

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 63 (1972)

**Heft:** 24

**Artikel:** Methoden und Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano in den Jahren 1963-1971

**Autor:** Berger, K.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915768>

#### **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:** 13.01.2026

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

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)  
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

## Methoden und Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano in den Jahren 1963—1971

Von K. Berger

Der vorliegende Bericht bildet die Fortsetzung früherer Berichte über die Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore in den Perioden 1945...1954 und 1955...1963 (Blitzstrommessungen) [1]<sup>1</sup>), 1955 bis 1965 (Photographische Beobachtungen) [2] und über erste Nahfeldmessungen (1968) [3].

Im ersten Kapitel des nachstehenden Schlussberichtes werden die bis 1971 entwickelten und benützten Einrichtungen für die Messung des Blitzstromes und der Feldstärke bei Blitzschlägen beschrieben.

Das zweite Kapitel des Berichtes befasst sich mit der Auswertung der Ströme von 126 Abwärtsblitzen in die Messstürme auf dem Berg. Zu diesem Zwecke wurden zunächst die oszillographisch gemessenen Stromkurven aller Abwärtsblitze mit Hilfe eines Computers des ORL-Planungsinstitutes der ETH auf linearen Zeitmaßstab umgezeichnet und in einem «Atlas der Blitzströme» reproduziert. Sodann erfolgte auf Grund einer detaillierten Auswertung aller Blitzstrom-Oszillogramme eine statistische Darstellung aller charakteristischen Daten der Blitzströme, wie Scheitelwert, Steilheit des Anstiegs, Ladung, Energie-Impuls, Dauer des Stromes und Strom-Intervalle auf Wahrscheinlichkeitspapier. Drittens sind auch die Korrelationen einzelner charakteristischer Größen anhand graphischer Darstellungen auf Grund der Wahrscheinlichkeitstheorie dargestellt worden. Eine Fourier-Frequenzanalyse wurde an zwei Oszillogramm-Beispielen durchgeführt.

Verlauf und Grösse des elektrischen Feldes vor und während Blitz-einschlägen in den Berg wie auch die gleichzeitigen Feldsprünge in der Umgebung des Berges werden in einem zweiten Aufsatz beschrieben, ebenso die Folgerungen aus den gesamten Forschungsergebnissen bezüglich des Blitzschutzes von Personen und Sachen.

### 1. Beschreibung der Messeinrichtungen für die Blitzforschung der Jahre 1963...1971

#### 1.1 Einrichtungen für die Messung des Blitzstromes

Mit kleinen Ergänzungen wurden die gleichen Einrichtungen benutzt wie in der vorangehenden Periode 1955...1963 [1]<sup>1</sup>). Das Gesamtschema der Strommessungen zeigen die Fig. 1 und 2, Fig. 1 nämlich die Einrichtung auf jeder Turmspitze, Fig. 2 die gesamten Einrichtungen im Faraday-Käfig des Messraums im sog. «Antico Albergo». Der Übersichtlichkeit halber wurden nur die Einrichtungen pro Turm skizziert. Die Erklärung der Schemata ist in den ausführlichen Legenden gegeben. Für beide Türme zusammen sind für die Strommessung 8 Meßschleifen des Schleifenoszillographen (SO) und zwei Zweistrahlg-Kathodenstrahl-Oszillographen-Röhren (KO) verfügbar. Zwei weitere kleine Einstrahl-KO dienen der Messung des Feldverlaufes im Turm 1 und der Aufzeichnung der Zeitmarkierung. Diese

Le présent rapport sur l'étude de la foudre au Monte San Salvatore fait suite à ceux des périodes de 1945 à 1954 et de 1955 à 1963 (Mesures des courants de foudre) [1]<sup>1</sup>), de 1955 à 1965 (Observations photographiques) [2] et sur les premières mesures de champ rapproché (1968) [3].

Dans le premier chapitre du rapport final ci-après, on décrit les équipements mis au point et utilisés jusqu'en 1971 pour la mesure du courant de foudre et de l'intensité du champ lors d'impacts.

Le deuxième chapitre concerne l'interprétation des courants de 126 éclairs descendants dans les tours de mesure de la dite montagne. Les courbes des courants de tous ces éclairs, mesurées oscillographiquement, ont été tout d'abord converties à une échelle linéaire des temps, à l'aide d'un calculateur électronique de l'Institut de planification ORL de l'EPFZ, puis reproduites sous forme d'un Atlas des courants de foudre. En se basant sur une interprétation détaillée de tous les oscilloscopes, on a représenté statistiquement toutes les caractéristiques des courants de foudre, telles que valeur de crête, raideur de montée de charge, impulsion d'énergie, durée du courant et intervalles de courant, sur un papier de probabilité. En outre, les corrélations de différentes grandeurs caractéristiques ont été représentées graphiquement d'après la théorie de la probabilité. Une analyse de Fourier des fréquences a été effectuée pour deux exemples d'oscilloscopes.

Le déroulement du champ électrique avant et pendant les impacts sur la montagne, aussi bien que les sauts de champs simultanés dans les environs seront décrit dans un deuxième article, de même l'application de l'ensemble des résultats de recherche à la protection de personnes et de choses contre la foudre.

insgesamt 6 Größen werden vom KO auf einem 12 cm breiten und 1 m langen Photopapier derart registriert, dass mit Hilfe einer zusätzlichen raschen Zeitablenkung auch die raschen Blitzstrom-Veränderungen erfasst werden können. Der SO erfasst seinerseits die langdauernden Blitzstrom-Komponenten sowie mit Hilfe einer Speicherschaltung die positiven und negativen Scheitelwerte des Blitzstrom-Impulses.

In den Feldstärke-Oszillogrammen wurden während der Berichtsperiode zwei neue Bereiche für die Messung kleiner Vorströme des Blitzes eingeführt, die vor der Auslösung der Blitzoszillogramme, d. h. vor dem Erreichen von ca. 7 A Blitzstrom auftreten (Ansprechen der Funkenstrecke FH in Fig. 1). Der erste Zusatzbereich umfasst Ströme bis 7 mA, der zweite Ströme bis 1 A. Da diese Ströme vor dem Ansprechen der Funkenstrecke FH, d. h. vor der Auslösung der Blitzstrom-Oszillogramme fließen, müssen sie in gleicher Weise wie die Oszillogramme des Feldverlaufes vor dem Blitzeinschlag ge-

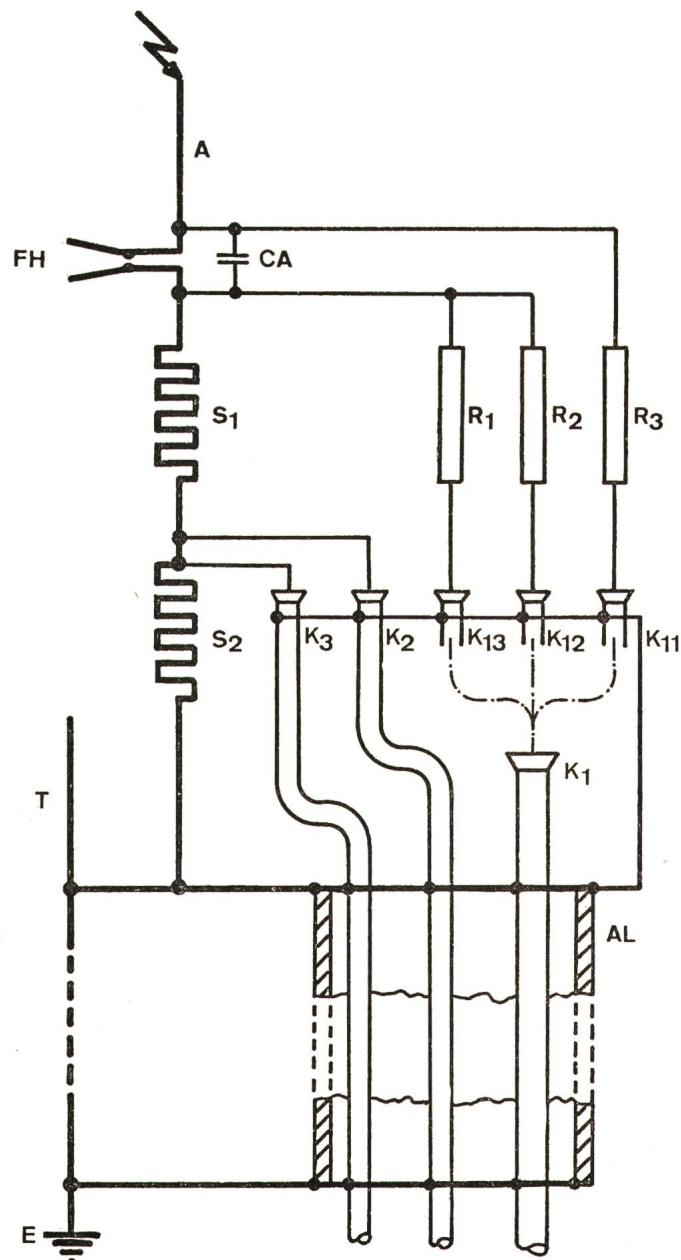
<sup>1</sup>) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

<sup>1</sup>) Voir la bibliographie à la fin de l'article.

speichert werden. Wie dies geschieht, wird in Abschnitt 2 beschrieben. Die Aufzeichnung dieser kleinen Ströme auf dem gleichen Photostreifen mit dem Feldverlauf erlaubt die genaue zeitliche Zuordnung von Vorstrom und Feld.

### 1.2 Einrichtungen für die Messung des Feldverlaufes beim Blitz einschlag

Eine erste Feldmühle klassischer Bauart wurde im Sommer 1967 am Turm 1 eingebaut und an der südöstlichen Turmkante in ca. 18 m Höhe über dem Boden in Betrieb genommen (Fig. 3). Sie besteht aus 24 Segmenten auf einer Platte, die mit knapp 3000 U./min oder knapp 50 U./s rotiert (Synchrondrehzahl 3000/min). Daraus resultiert eine Grenzfrequenz von knapp 1200/s. Diese Feldmühle wurde im Bericht Nr. 33-03 der Cigré 1968 [3] samt einigen ersten Resultaten beschrieben. Sie funktioniert seither gut, hat aber den Nachteil eines starken sirenentartigen Geräusches, das ihre Anwendung in bewohnten Gebieten stark beschränkt. Für Feldmessungen in der Umgebung von Lugano musste eine Lösung gefunden werden, welche diesen Nachteil vermeidet und welche wenn möglich auch eine höhere Grenzfrequenz als 1200/s aufweist.



Mit der finanziellen Unterstützung durch den Schweizerischen Nationalfonds für wissenschaftliche Forschung konnte dann nach einem Vorschlag von E. Vogelsanger eine neuartige Feldmühlen-Konstruktion gefunden werden, deren Prinzip in den Fig. 4 und 5 kurz beschrieben wird. Eine ausführliche Darstellung ist an anderer Stelle vorgesehen.

