangentladung vom ersten Büschel an der Antennenspitze bis zum Erreichen des Leitblitzkopfes offenbar einige hundert µs in Anspruch nimmt.

Im Gegensatz dazu erreicht der Stoßstrom bei den in Fig. 24 dargestellten Folgestössen sein Maximum fast immer innerhalb 1...2 µs[4]). Leider dringen von den heftigen Feldänderungen bei steilen Stössen in Turm 1 Störeinflüsse in die Abschirmung des Oszillographen ein, so dass gerade die steilsten Fronten keine genaue Auswertung gestatten. Es wurden Höchstwerte bis 80 kA/µs ausgewertet, es ist aber nicht ausgeschlossen, dass noch höhere Werte vorkommen.

Das Abklingen der Stoßströme erfolgt bei beiden Stosskategorien ungefähr in der gleichen Zeitmarge. Innerhalb von 200...300 µs klingt der Strom auf weniger als 20 % des Scheitelwertes ab. Anschliessend kann aber noch ein langer Auslauf folgen, so dass Ströme von einigen kA erst innerhalb einiger ms unter die Messgrenze absinken. Bei der Auswertung von Stossladungen ist es eine Ermessensfrage, ob man die in diesem Bereich abfliessenden Ladungen noch dem Stoss selber zurechnen oder ob man diesen Bereich als einen anschliessenden kontinuierlichen Strom auffassen will. Bei unseren Auswertungen wurde der Strom nur bis zu einer maximalen Dauer von 1 ms dem Stoss zugerechnet. Auf diese Weise ergibt sich ein Maximum der Stossladung von 15 C bei den ersten Stössen, und ein solches von 10 C bei den Folgestössen. Würden die Ausläufe bis zu einigen ms Dauer dem Stoss zugerechnet, wären die maximalen Werte etwa doppelt so hoch.

In Fig. 25 wurden die kräftigsten *positiven Stösse* in zwei lineare Maßstäbe umgezeichnet. Es sind hier gröbere Zeitmaßstäbe als bei den negativen Stössen erforderlich, um dem langsameren Ablauf gerecht zu werden. Die Fronten sind flach, ihre maximale Steilheit beträgt 9 kA/µs. Die Stromimpulse sind von langer Dauer[5]) — die Halbwertzeiten liegen um 1000 µs — und gehen praktisch immer in einen bedeutenden kontinuierlichen Strom über. Eine eindeutige Trennung zwischen Stoss und kontinuierlichem Strom ist hier nicht möglich. Zu den in Fig. 25 dargestellten Oszillogrammen wurde die Ladung des gezeichneten Verlaufs bis 2000 µs und die des nachfolgenden kontinuierlichen Stromes getrennt angegeben. In den statistischen Auswertungen der positiven Ströme wurde aber zwischen Stoss und kontinuierlichem Strom nicht unterschieden.

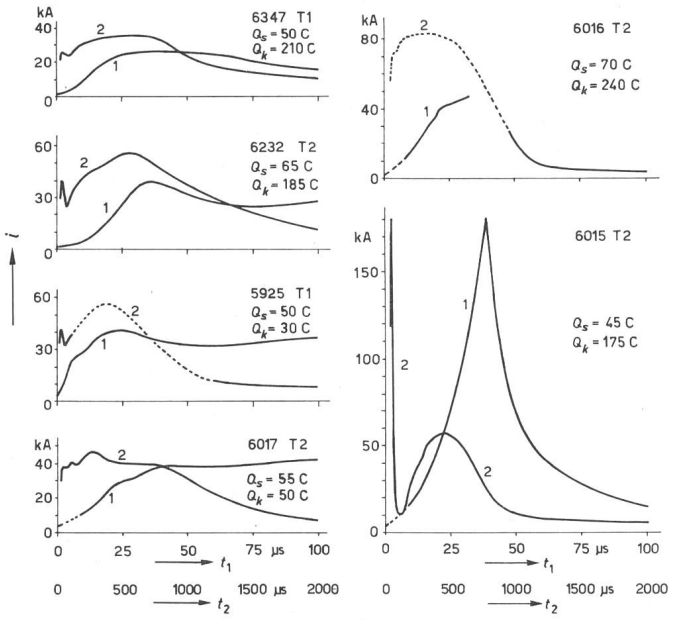


Fig. 25
Kräftige Stösse in positiven Blitzen in zwei lineare Zeitmaßstäbe umgezeichnet

Q_s Stossladung (während der ersten 2 ms nach Stossbeginn gemessen)
Q_k Ladung des an den Stoss anschliessenden kontinuierlichen Stromes (von 2 ms nach Stossbeginn an gemessen)

6. Statistische Auswertung der Blitzstrom-Messungen

6.1 Allgemeine Übersicht

Tabelle IV gibt eine allgemeine Übersicht über die Häufigkeit der verschiedenen Entladungsformen. Dabei ist jeweils die Anzahl der beobachteten Blitze, bzw. Oszillogramme pro Jahr und für die gesamte 9jährige Berichtsperiode angegeben, ferner der jährliche Durchschnitt. Zur Anzahl der ausgewerteten Oszillogramme ist zu sagen, dass nicht jeder kleine Stromimpuls als Blitz gezählt wurde. Vielmehr wurde als untere Grenze der Auswertung die geführte Ladung von 1 C oder das Zeitintegral des Stromquadrates ($\int i^2 dt$) von 100 A^2s festgelegt. Natürlich war es auch nicht möglich, alle Einschläge in die Türme im Oszillogramm festzuhalten. Einzelne Gewitter traten im Frühling oder im Herbst auf, während die Station nicht besetzt war. In seltenen Fällen traten Einschläge so unerwartet auf, dass die Oszillographen nicht im Betrieb waren. Schätzungsweise sind aus solchen Gründen etwa 10 % aller Einschläge nicht registriert worden.

[4]) Bei den Folgestössen treten offenbar keine Fangentladungen auf was damit zusammenhängen dürfte, dass die von der vorhergehenden Entladung zurückbleibenden positiven Raumladungen das Feld an der Turmspitze schwächen.

[5]) Dies dürfte damit zusammenhängen, dass die positiven Ladungen aus den obern Wolkenschichten stammen und nur lange Kanäle mit entsprechend hohen Ladungen zu positiven Erdblitzen führen.

Anzahl der in den Jahren 1955...1963 oszillographierten Blitzeinschläge, aufgeteilt nach Messturm, Stromrichtung und Vorwachsrichtung des Leitblitzes

Tabelle IV

Jahr	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1955...1963 Total	1955...1963 Mittel
Ausgewertete Oszillogramme (beide Türme auf demselben Oszillogramm)	30	20	28	9	46	37	18	36	92	316	35,1
Einschläge gleichzeitig in beide Türme . . .	3	7	2	1	14	5	0	5	26	63	7,0
Total der Einschläge in beide Türme	33	27	30	10	60	42	18	41	118	379	42,1
Einschläge in Turm 1	21	15	14	7	35	24	13	23	70	222	24,7
Abwärtsblitze	5	4	3	1	9	1	7	11	11	52	5,8
Aufwärtsblitze	16	11	11	6	26	23	6	12	59	170	18,9
Einschläge in Turm 2	12	12	16	3	25	18	5	18	48	157	17,4
Abwärtsblitze	7	3	4	1	3	7	2	6	14	47	5,2
Aufwärtsblitze	5	9	12	2	22	11	3	12	34	110	12,2
Positive Blitzströme	3	5	12	0	4	8	0	4	10	46	5,1
Abwärtsblitze	2	1	4	0	2	3	0	2	4	18	2,0
Aufwärtsblitze	1	4	8	0	2	5	0	2	6	28	3,1
Negative Blitzströme	30	22	16	9	54	34	18	37	104	324	36,0
Abwärtsblitze	10	6	3	2	10	5	9	15	21	81	9,0
davon mit kontinuierlichen Stromanteil .	4	4	3	1	5	2	4	3	2	28	3,1
Aufwärtsblitze	20	16	13	7	44	29	9	22	83	243	27,0
davon mit Stössen	4	2	6	2	15	12	5	15	25	86	9,5
Blitzströme mit wechselnder Polarität (nur Aufwärtsblitze)	0	0	2	1	2	0	0	0	4	9	1,0
Prozentsatz der Blitze mit positivem Stromanteil . . . . . %	9,1	18,5	46,7	10,0	10,0	19,0	0	9,8	11,9	14,5	
Prozentsatz der Abwärtsblitze . . . . . %	36,4	26,0	23,3	20,0	20,0	19,0	50,0	41,5	21,2	26,1	