Fig. 4 stellt die Ladungen  $Q$  der Messplatten von 2 Feldmühlen dar, deren Meßsegmente um eine halbe Periodendauer  $T/2$  verschoben sind. Daraus ist ersichtlich, dass bei der Addition der Ladungen der Meßscheiben mit der Umdrehungszeit  $T$  (von 2 um  $T/2$  verschobenen Feldmühlen) eine konstante Summe  $Q_1 + Q_2$  resultiert. Die gesamte Ladung der exponierten Fläche ist daher jederzeit nur von der elektrischen Feldstärke  $E$  abhängig, nicht von ihrer zeitlichen Änderung.

$$Q = Q_1 + Q_2 = \text{Konst.} \times E$$

Das gleiche gilt für jede gerade Anzahl  $n$  von Feldmühlesegmenten einer einzigen Messplatte, die um  $T/2n$  verschoben sind und wobei gleichzeitig alle geraden oder ungeraden Segmente dem atmosphärischen Feld exponiert werden. Grundsätzlich bleibt die Summe der exponierten Flächen dabei stets konstant.

In theoretischer Beziehung wären solche Feldmühlen somit für die Erfassung eines beliebigen Frequenzbereiches von 0 bis  $\infty$  geeignet. Praktisch haftet aber allen diesen Feldmühlen ein Mangel an, der grundsätzlich derselbe ist wie bei Feldmessungen an Antennen: Die über die hochwertige Isolation der Antenne oder der Messplatte fliessenden Isolationsströme bewirken, dass bei einer langdauernden konstanten atmosphärischen Feldstärke die Messplatte eine mittlere Spannung gegen

Fig. 1  
Einrichtungen auf jedem der beiden Messtürme  $T_1$  und  $T_2$

$A$	Blitzantenne
$FH$	Funkenstrecke
$CA$	Auslösekondensator $0,25 \mu\text{F}$ (Turm 1), $0,5 \mu\text{F}$ (Turm 2)
$S_1$	Mess-Shunt $0,8 \Omega$ (Turm 1), $0,56 \Omega$ (Turm 2), für langdauernde Blitzströme
$S_2$	Mess-Shunt $0,05 \Omega$ für Stoßströme (Turm 1 und Turm 2)
$R_1$	Messwiderstand zu SO-Schleife 300-A-Bereich, $4,5 \text{ k}\Omega$
$R_2$	Messwiderstand zu SO-Schleife 5000-A-Bereich, $7,0 \text{ k}\Omega$
$R_3$	Messwiderstand für Glimmstrommessung $0 \dots 10 \text{ mA}$ , $1 \text{ k}\Omega$
$T$	Turmstruktur
$K_1$	altes Messkabel, enthaltend die Koaxialadern $K_{11} \dots K_{13}$ zur Messung der langdauernden Ströme, zur Auslösung des Schleifenoszilloskopographen und zur Grundaufhellung des Kathodenstrahlloszilloskopographen (KO)
$K_2$	Wellmantelkabel zur Auslösung der raschen Zeitablenkung des Kathodenstrahlloszilloskopographen
$K_3$	Wellmantelkabel zur Messung der Stoßströme mit den Kathodenstrahlloszilloskopographen
$AL$	Aluminiumschutzrohr, bzw. Zoreskanal im Erdboden als äusserster Schirm
$E$	Erdung, bestehend aus den parallelgeschalteten Erdungsnetzen der Blitzmessstation, der PTT-Anlageerde, dem Erdungsnetz der Seilbahn anlage und dem Wasserleitungsnetz auf dem San Salvatore

Im Ruhestand ist die Blitzantenne durch das Funkenhorn (FH) von den Mess-Shunts getrennt. Kleine Glimmströme werden über  $R_3$  und  $K_{11}$  einem Registrier-Milliampèremeter zugeführt. Bei einem Antennenstrom von ca. 7 A wird der Spannungsabfall an  $R_3$  so hoch, dass die Ansprechspannung (10 kV) des Funkenhorns (FH) erreicht wird; dadurch wird die Antenne an die Mess-Shunts geschaltet. Der Spannungssprung an  $R_3$  dient gleichzeitig auch der Auslösung des Schleifenoszilloskopographen und der Grundaufhellung des Kathodenstrahlloszilloskopographen. Kurze Stromimpulse, entstanden durch Verschiebungsströme bei grossen Feldänderungen, werden im Auslösekondensator (CA) gespeichert, ohne dass eine Auslösung des Oszilloskopographen erfolgt. Das Schema bezieht sich sinngemäss auf die Einrichtung pro Messturm.

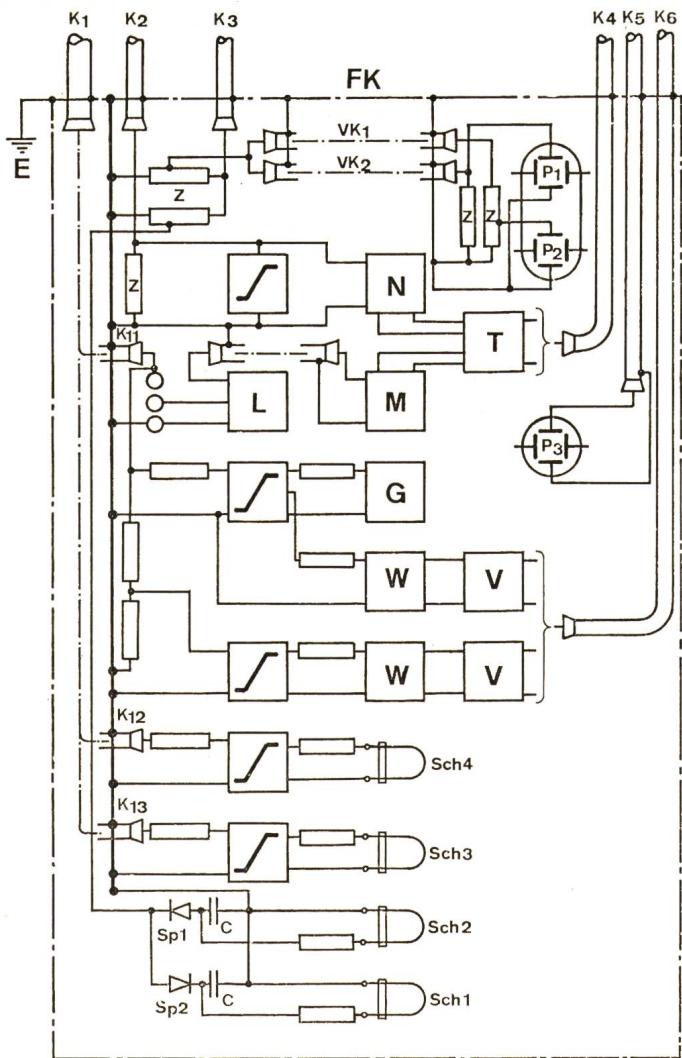


Fig. 2  
Messeinrichtungen im Blitzstrom-Messraum des «Antico Albergo»

<b>FK</b>	Faraday-Käfig
<b>E</b>	Erdung der gesamten Anlagen auf dem San Salvatore
<b>K<sub>1</sub>...K<sub>3</sub></b>	Zuleitungskabel vom Turm 1, nämlich: Altes Messkabel, enthaltend die Koaxial-Adern 11...13 für Strommessung durch den SO
<b>K<sub>1</sub></b>	Wellmantel-Koaxialkabel zur Auslösung der raschen Zeitablenkung des KO
<b>K<sub>2</sub></b>	Wellmantel-Koaxialkabel zur Messung von Stoßströmen mit dem KO
<b>K<sub>3</sub></b>	Verbindungskabel zum Messraum «Kirche» und zur Feldmühle Turm 1, nämlich: Fernsteuerkabel zum Messraum «Kirche» Wellmantel-Koaxialkabel zur Feldmühle Turm 1 PTT-Telephonkabel zum Messraum «Kirche»
<b>K<sub>4</sub>...K<sub>6</sub></b>	Zum Kathodenstrahlzosillographen gehörend: KO Messplatten für Bereiche 65 kA und 200 kA Messplatten für elektrische Feldmessung (nur an Turm 1), 18 m über Turmbasis 1
<b>P<sub>1</sub>P<sub>2</sub></b>	Verzögerungskabel
<b>P<sub>3</sub></b>	Abschlusswiderstände der Kabel
<b>VK<sub>1</sub>, VK<sub>2</sub></b>	Auslöselektronik für 1-s-Aufhellung (Grundaufhellung) des KO
<b>Z</b>	Auslöseelektronik für Zeitablenkung und Vollaufhellung des KO
<b>M</b>	Zum Schleifenoszillographen SO gehörend: Speicherschaltung zur Messung der positiven und negativen Stoßstrom-Maximalwerte bis 200 kA mit dem SO
<b>N</b>	Meßschleifen zur Messung der positiven und negativen Stoßstrom-Maximalwerte bis 200 kA mit dem SO
<b>Sch<sub>1</sub>, Sch<sub>2</sub></b>	Meßschleifen des SO zur Messung langdauernder Blitzströme der Strombereiche 300 bzw. 5000 A
<b>Sch<sub>3</sub>, Sch<sub>4</sub></b>	Auslöse-Einheit für SO-Schleifenbeleuchtung
<b>L</b>	Registrier-Milliampèremeter zur Messung kleiner Glimm- und Verschiebungsströme in der Blitzantenne
<b>G</b>	Frequenzmodulator zur Übertragung gemessener Glimm- und Verschiebungsströme der Bereiche 7 mA bzw. 1 A auf den Magnetspeicher der Feldmühlemes- sungen im Messraum «Kirche»
<b>W</b>	Linienverstärker für die frequenzmodulierte Übertragung
<b>V</b>	die stillstehende Messplatte MP mit 6 Segmenten zu je 60°, die rotierende Abschirmplatte oder Blende B, deren Aus- schnitt genau 2 gegenüberliegenden Meßsegmenten entspricht, der rotierende Permanent-Magnet NS, der stillstehende Ring R mit 6 Read-Relais als Schalter, die vom Magneten NS betätigt werden, der zweipolige Asynchron-Motor AM, eine Heizwicklung H zur Vermeidung von Tau.

Erde annimmt, weil erst dadurch im Mittel kein Ableitstrom mehr fliesst. Mit anderen Worten heisst dies, dass sich die Nulllinie der Feldoszillogramme verschiebt.

Dieser grundsätzlichen Schwierigkeit kann bei Feldmühlen dadurch abgeholfen werden, dass jedes Meßsegment im Moment der vollen Abschirmung (Punkte *T*, *2T* ... bzw.  $0,5T$ ,  $1,5T$  ... in Fig. 4) kurzzeitig an Erde gelegt wird. Da dieses Kurzschliessen an Erde selbst unter Anwendung rascherer Relais eine gewisse Zeit benötigt, muss diese Zeit bei der Konstruktion der Mühle berücksichtigt werden, indem innert der Periode *T* eine dritte Zeitstufe für die Segment-Erdung geschaffen wird.

Fig. 5 illustriert diesen Gedankengang. Die Periode *T* ist in 3 Teile *T/3* unterteilt. Ausser dem Anstieg (1. Drittel *Q<sub>1</sub>*) und dem Rückgang (2. Drittel *Q<sub>1</sub>*) ist ein drittes Drittel der Periode *T* vorgesehen, während der die Meßscheibe vollständig abgeschirmt ist und Spannung Null aufweisen sollte. Diese Nullspannung wird theoretisch durch mechanische Relais (Read-Relais) erzwungen, weil die ungenügende Plattenisolation sonst ein langsames Abweichen davon bewirken würde. Fig. 6 zeigt die neue Feldmühle im betriebsbereiten und im geöffneten Zustand.

Das Gesamtschema der 5 ausgeführten, auf diesem Prinzip beruhenden Feldmühlen für 3000 U./min ist in Fig. 7 aufgezeichnet. Auf einer gemeinsamen Achse sind folgende Teile angeordnet:

die stillstehende Messplatte MP mit 6 Segmenten zu je 60°,  
die rotierende Abschirmplatte oder Blende B, deren Aus-  
schnitt genau 2 gegenüberliegenden Meßsegmenten entspricht,  
der rotierende Permanent-Magnet NS,  
der stillstehende Ring R mit 6 Read-Relais als Schalter, die  
vom Magneten NS betätigt werden,  
der zweipolige Asynchron-Motor AM,  
eine Heizwicklung H zur Vermeidung von Tau.

Je zwei gegenüberliegende Segmente der Messplatte MP sind miteinander verbunden, ebenso ihre zwei zugehörigen Read-Relais am Ring R. Die Influenzladungen der Meßsegmente MP werden den Kondensatoren CL zugeführt, welche die Schwankungen der Messplattenkapazität ausgleichen sollen. Die Stellung des Ringes R mit den Schaltrelais wird relativ zur Abschirmplatte B so eingestellt, dass sie der Fig. 5 entspricht, d. h. dass jene Segmente von den Read-Relais geerdet werden, die sich vollständig unter dem vollen Teil von B befinden. Der Asynchron-Motor rotiert mit knapp 3000 U./min bzw. 50/s. Die Periodendauer *T* beträgt somit rund  $1/50$  s  $\approx$  10 ms, die Dauer der vollen Abschirmung («Null-Zeit») *T/3*  $\approx$  3,3 ms. Innert dieser Zeit muss jede Messplatte geerdet und wieder von Erde isoliert werden. Die Ladungen bzw. Spannungen der 6 Meßsegmente werden im Philbrick-Nexus-Verstärker Typ Q 103 U 5801 summiert ( $\Sigma$ ), verstärkt und als Summe über den Spannungsteiler *T* dem Messumformer W-V für die Übertragung nach dem San Salvatore zugeführt (Fig. 8).

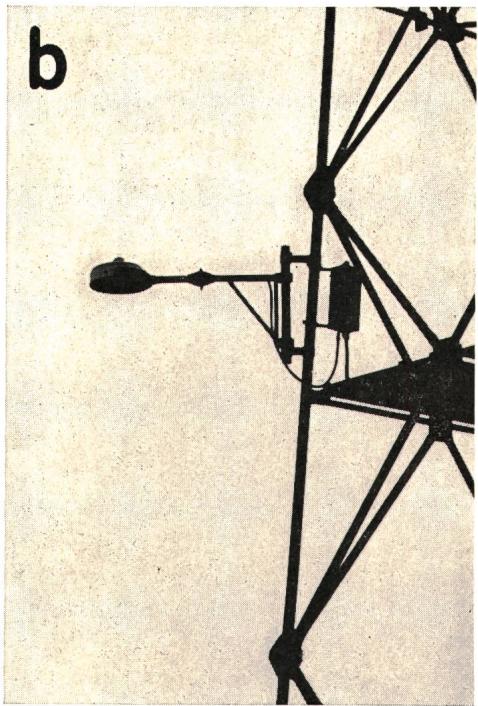
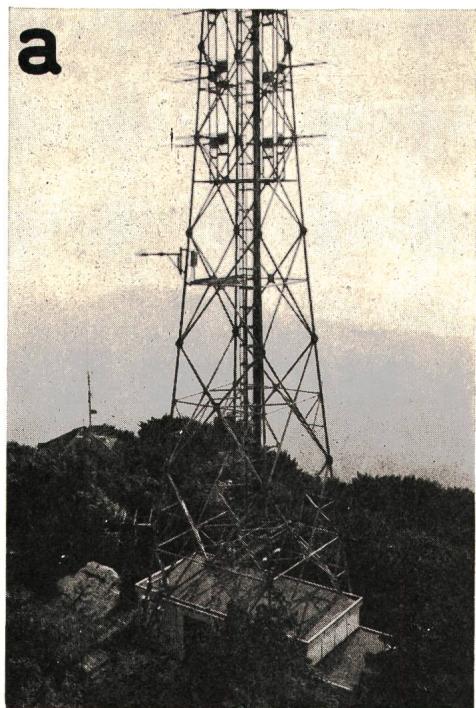


Fig. 3  
Messturm 1

- a Feldmühle 1967 an der SE-Turmflanke, am Turmfuss das Sendegebäude der PTT  
b Feldmühle 1967 an der Turmflanke («alte Feldmühle»), Grenzfrequenz 1200 Hz

Die übrigen Einrichtungen der Fig. 7 dienen der Eichung der Feldmühle mit positiver und negativer Eichspannung mittels der Parallelschaltrelais PR und der Eichrelais CR<sub>1</sub> und CR<sub>2</sub>, ferner der Aufzeichnung der Oszillogramm-Nulllinie durch Erdung der Meßsektoren über das Relais ER. Alle Relais werden über die Fernsteuerung FE vom San Salvatore aus ferngesteuert.

Die Übertragung der Feldmühlen-Messwerte nach dem San Salvatore und die zugehörigen Oszillographen im Mess-

raum «Kirche» sind sodann in Fig. 8 dargestellt. Die Beschreibung der Anordnung der neuen Feldmühlen an den vier Messstellen Agra – Gemmo – Pugerna – San Salvatore 2 wird im Bericht über die Feldmessresultate erfolgen, wo auch Bilder des Feldmühlen-Einbaus gegeben werden. Die Übertragung der veränderlichen Gleichspannungswerte im Ausgang der Feldmühlen nach dem Messgerät auf dem San Salvatore geschieht durch Modulation einer Trägerfrequenz von 13,5 kHz über die PTT-Telephonkabel des Netzes Lugano. Es konnten dafür nur nichtpupinisierte Kabelstrecken benutzt werden,

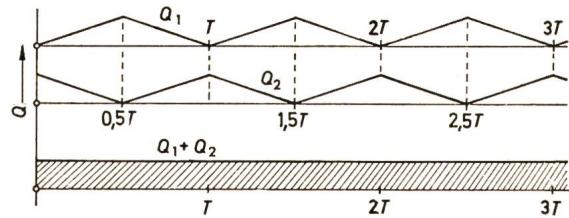


Fig. 4  
Schematische Darstellung einer kombinierten Feldmühle  
mit Addition zweier 180°-Meßsektoren, 180°-Öffnung und 180°-Abdeckung in der rotierenden Scheibe

$Q_1$  Influenzladung des 1. Sektors  
 $Q_2$  Influenzladung des 2. Sektors  
 $T$  Periodendauer

was die Auswahl der Messpunkte in südlicher Richtung beschränkte. Die modulierten Signale werden im Bandschreibergerät der Firma P. Klein in Tettnang auf einem Magnetband mit 7 Spuren gespeichert, und vor Ablauf des Bandumlaufes, der 5 s dauert, wieder gelöscht. Die demodulierten Meßsignale werden vom Schleifen-Oszillographen «Osz» in Fig. 8 aufgezeichnet, sobald dessen Lampe infolge eines Blitzeneinschlags in die Messstürme eingeschaltet wird. Dies geschieht durch den Trigger T (Fig. 2) über K 4 zum Steuergerät St in Fig. 8. Die Dämpfung der Übertragung entspricht den in Tabelle I aufgeführten Kabellängen. Sie bleibt für alle 3 auswärtigen Messpunkte in erträglichen Grenzen, wobei der Messpunkt Agra sich der Grenze der zulässigen Dämpfung nähert. Die höchstzulässige Frequenz für die Feldmessungen liegt bei ca. 4 kHz; sie ist in erster Linie durch die Meßschleifen des Oszillographen bedingt, in zweiter Linie durch die Trägerfrequenz von 13,5

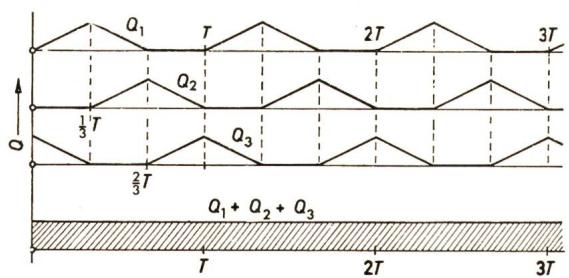


Fig. 5  
Schematische Darstellung einer kombinierten Feldmühle  
mit Addition dreier 120°-Meßsektoren mit 120°-Öffnung und 240°-Abdeckung in der rotierenden Scheibe  
«neue Feldmühle 1969»

$Q_1$  Influenzladung des 1. Sektors  
 $Q_2$  Influenzladung des 2. Sektors  
 $Q_3$  Influenzladung des 3. Sektors  
 $T$  Periodendauer

kHz, die nur unwesentlich höhere Messfrequenzen als 4 kHz zu übertragen erlaubt.

Alle «neuen» Feldmühlen werden ferngesteuert (FE in Fig. 7 und St in Fig. 8). Die Steuerung umfasst Ein- und Ausschalten des Motors, Wahl des Kanals für grössere oder kleinere Empfindlichkeit (Teiler T mit Umschalter Fig. 7), Parallelschalten der Platten für die Eichung (Relais PR und CR) und Erden der Platten (Relais ER) für die Aufzeichnung der Nulllinie der Oszillogramme. Die Eichung geschieht mit 2 aus der 50-Hz-Spannung herausgeschnittenen Gleichspannungen mit 2 verschiedenen Amplituden von + 6 V und - 4 V. Damit lässt sich in den Oszillogrammen auch die Polarität der gemessenen Spannungen kontrollieren. Die Fernsteuerung geschieht mit Hilfe dreier fester Frequenzen mit Filtern. Die Feldstärken werden auf dem Oszillographenpapier während ca. 1 s vor und ca. 1 s nach dem Blitzeinschlag aufgezeichnet, mit einem Papierzuschub von ca. 1 m/s bzw. 1 mm/ms.