Von manchen Blitzen liegt nur das KO- oder nur das SO-Oszillogramm vor. Aus den Kathodenstrahl-Oszillogrammen allein kann z.B. nicht sicher festgestellt werden, ob einem Stoss ein kontinuierlicher Strom vorausgegangen ist, was für die Entscheidung, ob der betreffende Blitz den Abwärts- oder Aufwärtsblitzen zuzuordnen ist, wesentlich wäre. Aus diesen Gründen sind die angegebenen Zahlen über Abwärts- und Aufwärtsblitze, ebenso die Zahl der Teilblitze, mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Bei Blitzeinschlägen, die die beiden Türme gleichzeitig getroffen haben, wurde der Strom jedes Turmes als selbständiger Blitzstrom gezählt.

Aus Tabelle IV ist ersichtlich, dass die Zahl der Einschläge von Jahr zu Jahr stark schwankt. Turm 1 wurde etwas mehr getroffen als Turm 2, von den Abwärtsblitzen trafen 52,5 %, von den Aufwärtsblitzen 61 % den auf dem Berggipfel stehenden Turm 1. Die Aufwärtsblitze sind wesentlich häufiger als die Abwärtsblitze, nur 39 % der positiven und 25 % der negativen Blitzströme sind Abwärtsblitze. Blitzströme mit wechselnder Polarität wurden nur bei Aufwärtsblitzen festgestellt. Dass die negativen Blitzströme die positiven und diejenigen mit wechselnder Stromrichtung weit überwiegen, wurde bereits unter 5.1 ausgeführt.

Tabelle V gibt eine Übersicht über die in den Berichtsjahren gemessenen Höchstwerte des Stromscheitelwertes, der Blitzladung und des Zeitintegrals des Stromquadrates bei positiven und negativen Blitzen, und Tabelle VI zeigt die Summe der in jedem Jahr durch alle Blitze zur Erde abgeleiteten Ladungen. Dividiert man das Total von 1955...1963 aus Tabelle VI durch die entsprechende Anzahl Blitze aus Tabelle IV, so ergeben sich für die von einem Blitz nach Erde abgeleitete Wolkenladung die folgenden Mittelwerte:

Positiver Abwärtsblitz	87 C
Positiver Aufwärtsblitz	64 C
Negativer Abwärtsblitz	11 C
Negativer Aufwärtsblitz	22 C

Gemessene Maximalwerte pro Einschlag von Strom, Ladung und Zeitintegral des Stromquadrates bei positiven und negativen Blitzströmen in den Jahren 1955...1963

Tabelle V

Jahr	Strom kA +	Strom kA −	Ladung C +	Ladung C −	$\int i^2\,dt$ A^2s +	$\int i^2\,dt$ A^2s −
1955	5	79	50[1])	110[1])		
1956	20	45	23[1])	65[1])		
1957	87	57	160[1])	70[1])		
1958	10	20	200	170	$3 \cdot 10^5$	$1{,}5 \cdot 10^5$
1959	55	74	90	110	$6 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$
1960	180	29	310	120	$5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^5$
1961	0	105	0	35	0	$7 \cdot 10^5$
1962	56	95	250	110	$3 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^5$
1963	36	55	290	220	$2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$

[1]) 1955...1957 ohne die Ladungen der Stoßströme (nur mit dem SO gemessen).

Die Blitze mit wechselnder Stromrichtung wurden dabei sowohl bei den positiven als auch bei den negativen Blitzen mitgezählt.

Interessant ist auch der Vergleich der positiven und negativen Ladungen in Tabelle VI. Gesamthaft wird durch Einschläge in die beiden Messtürme fast doppelt so viel negative wie positive Ladung von den Wolken zur Erde transportiert. Betrachtet man aber nur die Abwärtsblitze, die nicht an die Türme gebunden sind, so kehren sich die Verhältnisse um. Dies widerspricht der Annahme der Meteorologen, dass die bei schönem Wetter infolge des luftelektrischen Feldes von der Erde zur Atmosphäre fliessenden negativen Ladungen durch ein Übergewicht der negativen Blitzladungen wieder zur Erde zurückgeführt werden. Zum Übergewicht der positiven Abwärtsblitze ist allerdings zu sagen, dass es durch wenige sehr kräftige Blitze verursacht wird, so dass unser Beobachtungsmaterial eventuell für eine einwandfreie statistische Schlussfolgerung nicht genügt. Auch ist bei einigen dieser kräftigen Blitze die Zugehörigkeit zu den Abwärtsblitzen etwas zweifel-

haft (vergl. Abschnitt 5.2). Anderseits stehen auch andere Möglichkeiten zur Verfügung, um die Rückkehr der negativen Ladungen zu erklären, z. B. Glimmströme an Baumwipfeln und ähnlichen Spitzen im Gewitterfeld. Jedenfalls überwiegen bei den in Tabelle III ausgewerteten Glimmströmen an den Turmspitzen stets die negativen Ladungen.

Durch die oszillographierten Blitzströme von den Wolken zur Erde abgeleitete positive und negative Ladungen in Coulomb in den Jahren 1955...1963

Tabelle VI

Jahr	Abwärtsblitze		Aufwärtsblitze		Total	
	+	—	+	—	+	—
1955[1])	20	130	50	660	70	790
1956[1])	20	30	50	220	70	250
1957[1])	280	80	480	420	760	500
1958	0	30	200	220	200	250
1959	130	150	240	990	370	1140
1960	630	50	360	730	990	780
1961	0	100	0	70	0	170
1962	300	100	100	530	400	630
1963	190	220	900	1760	1090	1980
Total 1955[1])...63	1570	890	2380	5600	3950	6490
Mittel 1955[1])...63	174	99	264	622	438	721
Mittel 1958 ...63	208	108	300	716	508	824

[1]) 1955...1957 ohne die Ladungen der Stoßströme (nur mit den SO gemessen).

Die Häufigkeit, mit der verschieden hohe Werte der den Blitzverlauf charakterisierenden Grössen gemessen wurden, ist in den Fig. 26...41 in Kurvenform dargestellt. Die Ordinate gibt dabei die Summenhäufigkeit an, mit der der in der Abszisse aufgetragene Messwert während eines Blitzes erreicht wird. Diese Auswertungen wurden für die ganze Berichtsperiode und nicht für jedes Jahr einzeln durchgeführt. Positive und negative Stromanteile von Blitzen mit wechselnder Stromrichtung wurden dabei wie selbständige Blitze behandelt. Die Summenhäufigkeit ist in absoluten Zahlen (Anzahl Blitze) und nicht in Prozenten angegeben. Bei einer Prozent-Darstellung wird die Summenhäufigkeit auf die Gesamtzahl aller Einschläge bezogen. Diese hängt aber von der willkürlichen Grenze des Stromes, der Ladung oder des Wertes von $\int i^2 dt$ ab, von der an die Einschläge überhaupt als solche gezählt werden, und würde daher eine willkürliche Note in die Darstellung hineinbringen.

In jedem Diagramm ist neben der Kurve 1, die aus allen Einschlägen ausgewertet wurde, eine zweite Kurve 2 eingetragen, die nur die Abwärtsblitze berücksichtigt. Dies in der Überlegung, dass bei Einschlägen im freien Gelände nur die Abwärtsblitze vorkommen. Die in den Kurven ausgewerteten Grössen sind in den Abschnitten 6.2...6.7 besprochen.

6.2 Grösster Stromscheitelwert des Blitzes (Fig. 26 und 27)

Die eingetragenen Werte von mehr als 2 kA sind bei negativen Blitzen stets an Stössen gemessen, bei positiven Blitzen auch an länger dauernden Stromspitzen. Auch hier zeigt sich, dass positive Blitze viel weniger häufig als negative Blitze sind, aber im Mittel- und im Extremfall wesentlich höhere Ströme führen. Hohe Scheitelwerte treten fast nur bei Abwärtsblitzen auf, die Aufwärtsblitze treten erst bei kleineren Scheitelwerten in Erscheinung.

6.3 Durch den Blitzstrom geführte Ladung (Fig. 28...31)

Da bis und mit 1957 die Stossladungen nicht gemessen werden konnten, die Ladungsmenge also bei allen Oszillogrammen mit Stössen etwas zu tief ausgewertet wurde, sind die Häufigkeitskurven sowohl für die ganze Periode 1955...1963 (Fig. 28 und 30) als auch für die Periode mit KO-Messung 1958...1963 (Fig. 29 und 31) ausgewertet.

Auf 1 Jahr bezogen, sind allerdings die beiden Kurven nur bei hohen positiven Strömen merklich verschieden. Es ist zu beachten, dass bei hohen negativen Ladungen die Aufwärtsblitze stark überwiegen, und negative Ladungen über 100 C nur noch bei Aufwärtsblitzen vorkommen. Positive Ladungen von nahezu 300 C wurden dagegen auch bei Abwärtsblitzen gemessen. Bei allen positiven Ladungswerten sind Abwärts- und Aufwärtsblitze etwa gleich häufig. Im Mittel und Extremfall führen positive Blitze mehr Ladung als negative.

Bei negativen Blitzen kann man die Ladung noch aufteilen in einen *Ladungsanteil, der durch den kontinuierlichen Strom geführt wird* (Fig. 32) und einen *Ladungsanteil, der durch die Stösse geführt wird* (Fig. 33). Der zweite konnte allerdings nur für die Periode 1958...1963 ausgewertet werden.

Da im allgemeinen die Stossladungen gegenüber den von kontinuierlichen Strömen geführten Ladungen klein sind, gibt der Ladungsanteil der kontinuierlichen Ströme (Fig. 32) fast das gleiche Bild wie die Gesamtladung (Fig. 30). Bei den Stössen (Fig. 33) zeigt sich aber, dass grosse Ladungen vorwiegend, solche von über 8 C sogar ausschliesslich, den Abwärtsblitzen zugeordnet sind.

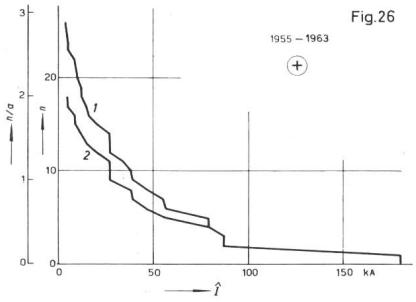
6.4 Zeitintegral des Stromquadrates $\left(\int i^2 dt\right)$ (Fig. 34 und 35)

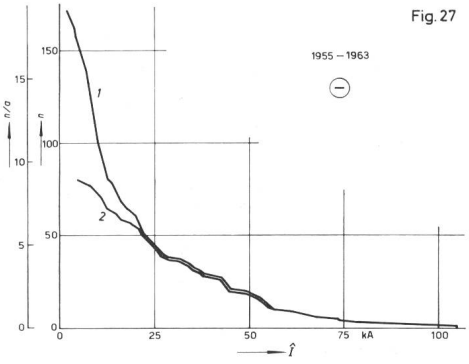
Diese Grösse ist für den Energieumsatz massgebend, den der Blitzstrom in einem Leiter mit gegebenem Ohmschem Widerstand erzeugt. Da sich hier die Messwerte über vier Zehner-Potenzen verteilen, wurden sie in einem logarithmischen Maßstab aufgetragen. Hier ist der grössere Maximalwert der positiven Blitze ($5 \cdot 10^6$ A^2s) gegenüber demjenigen negativer Blitze ($8 \cdot 10^5$ A^2s) besonders augenfällig. Dabei ist zu beachten, dass der kräftigste positive Blitz 6015 T 2 (siehe Fig. 22 und 25) wegen des Überschlages zwischen Blitzantenne und Turmkonstruktion nicht voll aufgezeichnet ist. Er ist daher nur mit einem reduzierten Wert in der Statistik erschienen. Es ist wahrscheinlich, dass dieser Blitz ein $\int i^2 dt$ von mehr als 10^7 A^2s aufgewiesen hat.

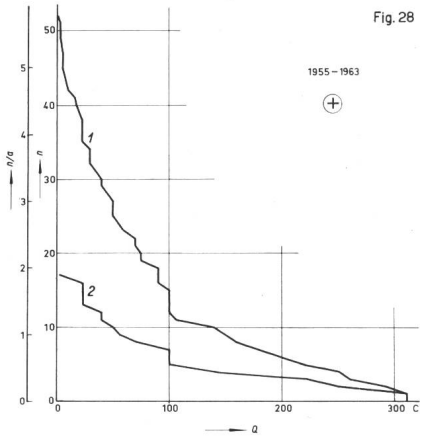
6.5 Grösste Steilheit der Stossfront (Fig. 36 und 37)

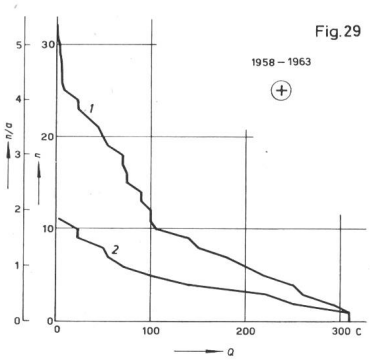
Die in die Figuren eingetragenen Werte entsprechen der Neigung der steilsten Tangente an die Front der Stromkurve. Es sind also die Höchstwerte innerhalb des Frontverlaufes, die auch für die Maximalwerte der an allfälligen Induktivitäten auftretenden Spannungen massgebend sind. Bei den Folgestössen erfolgt allerdings der Stromanstieg fast gradlinig von Null bis zum Scheitelwert (wenigstens soweit als sich das aus den hiezu relativ langsam geschriebenen Oszillogrammen ablesen lässt). Beim ersten Stoss eines Blitzes ist dagegen, wie bereits ausgeführt, der Stromanstieg sehr ungleichmässig. Ein Mittelwert, z. B. die nach den CEI-Empfehlungen [5] definierte Frontsteilheit der Prüfstösse, die sich aus der Verbindungslinie der Punkte mit 10 und 90 % des Scheitelwertes ergibt, eignet sich daher schlecht zur Charakterisierung der Blitzströme.

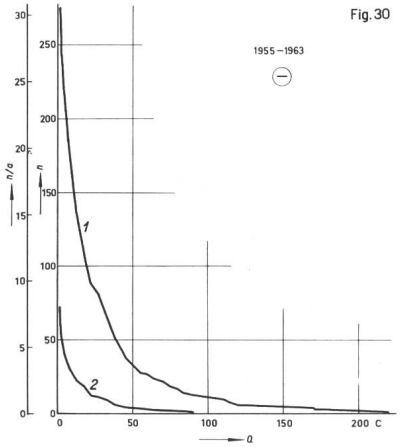
Bei Blitzen mit mehreren Stössen wurde diese Steilheit am steilsten Stoss ermittelt. Bei den positiven Stössen konnte diese Kurve für die Periode 1958...1963, bei den meist viel steileren