Es ist natürlich auch möglich, die Feldkurven für irgend einen Blitz, der nicht in den San Salvatore einschlägt, aufzu-



Fig. 6

Bild der neuen Feldmühle, Typ 1969, entsprechend den Fig. 5 und 7

- a Ansicht von unten auf die zwei 60°-Sektoröffnungen
- b Feldmühle geöffnet

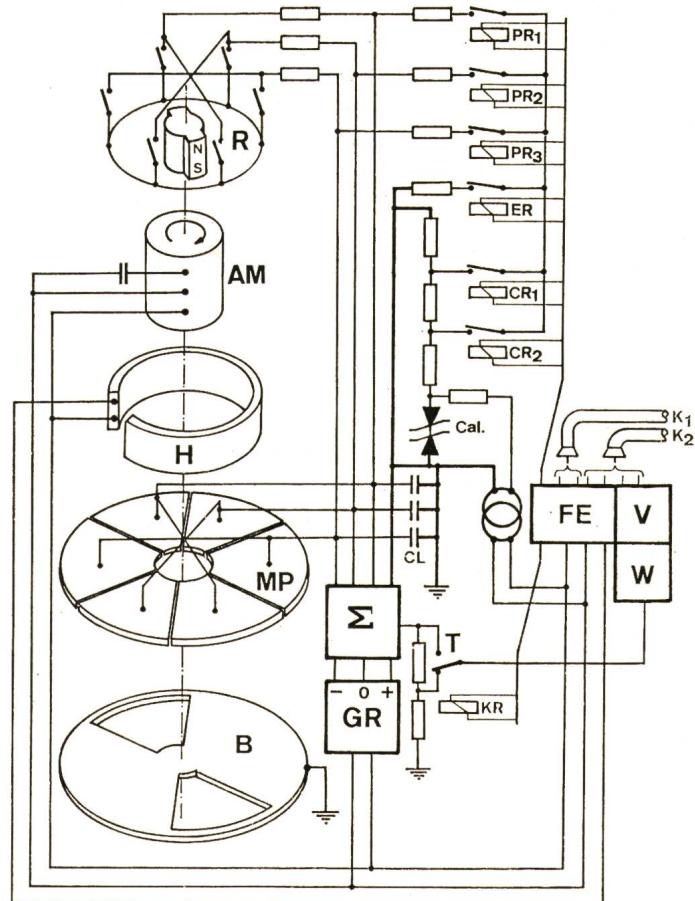
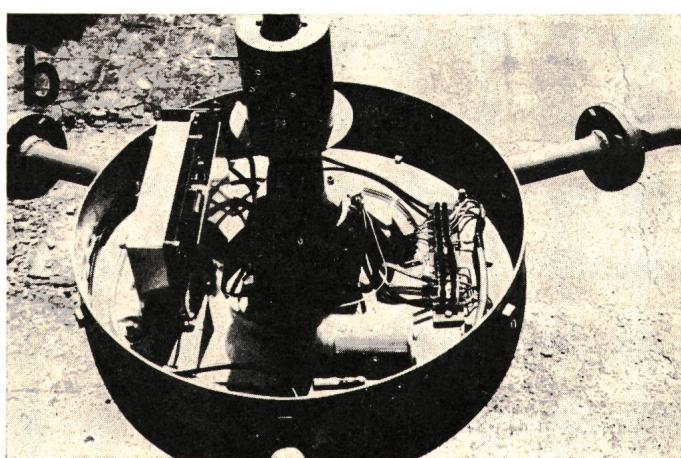


Fig. 7  
Schema der kombinierten Feldmühle («neue Feldmühle») samt Fernsteuerung FE für Antrieb, Eichung und Nulllinie, mit Messumformer W-V zur Übertragung

MP	Feldmess-Plattensegmente
B	Abschirmplatte (rotierende Blende)
AM	Asynchronmotor
R	Ring mit 6 Read-Relais
H	Heizung
GR	Speisegleichrichter, stabilisiert
$\Sigma$	Summationsverstärker, Nexus-Typ
CL	Belastungskapazität der Feldmühle
Cal	Eichspannungsquelle, stabilisiert mit Zener-Dioden
PR(1...3)	Parallelschaltrelais
ER	Erdungsrelais
CR(1,2)	Eichrelais
T	Spannungssteiler mit Umschalter
KR	Kanal-Wahl-Relais für zwei Empfindlichkeiten
FE	Fernsteuerempfänger und Messwert-Umformer
$K_1$	Speisekabel 200 V + 0 + E
$K_2$	PTT-Telephonkabel für Messwert-Übertragung



Übertragungskabel von den Feldmühlen-Aussenstationen zum San Salvatore

Tabelle I

Agra Luftdistanz 3,3 km	0,97 km von $\varnothing = 0,4$ mm Cu 2,76 km von $\varnothing = 0,6$ mm Cu 3,46 km von $\varnothing = 0,8$ mm Cu 4,13 km von $\varnothing = 1,0$ mm Cu <hr/> 11,32 km
Gemmo Luftdistanz 3,45 km	1,30 km von $\varnothing = 0,6$ mm Cu 0,19 km von $\varnothing = 0,8$ mm Cu 4,13 km von $\varnothing = 1,0$ mm Cu <hr/> 5,62 km
Pugerna Luftdistanz 2,5 km	4,53 km von $\varnothing = 0,6$ mm Cu 4,13 km von $\varnothing = 1,0$ mm Cu <hr/> 8,66 km

nehmen. Infolge der Speicherung über 5 s hat man genügend Zeit, den Auslöseknopf für den Papiervorschub des Oszillo-

graphen und für seine Lampe zu drücken, damit das Feldbild vor, während und nach dem Blitz oszillographisch aufgezeichnet wird.

## 2. Gewitter- und Blitzregistrierung

### 2.1 Anzahl Gewittertage und Gewitter-Registrierung

In gleicher Weise wie bei den früheren Berichten ist in Tabelle II die Anzahl der auf dem San Salvatore beobachteten Gewittertage pro Monat und Jahr und die Beobachtungsdauer in den einzelnen Jahren 1963...1971 wiedergegeben. Als Gewittertag (Isoceraunic level) wird ein Tag (0...24 Uhr) bezeichnet, an dem am Beobachtungsort mindestens einmal Donner gehört wurde. Fig. 9 gibt eine graphische Darstellung von Tabelle II.

Es ist offensichtlich, dass die Zahlen für den Berggipfel des San Salvatore grösser sind als sie z. B. in der Stadt Lugano gezählt wurden, da infolge des hohen Lärmpegels der Stadt entfernte Donner dort im Gegensatz zum Berg nicht gehört werden. Bekanntlich besteht heute in der Meteorologie der Wunsch, die Zählung der derart definierten Anzahl Gewittertage durch eine bessere Information über die Gewittertätigkeit zu ergänzen. Als Hilfsmittel dazu kommen vor allem «Blitzzähler» in Frage, welche die Anzahl der Blitze in einem Umkreis zählen, dessen Grösse ungefähr dem Hörbereich des Donners (ca. 20 km Radius) entspricht. Solche Zähler sind von der Arbeitsgruppe «Blitzzähler» der Cigré (Conférence Internationale des Grands Réseaux) seit Jahren verbreitet worden, so dass damit bereits weltweite Erfahrungen über die relative Häufigkeit von Blitzen in verschiedenen Gegenden der Erde bestehen [4].

Auf dem San Salvatore wurden zeitweise auch Blitzzähler verschiedener Art benutzt. Da aber die topographischen Verhältnisse auf dem Berg einen Vergleich mit der genormten Zählung in der Ebene unmöglich machen, wird auf die Wiedergabe solcher Zählungen verzichtet. Für die Registrierung der Gewitter hat sich auf dem San Salvatore die dauernde Aufzeichnung der Glimm- und Verschiebungsströme der Blitzantennen der Türme 1 und 2 (Instrument G in Fig. 2) sehr gut bewährt. Die bereits früher beschriebene, sehr einfache Einrichtung benutzt zur Blitzzählung die Feldstärke-Impulse, die der Blitz in seiner Umgebung verursacht. Wie beim Cigré-Blitzzähler kann eine scharfe Grenze für die Reichweite der Zählung nicht angegeben werden, da starke Blitze bis in grössere Entfernung gezählt werden als schwache. Die dauernde Registrierung der Anzahl Blitze bzw. Feldsprünge erlaubt die Beurteilung der Möglichkeiten einer Gewitterwarnung für blitzgefährdete Arbeitsstellen besser als die Messung der Feldstärke. Auf das Resultat einer solchen Untersuchung kann hier nicht eingegangen werden.

### 2.2 Anzahl der während der Berichtsperiode aufgenommenen Oszillogramme

Über die gesamte Anzahl aufgenommener und ausgewerteter Oszillogramme in den Jahren 1963...1971 orientiert Tabelle III. Insgesamt sind rund 1000 Messungen von Blitzströmen, nach Polarität und Vorwachsrichtung aufgeteilt, angeführt. Ein Teil dieser Blitze sind Mehrfachblitze, nämlich rund 240. Deren Verteilung auf die verschiedenen Jahre ist in Tabelle IV angegeben. Aus beiden Tabellen ist die Streuung der Messungen bzw. der Anzahl Blitzeinschläge über die Jahre ersichtlich, die innerhalb 1:3 bzw. 1:4 liegt. Die «oszillogrammreichen» Jahre