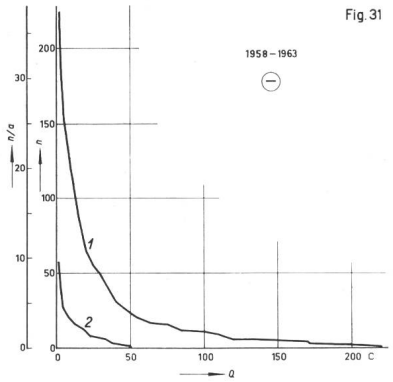


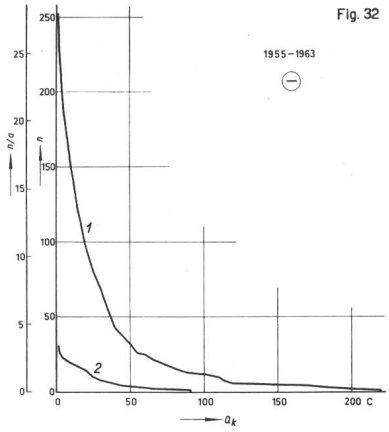


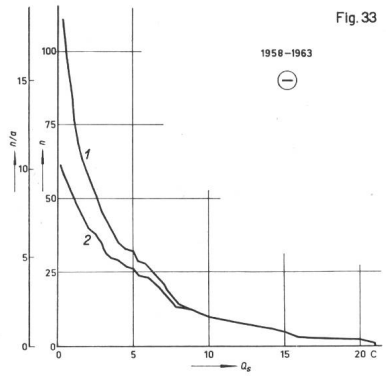


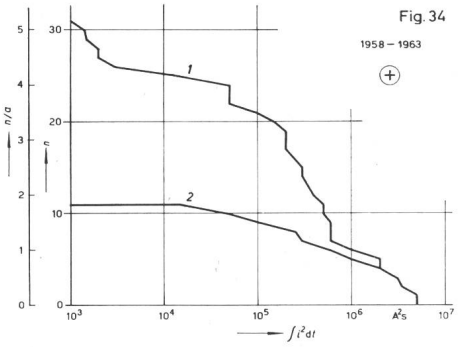


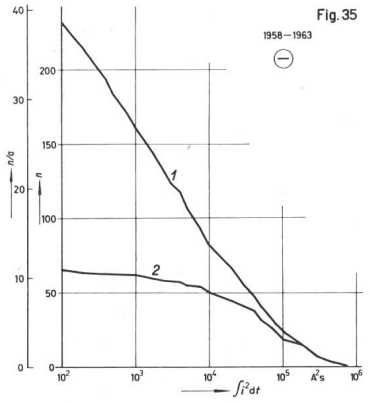


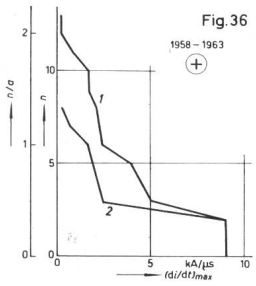


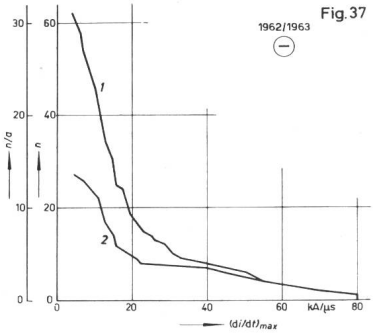




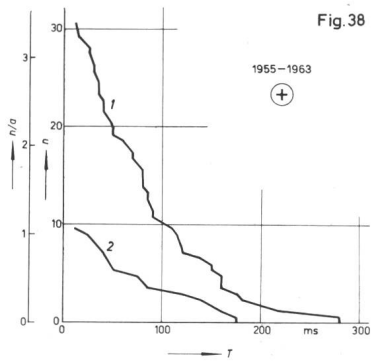


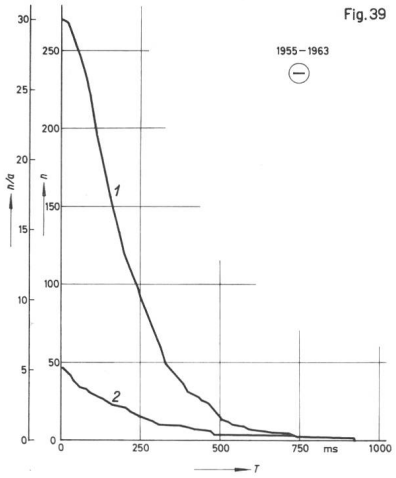


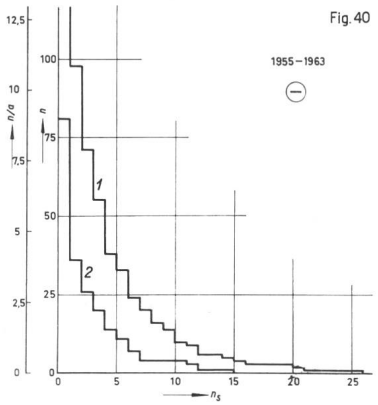




negativen Stösse nur für 1962/1963 ausgewertet werden. Wie bereits im Abschnitt 5.4 ausgeführt wurde, konnte auch ein Teil der steilsten Fronten der Messungen 1962...1963 nicht ausgewertet werden, und der Höchstwert von 80 kA/µs ist daher unsicher. Dass noch höhere Werte auftreten können, ist durchaus möglich.







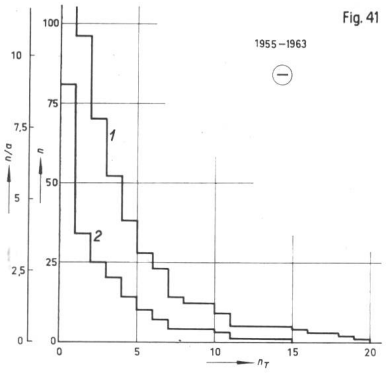


Fig. 26...41

Summenhäufigkeit der den Blitzstrom charakterisierenden Grössen

n Anzahl der in der angegebenen Messperiode gemessenen positiven oder negativen Blitze, die den in der Abszisse angegebenen Wert erreichen oder überschreiten; n/a mittlere Anzahl positiver oder negativer Blitze pro Jahr, die den in der Abszisse angegebenen Wert erreichen oder überschreiten

Kurve *1*: alle Blitze berücksichtigt; Kurve *2*: nur die Abwärtsblitze berücksichtigt

Bei Blitzen mit wechselnder Stromrichtung sind der positive und der negative Stromanteil wie selbständige Blitze behandelt

Fig. 26 und 27: $\hat{I}$ grösster Scheitelwert des Blitzstromes
Fig. 28...31: Q durch den Blitzstrom transportierte Ladung
Fig. 32: Q_k durch den kontinuierlichen Anteil des Blitzstromes transportierte Ladung
Fig. 33: Q_s durch Stoßströme transportierte Ladung (alle Stösse des Blitzes)
Fig. 34 und 35: $\int i^2 dt$ Zeitintegral des Blitzstromquadrates
Fig. 36 und 37: $(di/dt)_{max}$ grösste Frontsteilheit (steilste Tangente)
Fig. 38 und 39: T Gesamtdauer des Blitzes
Fig. 40: n_s Anzahl der Stösse
Fig. 41: n_T Anzahl der Teilblitze

6.6 Gesamte Blitzdauer
(Fig. 38 und 39)

Hier wurde die Zeit vom Beginn der ersten bis zum Abklingen der letzten Teilentladung in die Figuren aufgetragen. Diese Zeit kann z. B. die Dauer eines kontinuierlichen Stromes, wenn nur ein einziger solcher vorkommt, oder die Summe der zeitlichen Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Stössen sein.

6.7 Anzahl der Teilblitze und Stösse pro Blitz
(Fig. 40 und 41)

Da positive Blitze oder Blitze mit wechselnder Stromrichtung fast immer aus einem einzigen Teilblitz bestehen und höchstens einen Stoss aufweisen, wurden diese Kurven nur für negative Blitze gezeichnet. Die Oszillogramme der Berichtsperiode zeigen nur zwei Ausnahmen von der genannten Regel. Oszillogramm 5720 T 2 in Fig. 17 zeigt zwei positive Teilblitze, die beide mit einem Stoss beginnen. Der erste derselben schliesst an einen negativen kontinuierlichen Strom an. Oszillogramm 5923 T 1 in Fig. 18 zeigt 3 Teilblitze: Einen negativen kontinuierlichen Strom, einen negativen Stoss und einen positiven Stoss.

Wie schon beschrieben, sind bei Blitzen mit extrem vielen Stössen die einzelnen Stösse meist nur klein. In Fig. 41 sind nur Stösse mit mindestens 2 kA Scheitelwert berücksichtigt.

6.8 Statistik der Blitzstrom-Stösse

Nachdem im Vorhergehenden die interessierenden Grössen stets pro Blitz ausgewertet wurden, soll für einige die Stösse betreffenden Grössen auch eine statistische Auswertung pro Stoss angeführt werden, bei der auch die verschiedenen Stösse innerhalb eines und desselben Blitzes berücksichtigt sind. Von der Ausbeute der KO-Messungen von 1958...1963 wurden alle Stösse mit mindestens 10 kA Scheitelwert ausgewertet und die Summenhäufigkeit der vorkommenden Stromscheitelwerte, Ladungen und der max. Frontsteilheiten in den Fig. 42, 43 und 44 dargestellt. Die Frontsteilheiten konnten allerdings nur für die Jahre 1962 und 1963 ausgewertet werden. Aus den Kurven ist wieder ersichtlich, dass bei den Strom-Scheitelwerten und den Stossladungen die Anfangs- und Einzelstösse von Abwärtsblitzen die grössten Werte ergeben. Die Folgestösse innerhalb von Abwärtsblitzen liegen im Durchschnitt nur halb so hoch, und die Stösse in Aufwärtsblitzen sind meist unbedeutend. (1957 wurde allerdings auch ein Stoss mit 55 kA Scheitelwert in einem Aufwärtsblitz festgestellt.) Bei den Steilheiten dagegen ergeben die Folgestösse der Abwärtsblitze die grössten und die Anfangs- und Einzelstösse die tiefsten Werte. Dazu ist zu sagen, dass bei den Folgestössen eine grössere Anzahl der steilsten Fronten fehlt, weil diese wegen der Störeinflüsse nicht ausgewertet werden konnten. Könnte man diese in die Darstellung einbeziehen, würde sich die Kurve B entsprechend nach oben verschieben.

6.9 Vergleich mit den Resultaten der Berichtsperiode 1946...1954

In der vorhergehenden Berichtsperiode 1946...1954 wurden insgesamt 274 Blitzschläge ausgewertet. Unter Berücksichtigung, dass bis und mit 1959 nur ein Messturm zur Verfügung stand, ergibt das praktisch den gleichen Mittelwert pro Jahr und Turm wie in der jetzigen Berichtsperiode. Bei diesem Vergleich der Häufigkeit verschiedener Entladungsformen fällt vor allem auf, dass Blitze mit positivem Strom oder wechselnder Stromrichtung in der vorhergehenden Periode wesentlich häufiger waren. Der prozentuale Anteil dieser Stromrichtungen war:

Positive Ströme	20,8 %	(jetzt 12,1 %)
Wechselnde Ströme	4,7 %	(jetzt 2,4 %)

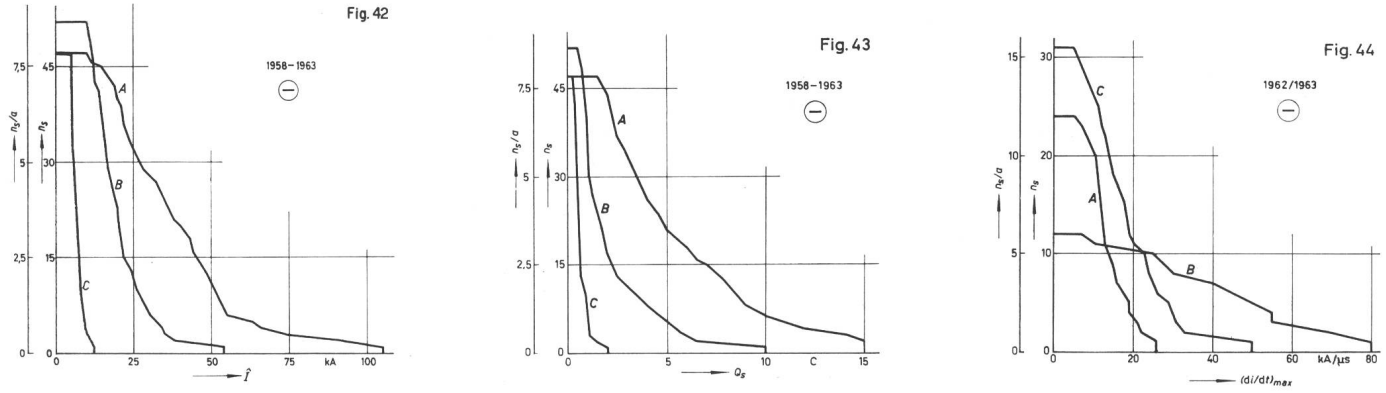


Fig. 42...44

Summenhäufigkeit der die negativen Stoßströme charakterisierenden Grössen

n_s Anzahl der in der angegebenen Messperiode gemessenen negativen Stösse, die den in der Abszisse angegebenen Wert erreichen oder überschreiten; n_s/a mittlere Anzahl negativer Stösse pro Jahr, die den in der Abszisse angegebenen Wert erreichen oder überschreiten

Kurve *A*: nur Stösse am Anfang von Abwärtsblitzen; Kurve *B:* nur Folgestösse in Abwärtsblitzen; Kurve *C:* nur Stösse innerhalb von Aufwärtsblitzen

In allen Kurven wurden nur Stösse mit mindestens 10 kA Stromscheitelwert berücksichtigt

Fig. 42: $\hat{I}$ Scheitelwert des Stoßstromes
Fig. 43: Q durch den Stromstoss transportierte Ladung
Fig. 44: $(di/dt)_{max}$ grösste Frontsteilheit des Stoßstromes (steilste Tangente)

Eine systematische Aufteilung in Abwärts- und Aufwärtsblitze wurde früher nicht vorgenommen. Die Blitze, die mit einem Stoss von mehr als 5 kA Scheitelwert beginnen, wurden aber separat ausgezählt. Unter der Annahme, dass sie die Abwärtsblitze repräsentieren, haben diese den folgenden Anteil an der Gesamtzahl der Blitze.

Bei den positiven Strömen 26,4% (jetzt 39,2%)
Bei den negativen Strömen 14,7% (jetzt 25%)

Die Häufigkeitsverteilung der Stromscheitelwerte, Blitzladungen und Blitzdauer wurden auch in den früheren Berichtsperioden ermittelt, allerdings ohne Aufteilung in positive und negative Blitze. Zu einem Vergleich müssen also die vorliegenden Kurven für beide Polaritäten superponiert werden, und es ist wieder zu berücksichtigen, dass von den neun Jahren der vorhergehenden Periode während vier Jahren nur ein Messturm bestand. Tut man das, so zeigt sich, dass in der Berichtsperiode die Stoßströme im ganzen aufgezeichneten Bereich oberhalb 2 kA häufiger sind als in der früheren Messperiode. Scheitelwerte von über 50 kA sind sogar dreimal häufiger. Dies erklärt sich durch die Feststellung, wonach auch der Anteil der Abwärtsblitze in der jetzigen Berichtsperiode wesentlich grösser ist. Eine bessere Übereinstimmung ergibt sich bei den übrigen Häufigkeitskurven. Diejenigen der Blitzdauer decken sich praktisch. Auch diejenigen der Ladungen stimmen weitgehend überein, nur Ladungen über ca. 100 C sind in der Berichtsperiode deutlich häufiger als in der vorhergehenden Messperiode.