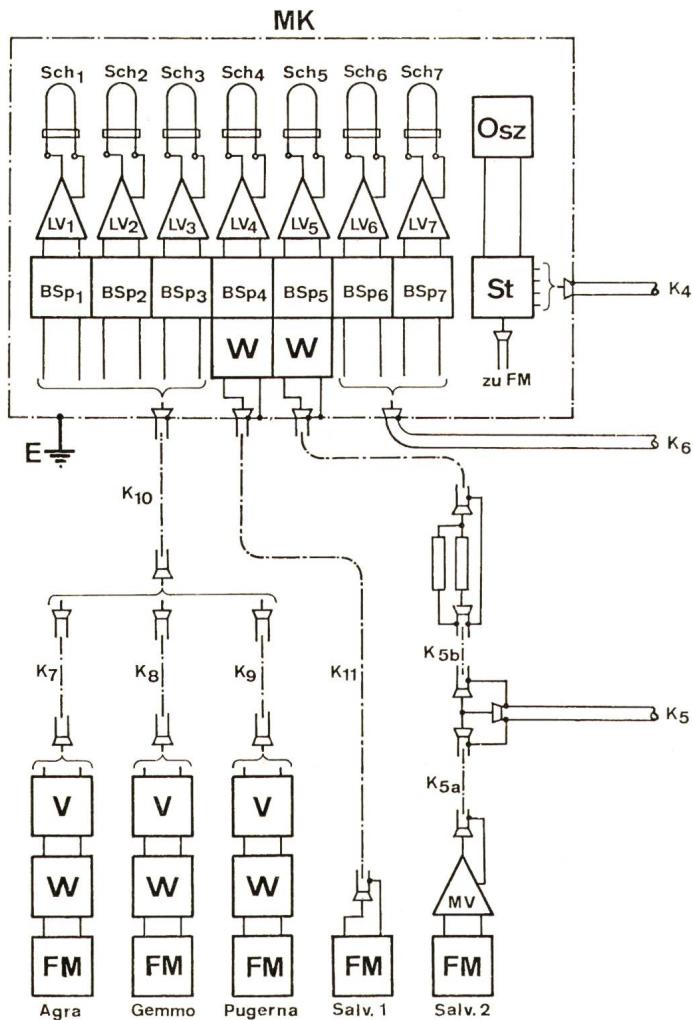


Fig. 8  
Blockschema der Feldmess-Einrichtungen

<b>MK</b>	Messraum «Kirche» San Salvatore
<b>FM</b>	Feldmühlen, Salvatore 1 = neue Feldmühle, Salvatore 2 = alte Feldmühle
<b>W</b>	Modulator zur Umwandlung der Messgrössen in ein frequenzmoduliertes Signal, welches störungsfrei über PTT-Telephonkabel übertragen werden kann
<b>V</b>	Linienverstärker
<b>MV</b>	Messverstärker der alten Feldmühle Salvatore 2 auf Turm 1
<b>BSp 1...7</b>	Magnetbandspeicher, 7 Spuren für 5 s
<b>LV 1...7</b>	Leistungsverstärker für SO-Schleifen
<b>Sch<sub>1</sub>...Sch<sub>4</sub></b>	Meßschleifen für neue Feldmühlen
<b>Sch<sub>5</sub></b>	Meßschleife für alte Feldmühle
<b>Sch<sub>6</sub>...Sch<sub>7</sub></b>	Meßschleifen für Glimmströme bis 7 mA bzw. 1 A
<b>ST</b>	Zeitsteuergerät für Funktionsablauf (Messung — Eichung — Nulllinie)
<b>Osz</b>	Schleifenoszilloskop
<b>K<sub>4</sub></b>	Fernsteuerkabel vom Messraum «Antico Albergo»
<b>K<sub>5</sub></b>	Koaxialkabel zum Messraum «Antico Albergo»
<b>K<sub>5a</sub></b>	Wellmantel Koaxialkabel zur Feldmühle, Turm 1
<b>K<sub>5b</sub></b>	Koaxialkabel zum Spannungsteiler und Bandspeicher
<b>K<sub>6</sub></b>	PTT-Telephonkabel zur Übertragung der Glimmstrom-Messwerte aus dem Messraum «Antico Albergo»
<b>K<sub>7</sub></b>	PTT-Telephonkabel ab FM Agra bis Zentrale Lugano, 3,73 km, $\phi$ 0,4/06 und 3,46 km, $\phi$ 0,8
<b>K<sub>8</sub></b>	PTT-Telephonkabel ab FM Gemmo bis Zentrale Lugano 1,49 km, $\phi$ 0,6/0,8
<b>K<sub>9</sub></b>	PTT-Telephonkabel ab FM Pugerna bis Zentrale Lugano, 4,53 km, $\phi$ 0,6
<b>K<sub>10</sub></b>	PTT-Telephon- und Musikkabel ab Zentrale Lugano bis Monte San Salvatore, 4,13 km, $\phi$ 1,0
<b>K<sub>11</sub></b>	Koaxialkabel der neuen Feldmühle auf dem Kirchendach San Salvatore zum Bandspeicher

Tabelle II

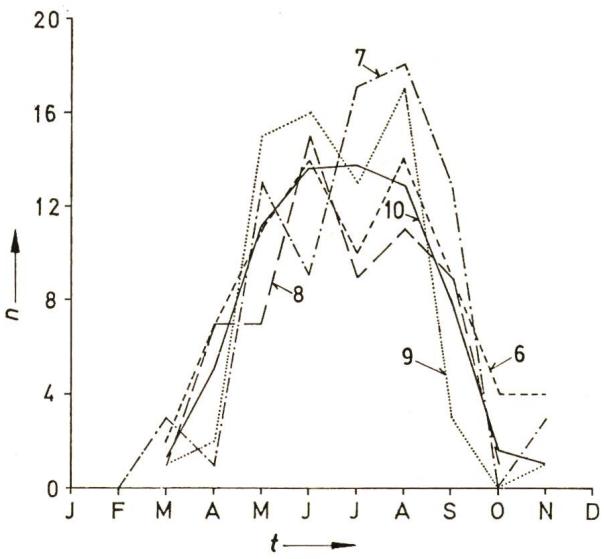
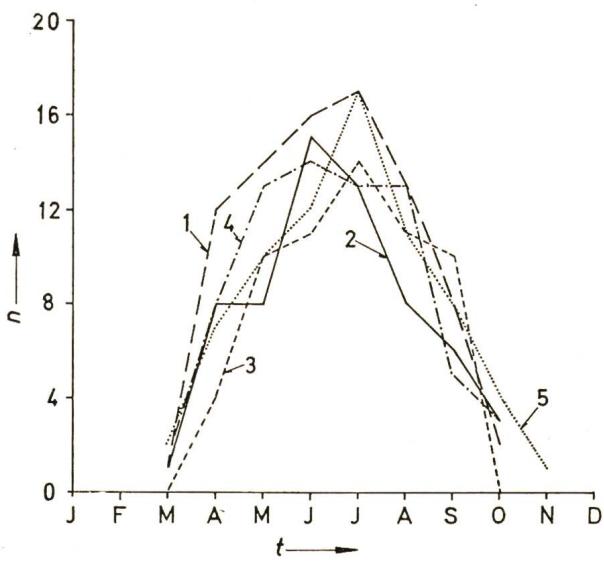
Anzahl Gewittertage (Isoceraunic Level) nach Beobachtungen auf dem Mte. San Salvatore 1963-1971

Jahr	Kurve (Fig. 9)	Monat März	Monat April	Monat Mai	Monat Juni	Monat Juli	Monat August	Monat September	Monat Oktober	Monat November	Total	Beobachtete Periode
1963	1	1	12	14	16	17	13	8	2	-	83	18. 3. bis 21. 10.
1964	2	1	8	8	15	13	6	3	-	-	62	23. 3. bis 4. 10.
1965	3	-	4	10	11	14	11	0	-	-	60	15. 4. bis 4. 10.
1966	4	1	8	13	14	12	12	5	3	-	68	17. 3. bis 21. 10.
1967	5	2	7	10	12	17	11	8	4	1	72	10. 3. bis 28. 11.
1968	6	2	7	11	14	10	14	9	4	4	75	26. 3. bis 26. 11.
1969	7	3	1	13	9	17	18	13	0	3	77	1. 3. bis 21. 11.
1970	8	1	7	7	15	9	11	9	1	-	60	6. 3. bis 2. 11.
1971	9	1	2	15	16	13	17	3	0	1	68	25. 3. bis 24. 11.
Durchschnitt:												
1963-1971	10	1,3	6,2	11,2	13,6	13,6	12,8	7,9	1,9	1	69,5	

Gesamte Anzahl aufgenommener Oszillogramme 1963-1971

Tabelle III

Jahr	↓ -	↑ -	↓ +	↑ +	Bipolar		Total
					↓	↑	
1963	22	83	3	5	1	4	118
1964	6	37	1	6	0	6	56
1965	3	91	1	15	0	8	118
1966	6	120	5	19	3	7	160
1967	12	90	9	26	0	13	150
1968	2	85	4	5	0	3	99
1969	3	38	2	6	1	2	52
1970	32	68	0	2	0	6	108
1971	20	120	2	18	0	5	165
1963 bis 1971	106	732	27	102	5	54	1026



Anzahl Gewittertage (isoceraunic level) nach den Beobachtungen auf dem Monte San Salvatore 1963...1971

Kurve 1...9 Gewittertage jeden Jahres 1963...1971  
Kurve 10 Mittelwert aller 9 Jahren Anzahl Gewittertage pro Monat  
t Bezeichnung der Kalendermonate

des San Salvatore decken sich nicht mit den gewitterreichen Jahren von Lugano und Umgebung, weil starke und lange Gewitter oftmals keinen einzigen Einschlag in den Berg liefern und andererseits selbst bei schwachen Gewittern mehrfach Einschläge in den Berg vorkommen.

Eine weitere Aufteilung der Blitz einschläge, nämlich nach der Anzahl Teilblitze im Gesamtblitz ist sodann in der Tabelle V gezeigt.

Eine andere Unterscheidung der Blitze ergibt sich aus ihrer Entstehung, d. h. ihrer Vorrwachrichtung. Aus dem zeitlichen Verlauf des Stromes in den Blitzstrom-Oszillogrammen kann in weitaus den meisten Fällen entschieden werden, ob es sich um einen Abwärtsblitz oder einen Aufwärtsblitz handelt. Die Definition aller Begriffe wird im folgenden Abschnitt gegeben.

Tabelle VI zeigt die Anzahl Abwärtsblitze in den Jahren 1963...1971 und die positiven und negativen Einfachblitze in ihrer Häufigkeit. Es darf angenommen werden, dass diese Abwärtsblitze, die sich in den Wolken bilden und von dort zur Erde herunterwachsen, in gleicher Weise auf Bergen und in der Ebene auftreten. Sie haben daher Interesse für alle topographischen Orte, sei es Berg, Abhang, Ebene oder See. Im Gegensatz dazu bilden sich Aufwärtsblitze nur an hohen Objekten, ganz besonders an Masten oder Türmen auf Hügeln oder Bergen. Tabelle VI zeigt, dass von insgesamt 1000 Blitz einschlägen in die beiden Messtürme auf dem San Salvatore nur

Anzahl Einfachblitze in Abwärtsblitzen 1963–1971

Tabelle VI

Jahr	Anzahl Abwärts-Blitze	Anteil Einfach-Blitze	Einfachblitze	
			Positive	Negative
1963	24	15	4	11
1964	7	4	1	3
1965	4	3	1	2
1966	13	12	7	5
1967	17	8	0	8
1968	5	4	2	2
1969	6	5	3	2
1970	30	19	0	19
1971	20	12	1	11
1963 bis 1971	126	82	19	63

126 von Abwärtsblitzen herrühren, das sind rund 13%. Die Streuung über die verschiedenen Jahre ist hier noch grösser, nämlich bis ca. 1 : 6.