7. Bedeutung der Resultate für Blitzgefährdung und Blitzschutz

7.1 Häufigkeitsverteilung

Als Einschläge in übliche Gebäude oder Leitungen im Flachland kommen, wie unter 5.2 näher ausgeführt, nur Abwärtsblitze in Frage. Für die Gefährdung solcher Anlagen sind somit nur die an Abwärtsblitzen gemessenen Beanspruchungswerte massgebend. Einzig bei Türmen und eventuell Leitungen im Gebirge sind auch die Aufwärtsblitze zu berücksichtigen. Was die Häufigkeitsverteilung der charakteristischen Blitzdaten anbetrifft, so kann diese allerdings auch innerhalb der Abwärtsblitze durch die Messtürme beeinflusst sein. Nach einer von *Golde* [15] ausgebauten Schutzraumtheorie lenkt eine die Umgebung überragende Blitzableiterspitze einen Blitz noch aus umso grösserer Entfernung auf sich, je grösser die Spannung des vorwachsenden Leitblitzes gegen Erde ist, d. h. je mehr Ladung der vorwachsende Kanal enthält. Diese Überlegungen

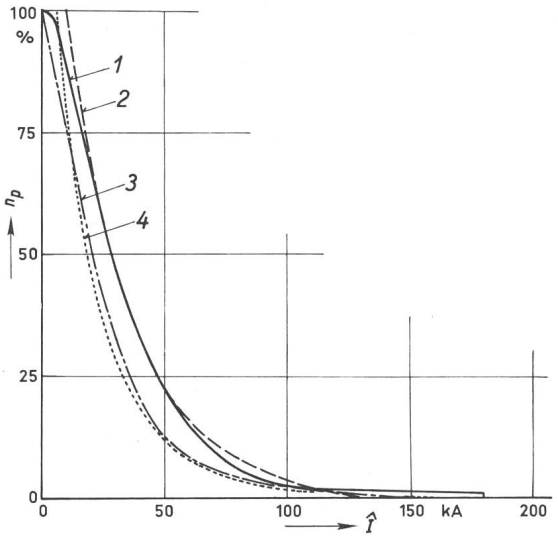


Fig. 45

Summenhäufigkeit der Stromscheitelwerte im Vergleich mit Messungen verschiedener Autoren an Freileitungen

$\hat{I}$ grösster Stromscheitelwert des Blitzes; n_p Prozentsatz der Blitze, die den in der Abszisse angegebenen Scheitelwert erreichen oder überschreiten

Kurve *1*: In der Berichtsperiode auf dem Monte San Salvatore gemessene Abwärtsblitze (positive und negative zusammengenommen)

Kurve *2*: Nach *Sporn* und *Gross* [6], aus Messungen an 132-kV-Leitungen mit Erdseilen

Kurve *3*: Nach *Baatz* [7], Mittelwerte aus Messungen an 15...220-kV-Leitungen mit und ohne Erdseile

Kurve *4*: Nach *Golde* [18], aus Messungen an 11-kV-Leitungen mit Erdseilen

gelten auch für unsere Messtürme, so dass diese wahrscheinlich einen relativ höheren Anteil an hohen Stossladungen (und damit auch an hohen Stoßströmen) erhalten als eine Fläche im ebenen Gelände. Sie gelten aber in gleicher Weise auch für Leitungen, Leitungsmasten und hohe oder alleinstehende Gebäude, d. h. für die meisten Objekte, bei denen Blitzgefährdung und Blitzschutz von Interesse sind. Wesentlich ist dabei, dass sich von einem solchen Objekt eher eine Fangentladung ausbildet als von irgend einem anderen Punkt der Umgebung. Die Annahme ist daher berechtigt, dass im allgemeinen die Häufigkeitsverteilung von Stromscheitelwerten und Ladungen bei Einschlägen in blitzgefährdete Objekte ungefähr dieselbe ist, wie sie an unseren Blitztürmen gemessen wurde. Sie wird noch erhärtet durch den Vergleich der von verschiedenen Autoren mit der Stahlstäbchen-Methode an Freileitungen gemessenen Stromscheitelwerte mit unseren Resultaten. Fig. 45 zeigt einen solchen Vergleich. Die Häufigkeitskurve für die Stromscheitelwerte der Abwärtsblitze aus Fig. 26 und 27 (positive und negative zusammengenommen) wurden in eine Prozent-Darstellung umgezeichnet und den Messungen verschiedener Autoren [16; 17; 18] an Freileitungen gegenübergestellt.

7.2 Scheitelwert des Stromes

Der Scheitelwert des Stromes ist massgebend für den Höchstwert des Ohmschen Spannungsabfalles längs einer Strombahn. Als Ohmscher Widerstand in der Bahn des Blitzstromes spielen vor allem die Erdungswiderstände eine Rolle. Der Spannungsabfall am Erdungswiderstand kann in elektrischen Anlagen oder auf Leitungsmasten zu Rücküberschlägen führen, besonders im Gebirge, wo tiefe Erdungswiderstände oft nur mit unverhältnismässig grossem Aufwand erreicht werden können. Beim Gebäudeblitzschutz führt der Spannungsabfall am Erdwiderstand zur Forderung, dass Wasserleitungen oder andere Leiter, die aus der neutralen Umgebung in das Gebäude einlaufen, mit der Blitzschutzanlage zu verbinden sind, da sonst zwischen den beiden Leitungssystemen gefährliche Spannungen auftreten.

Die auf dem Monte San Salvatore gemessenen Höchstwerte der Stoßströme sind nicht grösser als bisher bekannte Messwerte. Die statistischen Untersuchungen zeigen dazu, dass die Höchstwerte nur relativ selten auftreten. Störungen durch Blitzströme von 100...200 kA Scheitelwert sind also durchaus möglich, doch die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens ist sehr gering.

Im weitern kann der Ohmsche Spannungsabfall eine Rolle spielen, wenn ein Teil des Blitzstromes über den Mantel eines Nachrichten- oder Signalkabels fliesst. Dies kann z. B. bei Sendeanlagen im Gebirge, die nur mit einer relativ schlechten Erdung versehen sind, häufig vorkommen. Der Spannungsabfall an der Innenhaut des Kabelmantels erscheint dann am Kabelende als Längsspannung. Ist die Dauer des über den Mantel fliessenden Stromimpulses lange genug, dass sich der Strom praktisch gleichmässig über den ganzen Mantelquerschnitt verteilt, ergibt sich diese Spannung aus der Stromstärke und dem Gleichstromwiderstand des Mantels. Bei kürzeren Stromimpulsen wird sie kleiner, da wegen des Stromverdrängungseffektes die inneren Partien des Mantels eine geringere Stromdichte aufweisen als die äussere. Das Eindringen des Stromes in den Mantel ist von einer für den betreffenden Mantel charakteristischen Zeitgrösse abhängig, die durch den folgenden Ausdruck gegeben ist:

$$T_E = \frac{\mu}{\varrho} \cdot \frac{d^2}{4}$$

μ absolut magnetische Permabilität des Mantel-Materials [H/m]
ϱ spezifischer Widerstand des Mantel-Materials [Ωm]
d Dicke des Mantels [m]

Ist die Dauer des Stromimpulses wesentlich grösser als die Zeit T_E, so wird sich der Strom praktisch gleichmässig über den Mantel verteilen, und die Längsspannung ist proportional zum Momentanwert des Stromes. Ist die Dauer des Strom-Impulses wesentlich kleiner als T_E, so kommt nur ein Bruchteil der der gleichmässigen Verteilung entsprechenden Stromdichte an die Innenhaut. Es entsteht dann ein Längsspannungsimpuls, dessen Scheitelwert nicht mehr zum Stromscheitelwert, sondern im Grenzfall zu der durch den Stromimpuls geführten Ladung proportional ist. Für einen 2 mm dicken Bleimantel wird $T_E = 6$ µs. Bei einem normalen Stoss mit 100 µs Halbwertdauer wird sich der Strom praktisch gleichmässig über den Mantel verteilen. Für einen 5 mm dicken Kupfermantel wird $T_E = 0{,}5$ ms. Normale Blitzstromstösse werden hier nur noch mit einem Bruchteil eindringen. Bei den relativ langdauernden positiven Stössen wird aber die dadurch bedingte Reduktion der Längsspannung schon nicht mehr bedeutend sein. Bei speziellen Kabelmänteln mit einer Eisenlage zwischen zwei Kupferschichten kann T_E bis etwa 1/10 s betragen, falls nicht Sättigung des Eisens auftritt, so dass nur noch langdauernde kontinuierliche Ströme voll in den Mantel eindringen. Solche kontinuierliche Ströme kommen anschliessend an Stösse auch in den Abwärtsblitzen vor. (Vergl. Tabelle IV und Fig. 32). Beim erwähnten Beispiel einer Sendestation im Gebirge sind aber auch die Aufwärtsblitze zu berücksichtigen.

7.3 Die Steilheit der Stossfront

Die Steilheit der Stossfront ist massgebend für die induktiven Spannungsabfälle in den blitzstromführenden Leitern. Diese können schon auf gestreckten Leitern erhebliche Werte annehmen. Die Induktivität eines solchen Leiters beträgt etwa 1,5 µH/m, so dass bei einer Frontsteilheit von z. B. 50 kA/µs ein Spannungsabfall von etwa 75 kV/m auftritt. Die Spannung an einem gestreckten Leiter kann also im Grenzfall die Luftdistanz von 1/10 der Leiterlänge bereits überschlagen, wenn der Leiter vom vollen Blitzstrom durchflossen wird. Beim Gebäudeblitzschutz ist es daher wichtig, dass den Ableitdrähten in geringem Abstand parallel liegende Leiter, wie z. B. Armierungseisen, oben und unten mit der Blitzschutzanlage verbunden sind und somit an der Stromführung beteiligt werden.

Bei einem Leitungsmast von beispielsweise 40 m Höhe dürfte die Induktivität ca. 15 µH betragen. Damit ein Rücküberschlag über die etwa 1 MV haltende Isolation einer 220-kV-Leitung auftreten kann, muss also die Frontsteilheit des über den Mast abfliessenden Blitzstromes etwa 70 kA/µs betragen. Es ist noch hervorzuheben, dass eine grosse Frontsteilheit nicht unbedingt mit einem hohen Stoßstrom verbunden sein muss. Die grössten Frontsteilheiten treten bei den Folgestössen auf, die Stromwerte von 50 kA kaum übersteigen.

7.4 Vom Blitzstrom geführte Ladung

Die Höhe der vom Blitzstrom geführten Ladung ist für den Energieumsatz massgebend, falls die Spannung unabhängig vom Strom konstant gehalten wird. Dies ist z. B. bei den spannungsabhängigen Widerständen in Überspannungsableitern annähernd der Fall. In grober Annäherung trifft es vielleicht

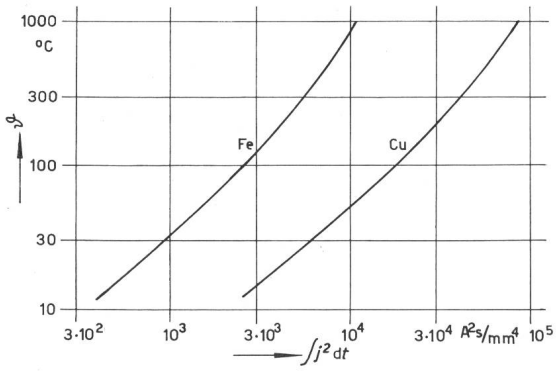


Fig. 46

Erwärmung von Kupfer- und Eisenleitern beim Durchfluss eines Blitzstromes

ϑ Erwärmung; $\int j^2 dt$ Zeitintegral der Stromdichte im Leiter während des Blitzstromdurchflusses

auch bei den Funkenbahnen zu, so dass deren Sprengwirkung einigermassen zur durchgeflossenen Ladung proportional ist.

Auf die Bedeutung der Ladung kurzer Stösse für die in Kabeln auftretenden Längsspannungen wurde bereits unter 7.2 hingewiesen.

7.5 Zeitintegral des Stromquadrates

Das Zeitintegral des Stromquadrates ist für den Energieumsatz in Leitern mit konstantem Ohmschen Widerstand verantwortlich. Betrachtet man die Erwärmung eines metallischen Leiters, so ist allerdings der Ohmsche Widerstand von der Temperatur abhängig, und daher nicht konstant. Für die Beziehung zwischen der Erwärmung (ϑ) und dem Zeitintegral des Stromdichtequadrates gilt dann die folgende Formel:

$$\int j^2 \, dt = \frac{1}{q^2} \int i^2 \, dt = 4{,}19 \cdot 10^{-4} \frac{\gamma c}{\alpha \varrho_0} \ln (1 + \alpha \vartheta)$$

q Leiterquerschnitt [mm²]
γ Dichte des Leitermaterials [g/cm³]
c spezifische Wärme des Leitermaterials [cal/g]
ϱ_0 spezifischer Widerstand des Leitermaterials bei Anfangstemperatur [Ωcm]
α Temperaturkoeffizient des spez. Widerstandes [1/°C]
ϑ Erwärmung [°C]

In Fig. 46 ist die Erwärmung in Funktion des Zeitintegrals der Stromdichte für Kupfer und Eisen eingetragen. Nimmt man die obere Grenze für das $\int i^2 dt$ bei positiven Blitzen zu 10^7 A²s an, (der grösste Messwert liegt bei $5 \cdot 10^6$ A²s, doch konnte der kräftigste Blitz wegen Überschlag zwischen Blitzantenne und Turmstruktur nicht voll ausgewertet werden), so ergibt sich daraus, dass zwei parallele Eisendrähte mit 6 mm Durchmesser, d. h. zusammen 56 mm² Querschnitt, wie sie die schweizerischen Leitsätze für Blitzschutzanlagen (Publ. 0113 des SEV) als minimale Ableitung für Gebäudeblitzschutzanlagen vorsehen, eine Erwärmung von max. 140 °C erleiden können. Bei Kupfer würde für die gleiche maximale Erwärmung schon ein einzelner Draht von 5,2 mm Durchmesser genügen. Man sieht daraus, dass die schweizerischen Blitzschutzanlagen auch dem seltenen Falle eines extrem starken Blitzes gewachsen sind.

Im weiteren ist das Zeitintegral des Stromquadrates auch für die elektrodynamischen Wirkungen des Blitzstromes massgebend. Die elektromechanische Kraft K ist zum Quadrat des Stromes proportional. Da die zu bewegenden mechanischen Systeme, gemessen an der Dauer der Stoßströme, sehr träge sind, d. h. eine langsame Eigenschwingung aufweisen, ist der Impuls $\int K dt$ für die mechanische Wirkung massgebend. Elektrodynamische Verformungen spielen daher bei den Blitzschäden eine untergeordnete Rolle.

8. Schlussbemerkungen

Der Arciconfraternità della Buona Morte ed Orazione sotto il titolo di Santa Marta, Lugano sind die Autoren dankbar, dass sie den Photoraum in der Kirche und das Gebäude mit den Mess- und Wohnräumen zur Verfügung gestellt hat. Ferner sei dem Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung in der Schweiz gedankt, dass er die Anschaffung des Spezial-KO, von vier Photoapparaten mit bewegtem Film und einigem Zubehör ermöglicht hat.

Bei den beschriebenen Messungen hat in erster Linie der Betreuer der Mess-Station, *H. Binz,* dafür gesorgt, dass die Mess- und Photoeinrichtungen jederzeit aufnahmebereit waren, und dass diese Einrichtungen laufend verbessert werden konnten. Diese Arbeit ist grösser, als sie von Fernstehenden eingeschätzt wird; sie fordert Tag- und Nachtbereitschaft und ein grosses Interesse an der Forschung. *H. Binz* gebührt dafür Dank und Anerkennung. Für gelegentliche Mitarbeit danken sodann die Autoren den Assistenten des Hochspannungslaboratoriums der ETH.

Literatur

[1] *Berger, K.:* Die Messeinrichtungen für die Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 46(1955), S. 193...201.

[2] *Berger, K.:* Resultate der Blitzmessungen der Jahre 1947...1954 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 46(1955), S. 405...424.

[3] *Berger, K.:* Gewitterforschung auf dem Monte San Salvatore. ETZ A 82(1961), S. 249...260.