### 3. Blitzstrom-Atlas

Die Strom-Oszillogramme aller Abwärtsblitze wurden mit Hilfe des Computers des Instituts für ORL-Planung der ETH auf eine lineare Zeitskala umgezeichnet, die in der Regel das Zeitintervall von 150 µs, bei langdauernden Blitzen 1500 µs umfasst. Auf diese Weise sind insgesamt 116 Abwärtsblitze samt ihren Folgeblitzen in ihrem zeitlichen Verlauf in einem «Blitzstrom-Atlas» zusammengestellt worden. Die Fig. 10 zeigt einige Beispiele aus diesem Atlas<sup>2)</sup>. Die Teilblitze von Mehrfachblitzen sind darin mit a-b-c- bezeichnet. Unter jedem Oszillogramm ist die Computernummer eingetragen, deren Ziffern der Reihe nach Minute, Stunde, Tag, Monat, Jahr, Oszillogrammnummer und Turmnummer T1 oder T2 enthält.

Zur Auswertung der Oszillogramme ist ebenso wie für die Beschreibung des Blitzen die genaue Festlegung der nötigen Begriffe erforderlich. Diese Begriffe sind nachstehend in möglichst enger Anlehnung an die im englischen Sprachgebrauch bereits bestehenden Definitionen aufgeführt und ergänzt worden.

<sup>2)</sup> Der «Blitzstrom-Atlas» kann von Interessenten gegen Kostenvergütung vom Autor bezogen werden.

Anzahl Oszillogramme von Mehrfachblitzen 1963–1971

Tabelle IV

Jahr	↓ −	↑ −	↓ +	↑ +	Bipolar		Total
					↓	↑	
1963	11	14	0	0	0	1	26
1964	3	8	0	0	0	3	14
1965	1	24	0	0	0	4	29
1966	1	27	0	2	1	2	33
1967	3	24	0	1	0	8	36
1968	1	20	0	1	0	1	23
1969	1	6	0	0	0	2	9
1970	13	15	0	0	0	4	32
1971	9	26	1	0	0	3	39
1963 bis 1971	43	164	1	4	1	28	241

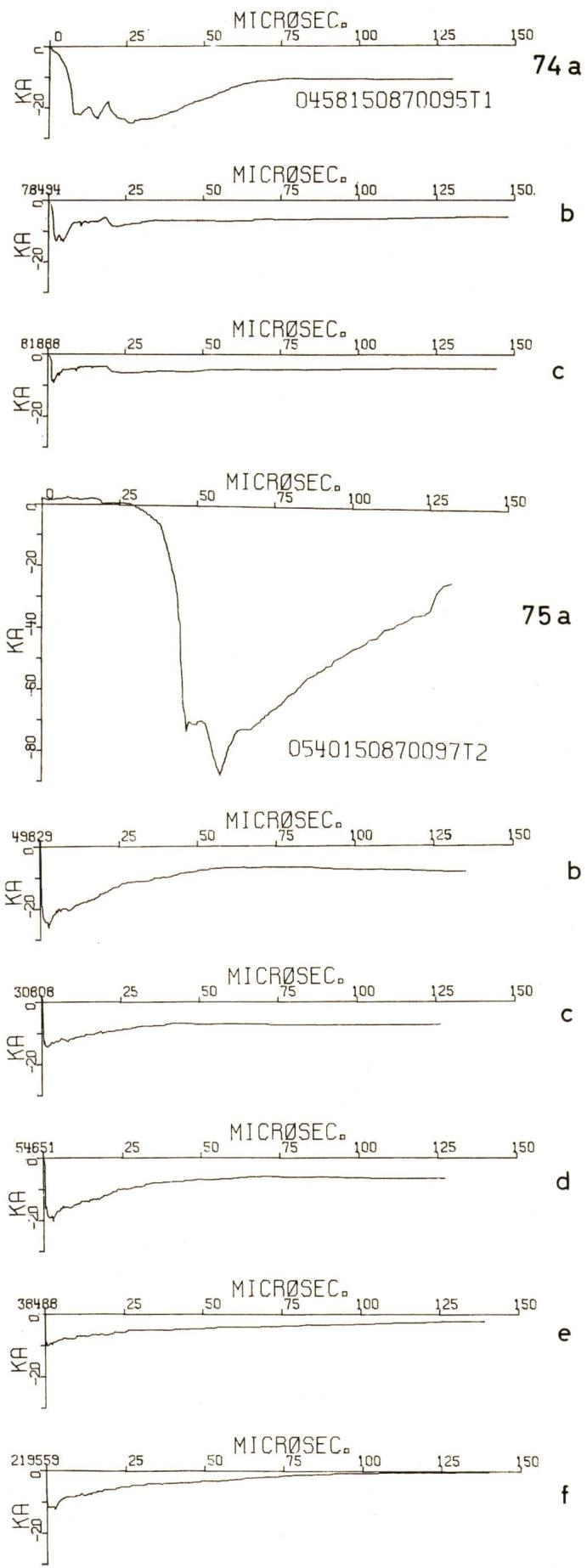
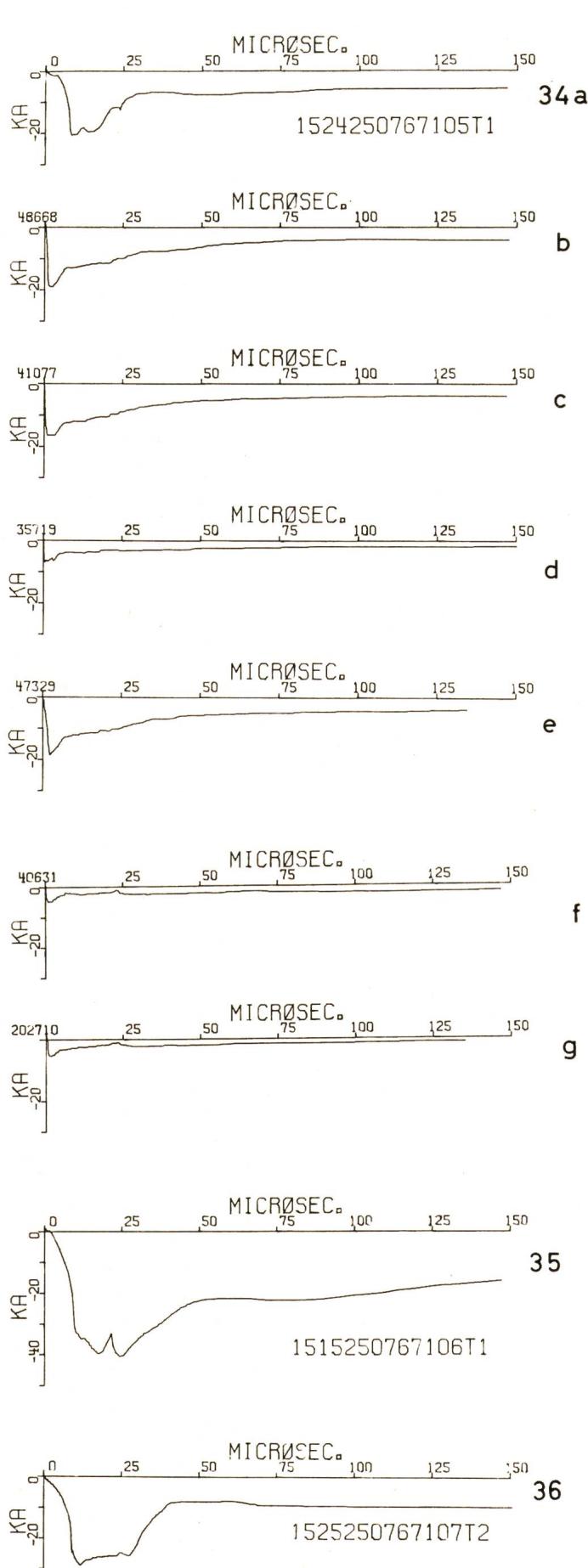
Anzahl Gesamtblitze mit der nachstehend bezifferten Anzahl Teilblitze 1...<10  
1963–1971

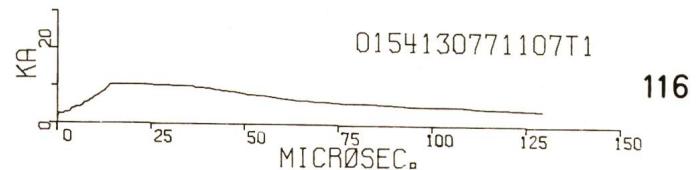
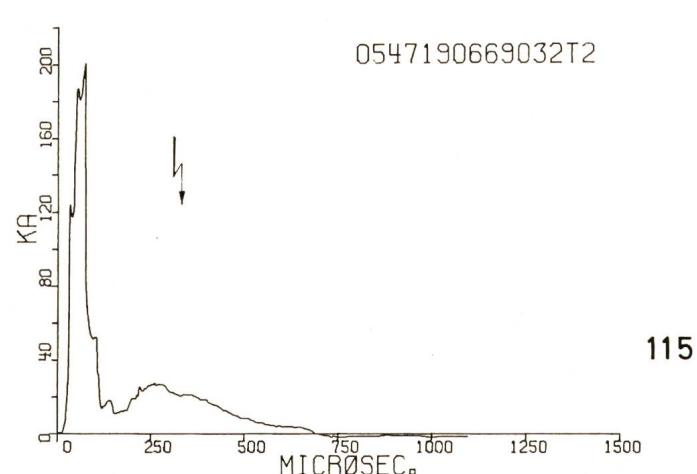
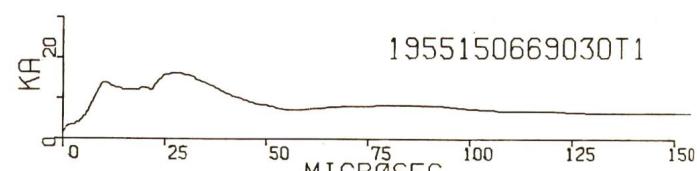
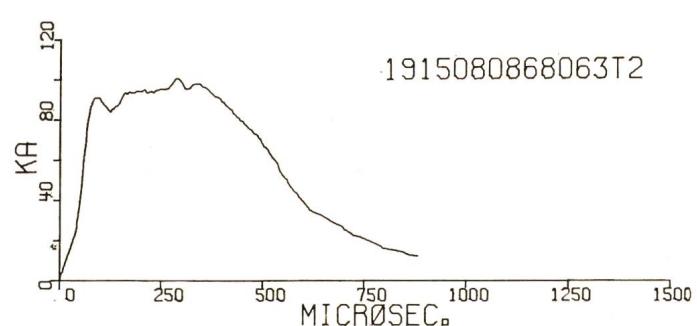
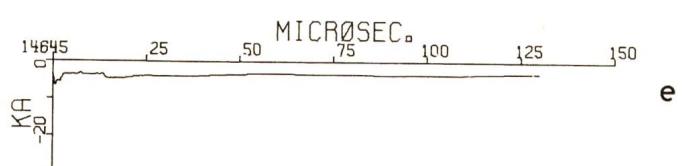
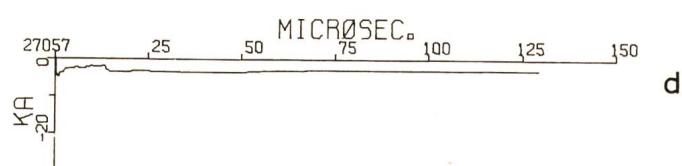
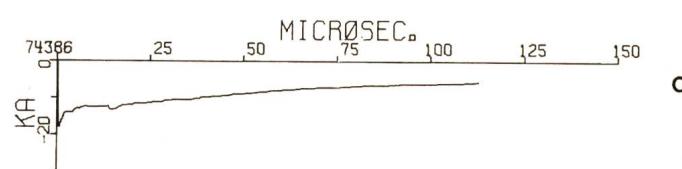
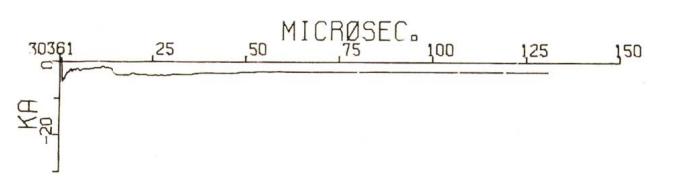
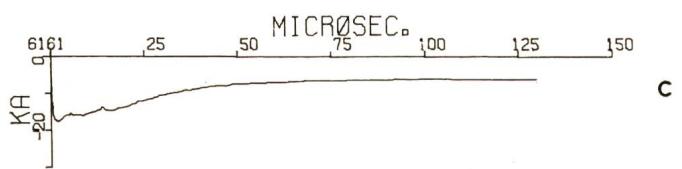
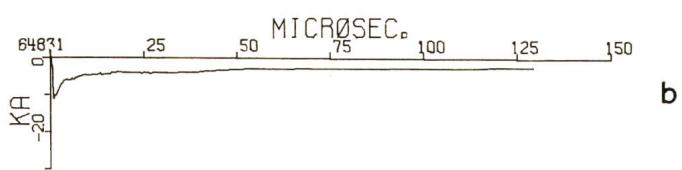
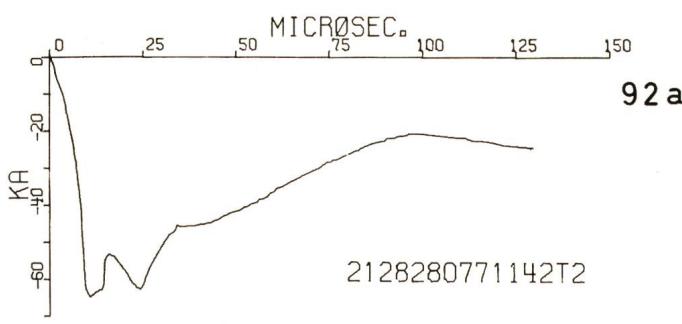
Tabelle V

Jahr	Anzahl ausgewerteter Oszillogramme	Anzahl Teilblitze im Gesamtblitz										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	> 10
1963	118	92	7	5	3	4	2	1	–	–	1	3
1964	56	42	6	2	3	1	2	–	–	–	–	–
1965	117	89	9	7	1	4	–	–	–	–	1	6
1966	159	127	10	7	3	3	1	1	3	1	–	3
1967	150	114	12	4	2	5	3	3	1	1	–	5
1968	101	76	9	5	1	3	1	1	1	1	–	3
1969	52	43	3	3	–	–	–	1	–	–	1	1
1970	108	75	8	7	6	3	1	1	1	2	2	2
1971	165	126	15	9	1	1	4	2	1	–	1	5
1963 bis 1971	1026	784	79	49	20	24	14	10	7	5	6	28

Fig. 10  
Blitzstromverlauf

a erster Teilblitz  
b...g zweiter bis n-ter Teilblitz (Folgeblitze)





#### 4. Begriffe zur Beschreibung des Blitzes

##### 4.1 Allgemeine Begriffe

a) *Blitz*, *Blitzschlag* oder *Gesamtblitz* (Lightning Flash, short «*Flash*») ist eine atmosphärische Entladung in ihrer Gesamtheit, die aus einem oder mehreren Teilblitzen besteht (Definition nach *Schonland*).

b) *Teilblitz* (Lightning stroke, short «*stroke*») ist eine Teilentladung, die von einem Leitblitz (Leader stroke) eingeleitet wird (Definition nach *Schonland*).

c) *Leitblitz* (short «*leader*») ist die licht- und stromschwache Vorentladung, die bei ihrem Vorwachsen den Blitzkanal öffnet (*Schonland*).

d) *Blitzkanal* (Lightning channel) ist der leitende Pfad des Blitzstromes.

e) *Hauptblitz* kurz «*Blitz*» (return stroke, main stroke) ist die hell leuchtende und stromstarke Entladung, die entsteht, wenn der Leitblitz mit der Erde Kontakt macht (*Schonland*).

f) *Abwärtsblitz* (Downward stroke) ist ein Teilblitz, dessen Leitblitz von der Wolke gegen die Erde vorwächst.

g) *Aufwärtsblitz* (Upward stroke) ist ein Teilblitz, dessen Leitblitz auf der Erde oder an einem geerdeten Leiter beginnt und gegen die Wolken hinaufwächst.

h) *Einzelblitz* (Single stroke flash, short «*single flash*») ist ein Blitz, der aus einem einzigen Teilblitz besteht,

i) *Mehrfachblitz* (Multiple stroke flash, short «multiple flash») ist ein Blitz, der aus mehreren Teilblitzen besteht.

k) *Folgeblitz* (Consecutive or following stroke) ist ein Teilblitz, der dem ersten Teilblitz oder einem weiteren Teilblitz folgt.

l) *Blitzdauer* (Duration of a flash) ist die auf Grund einer bestimmten Methode, elektrisch oder photographisch festgestellte gesamte Dauer eines Blitzes.

m) *Teilblitzdauer* (Duration of a stroke) ist die Dauer eines Teilblitzes (Leader plus return stroke).

n) *Teilblitz-Intervall* (Stroke interval) ist die Zeitdauer zwischen dem Anfang zweier Teilblitze (*Kitagawa*).

o) *Fangentladung* (Connecting streamer) ist die dem Leitblitz eines Abwärtsblitzes entgegenwachsende Entladung aus geerdeten Objekten oder aus der Erde.

#### 4.2 Spezielle Begriffe zur Beschreibung des Blitzstromes

a) *Blitzstrom* (Lightning current) ist der Scheitelwert des mit Hilfe eines Shunts auf der Spitze des Messsturmes und eines Messkabels am Boden oszillographisch gemessenen Stromes.

b) *Stoßstrom* (Impuls current) ist der Scheitelwert der kurzdauernden, hohen Komponente des Blitzstromes.

c) *Kontinuierlicher Strom* (Continuing current) ist der lineare Mittelwert der langdauernden Komponente des Blitzstromes.

d) *Front* (Front) ist der ansteigende Teil der Blitzstromkurve.

e) *Rücken* (Tail) ist der abfallende Teil der Blitzstromkurve.

f) *Frontdauer* oder *Anstiegszeit* (Front duration or rise-time of a lightning current) ist die Zeitdauer vom Beginn bis zum Scheitelwert des Blitzstromes. Als Beginn ist der Zeitpunkt verstanden, wo der Stoßstrom 2 kA erreicht. Wenn der Stromverlauf mehrere Scheitelwerte aufweist, gilt der erste Scheitelwert.

g) *Stromsteilheit* (Current steepness) ist der grösste Wert der Stromänderung ( $di/dr$ ) während der Front des Blitzstromes in Teilblitzen.

h) *Ladung* oder *Stromimpuls* (Electric charge or current-impulse) eines Blitzes oder eines Teilblitzes ist das Zeitintegral des Blitzstromes. Es kann für den Stoßstrom und den kontinuierlichen Strom von Blitzen oder Teilblitzen berechnet werden.

i) *Stromquadrat-Impuls* (Current-square-impulse) ist das Integral  $\int i^2 dt$  über die Dauer eines Teilblitzes. Es kann für den Stoßstrom und den kontinuierlichen Strom eines Blitzen oder von Teilblitzen berechnet werden.

k) *Strompause* (No-current interval) ist die am Erdboden festgestellte Dauer der stromlosen Zeit zwischen zwei Teilblitzen.

#### 5. Unterscheidung von Abwärts- und Aufwärtsblitzen in den Strom-Oszillogrammen

Der Unterschied von Abwärts- und Aufwärtsblitzen wird im vorliegenden Bericht auf Grund des Kurvenverlaufs der Blitzstrom-Oszillogramme gemacht, da diese Methode auch bei Tageslicht brauchbar ist (die Blitzphotographie, insbesondere die Photographie des vorwachsenden Blitzkanals, versagt bei Tageslicht).

Die Unterscheidung auf Grund der Oszillogramme ist in weitaus den meisten Fällen eindeutig, da der Blitzstrom beim Aufwärtsblitz mit einem langsam ansteigenden «Gleichstrom» der Größenordnung 50...500 A einsetzt, der Abwärtsblitz dagegen mit einem steilen Stromimpuls, d. h. mit Stromsteilheiten der Größenordnung kA/μs.

Eine Unsicherheit entsteht unter Umständen infolge der Fangentladung bei Abwärtsblitzen, wenn diese Fangentladung sehr lang wird und entsprechend lang dauert. Sie äussert sich in einem Stromverlauf, der zunächst nicht wesentlich verschieden ist von dem eines Aufwärtsblitzes. Er unterscheidet sich von diesem nur dadurch, dass nach einer relativ langen Zeit, d. h. nicht nur einige 50 μs entsprechend der Stufendauer des Blitzes, sondern nach ungefähr 1 ms oder mehr, ein hoher Stoßstrom mit der entsprechend steilen Front eines Abwärtsblitzes einsetzt. Solche Fälle wurden bereits im früheren Bericht vom Jahre 1966 [2] veröffentlicht.