[4] *Berger, K.:* Front Duration and Current Steepness of Lightning Strokes to the Earth. Proceedings of on International Conference of the Gas Discharges and Electricity Supply Industry held at the Central Electricity Research Laboratories, Leatherhead, Surrey, England, 7th...11th May 1962.

[5] *Commission Electrotechnique Internationale:* Essai à haute tension. Publication 60, deuxième édition, Genève 1962.

[6] *Ambrosetti, F., Bider M.* und *Bonet M.:* L'orage en Suisse. Archiv Meteorol. Geophys. Bioklimatol. B 8(1957), S. 172...184.

[7] *Kähler, K.:* Elektrizität der Gewitter. Bornhaeger Berlin 1924.

[8] *McEachron, K. B.:* Lightning to the Empire State Building. Trans. AIEE 60(1941), S. 885...889.

[9] *Hagenguth, J. H.* und *Anderson, J. G.:* Lightning to the Empire State Building. Trans. AIEE III 71(1952), S. 641...649.

[10] *Wagner, C. F.* und *Hileman, A. R.:* Lightning Storke II. Trans. AIEE III 80(1961), S. 622...642.

[11] *Schonland, B. F. J.:* The Lightning Discharge. Handbuch der Physik. Bd. 22. Springer Berlin 1956, S. 576...628.

[12] *Schonland, B. F. J., Malan, D. J.* und *Collens, H.:* Progressive Lightning. Proc. Royal Soc. London A 152(1935), S. 595...625.

[13] *McEachron, K. B.:* Phenomena of Lightning: J. Western Soc. Engrs. 47(1942), S. 43...58.

[14] *Wolf, F.:* Gewitter. Physik. Bl. 17(1961), S. 501...512.

[15] *Golde, H. R.:* Theoretische Betrachtungen über den Schutz von Blitzableitern. ETZ A 82(1961), S. 273...277.

[16] *Sporn, Ph.* und *Gross, I. W.:* Lightning Currents in 132 kV Lines. Trans. AIEE 56(1927), S. 245...252.

[17] *Baatz, H.:* Blitzschlagmessungen in Freileitungen. ETZ 72(1951), S. 191...198.

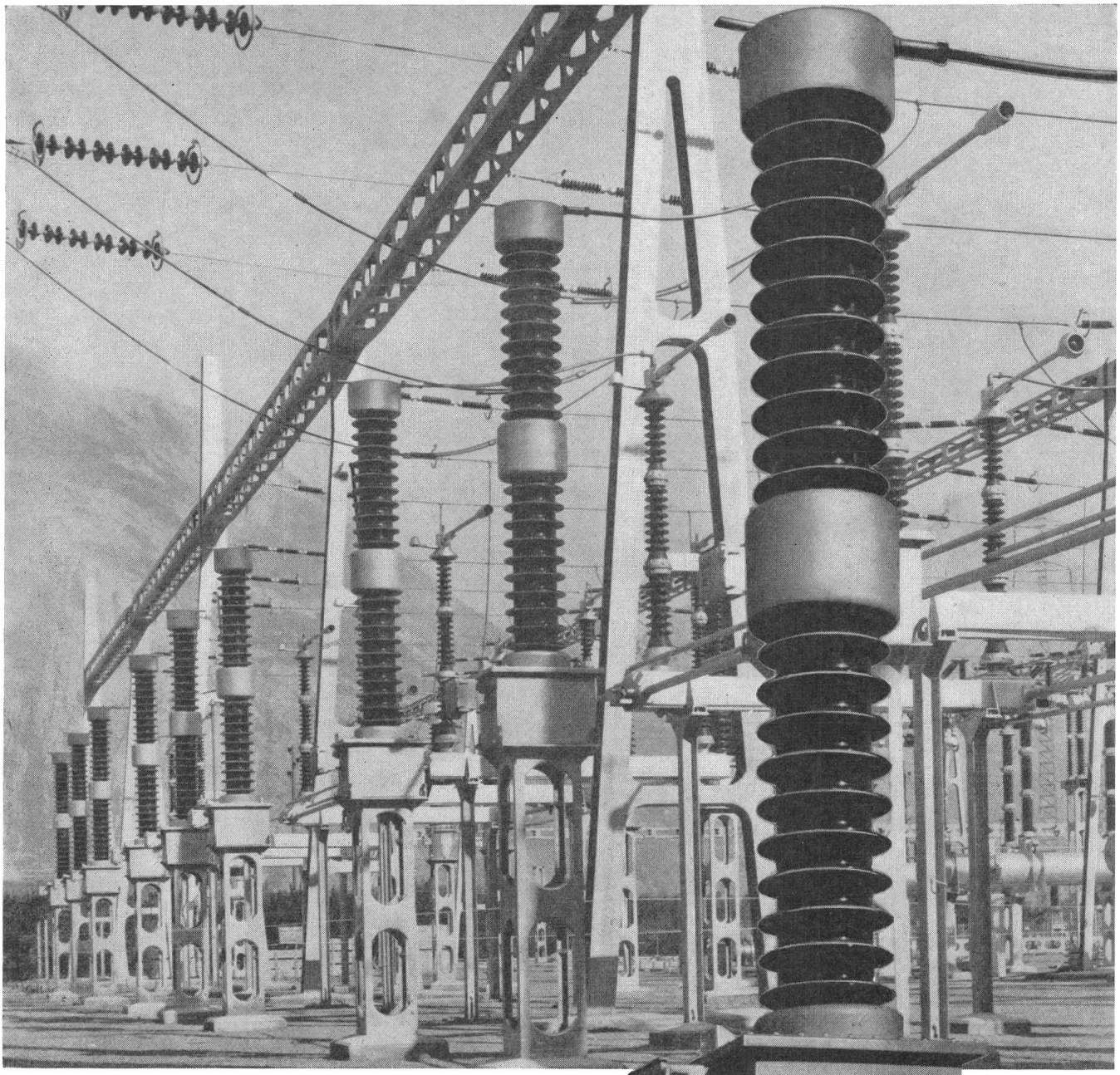
[18] *Golde, R. H.:* Lightning Surges on Overhead Distribution Lines caused by indirect and direct Lightning Strokes. Trans. AIEE III 73(1954), S. 437...447.

Adresse der Autoren:

Prof. Dr. *K. Berger,* Versuchsleiter, und *E. Vogelsanger,* dipl. Ingenieur, Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), Seefeldstrasse 301, 8008 Zürich.

Fortsetzung auf Seite 35

Suite voir page 35



Kapazitive Spannungswandler

Nebst Tausenden von Kopplungskondensatoren sind bereits grosse Serien unserer kapazitiven Spannungswandler in Europa und Übersee in Betrieb. Nennspannung 73...750 kV. Nennkapazität 10000...2000 pF. Messleistung 200 VA, Klasse 0,5.

Bild oben: Kapazitive Spannungswandler vom Typ WP 300 R1 im Unterwerk von Chamoson (E.O.S.). 220 kV Betriebsspannung.

Verlangen Sie bitte zu Ihrer Dokumentation unseren Prospekt 106 SB

Micafil AG Zürich

Der Kolbenboden der neuen «Argenta» Super Lux-Lampe ist innenmattiert, der übrige Glasteil jedoch innenopalisiert. Dank dieser besonderen Ausführung strahlt sie am meisten Licht nach unten aus, sodass etwa 30% mehr gerichtetes Licht auf die Arbeitsfläche fällt als bei einer K-«Argenta»-Lampe der gleichen Wattstärke. Die «Argenta» Super Lux-Lampen können in den meisten nach unten offenen Leuchten verwendet werden. Sie eignen sich überall dort vorzüglich, wo besonders gutes Licht benötigt wird, wie zum Lesen, Schreiben, Nähen, Stricken, Basteln usw. «Argenta» Super Lux-Lampen gibt es für 220/230 Volt in 60, 100 und 150 Watt. Das neue Licht der Philips «Argenta» Super Lux-Lampe wird Sie überzeugen und begeistern. Sie erhalten diese Lampe im Elektro-Fachgeschäft.

PHILIPS

G3/64

Philips AG Zürich, Abt. Glühlampen