Die Bezeichnung Aufwärts- und Abwärtsblitz wird dann nicht mehr eindeutig, indem hier gewissermassen ein Aufwärts-

#### Statistische Darstellung verschiedener Blitzgrössen

Tabelle VII

1. Scheitelwert des Blitzstromes	aller Teilblitze $n = 262$
2.	aller pos. Teilblitze $n = 28$
3.	aller neg. Teilblitze $n = 236$
4.	aller ersten Teilbl. $n = 126$
5. Ladung des Blitzstromes	in 119 Gesamtblitzen
6.	in 27 pos. Gesamtblitzen
7.	in 88 neg. Gesamtblitzen
8.	in 241 Teilblitzen
9.	in 26 pos. Teilblitzen
10.	in 215 neg. Teilblitzen
11.	für 117 erste Teilblitze
12. Ladung der Stoßkomponente des Blitzstromes	in 232 Teilblitzen
13.	in 25 pos. Teilblitzen
14.	in 207 neg. Teilblitzen
15.	in 113 ersten Teilblitzen
16. Steilheit des Blitzstromes	bei 235 Teilblitzen
17.	bei 21 pos. Teilblitzen
18.	bei 212 neg. Teilblitzen
19.	bei 111 ersten Teilblitzen
20. Stromquadrat-Impuls des Blitzstromes	für 206 Teilblitze
21.	für 27 pos. Teilblitze
22.	für 179 neg. Teilblitze
23.	für 115 erste Teilblitze
24. Dauer des Gesamtblitzes	bei 118 Blitzen
25.	bei 26 pos. Blitzen
26.	bei 93 neg. Blitzen
27. Frontdauer des Blitzstromes	bei 226 Teilblitzen
28.	bei 19 pos. Teilblitzen
29.	bei 207 neg. Teilblitzen
30.	bei 106 ersten Teilblitzen
31. Zeitintervall	bei 133 Teilblitz-Intervallen

blitz einen Abwärtsblitz aus den Wolken herunterholt. Im vorliegenden Bericht ist eine Abgrenzung dadurch erfolgt, dass trotz der langen Fangentladung von einem Abwärtsblitz gesprochen wird, wenn die Stoßladung die in der Fangentladung gespeicherte Ladung wesentlich überwiegt. Diese beiden Ladungen lassen sich aus den Oszillogrammen auswerten.

Das zunächst unwahrscheinliche «Herunterholen eines Blitzes» mit einer langen Fangentladung erscheint auf Grund der neuen Messungen des Feldverlaufs vor und während des Blitzeinschlages nicht mehr als anormal, weil es sich zeigt, dass der Einschlag oft nur als bescheidener Teil eines viel umfassenderen Geschehens in den Wolken gesehen werden muss, das in vielen Fällen dem Blitzeinschlag vorausgeht.

#### 6. Statistische Auswertung der Blitzströme

Mit Hilfe der Rechenanlage der ETH konnten vorerst die Strom-Oszillogramme aller *Abwärtsblitze* der Berichtsperiode 1963...1971 in statistischer Form ausgearbeitet werden. Diese Auswertung betrifft die Darstellung der in der Tabelle VII genannten Grössen auf Wahrscheinlichkeitspapier mit logarithmischem Abszissenmaßstab. Von den 31 berechneten Häufigkeitskurven seien nachstehend 10 Beispiele reproduziert, Fig. 11...20<sup>3)</sup>.

Aus den Kurven ist die unter Annahme einer log-normalen Häufigkeitsverteilung und unter Voraussetzung der minimalen quadratischen Abweichung vom Computer berechnete Regressions-Gerade ersichtlich, ferner teilweise auch die 95 %-Vertrauengrenze.

<sup>3)</sup> Die Kurvenblätter nach Tab. VII können von Interessenten gegen Kostenvergütung vom Autor bezogen werden.

Der hier verfügbare Platz erlaubt nicht, auf die vielen interessanten Einzelheiten der Darstellungen einzugehen. Lediglich einige allgemeine Bemerkungen sollen angeführt werden:

6.1 Während bei einzelnen Größen, z. B. für den Scheitelpunkt aller Teilblitze ( $i$  all strokes) in Fig. 14 mit recht guter Näherung von einer log-normalen Verteilung gesprochen werden kann, ist das bei anderen Größen, wie z. B. der Steilheit der ersten Teilblitze (Fig. 19) nur mit schlechter Näherung möglich.

6.2 Rund 20 % aller Werte der Steilheit negativer Teilblitzströme liegen bei  $50 \text{ kA}/\mu\text{s}$  oder höher. Werte von  $60 \text{ kA}/\mu\text{s}$  oder mehr sind mit Vorsicht zu betrachten, weil die Messgenauigkeit der bestehenden Einrichtung nicht mehr mit Sicherheit genügt. Soweit für diese steilsten Ströme praktisches Interesse besteht, wären hier Ergänzungsmessungen wünschbar. Es muss dabei darauf hingewiesen werden, dass die steilste Tangente an die Stromkurve ausgewertet wurde. Dieser Wert tritt beim ersten Teilblitz kurz vor dem Scheitelpunkt des Stromes auf und ist daher für den Blitzschutz von grundsätzlicher Bedeutung [5]. Große Steilheiten treten bekanntlich bei allen Folgeblitzen auf, deren Stromscheitelpunkte aber mit seltenen Ausnahmen kleiner sind als beim ersten Teilblitz. Auf diese Korrelationsfrage zwischen Strom und Steilheit wird im Kapitel 7 (Korrelationen) noch einzugehen sein.

6.3 Eine entsprechende Begrenzung besteht für die Frontdauer: Mit der bestehenden Einrichtung sind Frontdauern unterhalb  $0,5 \mu\text{s}$  bei großen Stromscheitelpunkten bzw. großen Auslenkungen im Oszillogramm nur ungenau messbar, so dass im Bedarfsfall auch hier Ergänzungen nötig wären. Die kurzen Frontdauern kommen immer bei den Folgeblitzen vor.

6.4 Soweit die Häufigkeit einer log-normalen Verteilung entspricht, kann das Vorkommen seltener Extremwerte abgeschätzt werden. Danach wäre zu erwarten, dass

ca. 5 % aller positiven Abwärtsblitze mehr als  $300 \text{ kA}$  führen, und  
ca. 0,2 % aller pos. und neg. Abwärtsblitze mehr als  $300 \text{ kA}$  führen,

oder bezüglich des Stromquadrat-Impulses, der dem Energie-Impuls in  $1 \Omega$  entspricht, dass

ca. 10 % aller positiven Abwärtsblitze mehr als  $10^7 \text{ A}^2\text{s}$  führen, und  
ca. 0,5 % aller pos. und neg. Abwärtsblitze mehr als  $10^7 \text{ A}^2\text{s}$  führen.

Der grösste in der Berichtsperiode und in der Gesamtperiode der ausführlichen Messungen auf dem San Salvatore (1946 bis 1971) gemessene Blitzstrom betrug ca.  $270 \text{ kA}$ . Von den insgesamt  $1026 + 379 + 272$  seit 1946 gemessenen Blitzströmen entspricht dies rund 0,6 % Wahrscheinlichkeit, von den insgesamt gemessenen 126 Abwärtsblitzen der Periode 1963...1971 ca. 8 %, von den 28 gemessenen positiven Abwärtsblitzen ca. 4 %!

## 7. Korrelation von Blitzstrom-Charakteristiken

### 7.1 Zweck und Darstellung

Bei der Anwendung der Resultate der Blitzforschung für die Probleme des Blitzschutzes stellt sich oft die Frage, wie häufig und wie ausgeprägt gleichzeitig ungünstig hohe Werte verschiedener Blitzstrom-Charakteristiken zusammentreffen. So setzt sich z. B. die Spannung eines Gebäude-Blitzableiters gegenüber der umgebenden Erde aus einem induktiven Spannungsabfall längs des Blitzableiters  $L \cdot di/dt$  und einem Ohmschen Anteil an der Erdung  $R_{el}$  zusammen. Beide können gleicher Größenordnung sein; die Spannung wird maximal, wenn mit dem grössten Strom auch die grösste Stromsteilheit  $di/dt$  auftritt, d. h. wenn eine ausgesprochene Korrelation dieser beiden Größen vorhanden ist. Ein ähnliches Problem liegt vor bei Überspannungsableitern; ihre Beanspruchung wird maximal, wenn beim gleichen Blitzschlag mit den grössten  $i$ -Werten auch die grössten  $Q$ -Werte oder die grösste Stromdauer auftritt.

Die Überprüfung des eventuellen statistischen Zusammenhangs zweier charakteristischer Blitzgrößen lässt sich am einfachsten dadurch feststellen, dass alle Einzelwerte in einem Koordinatennetz eingetragen werden, wobei die erste Größe als Abszisse, die zweite als Ordinate gilt. Aus dem «Sternhimmel» aller Punkte kann bereits abgeschätzt werden, ob ein Zusammenhang wahrscheinlich ist. Andererseits erlaubt der Computer die Berechnung der Abhängigkeit (Regression) zweier Größen, indem z. B. untersucht wird, ob sich eine Abhängigkeit mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit feststellen lässt. Eine solche Untersuchung wurde mit der Rechenanlage des ORL-Planungsinstitutes der ETH Zürich durchgeführt.

Aus der digitalen Speicherung der Kurvenpunkte konnten die Zusammenhänge (Korrelationen) der charakteristischen Größen des Blitzstromes mit der Rechenanlage bestimmt und Regressionsgeraden aufgezeichnet werden.

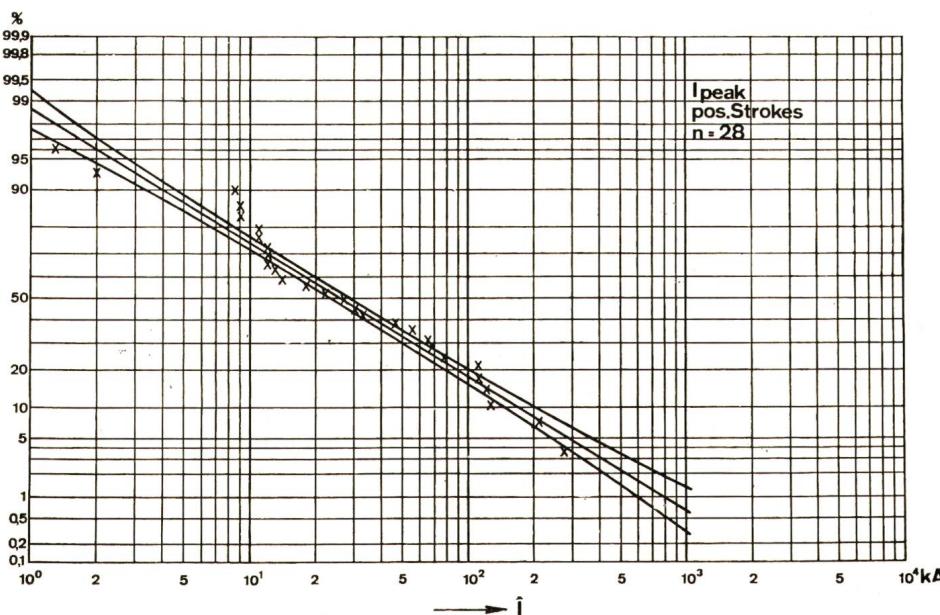


Fig. 11  
Häufigkeit verschiedener hoher Blitzströme  $i$   
aller positiven Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

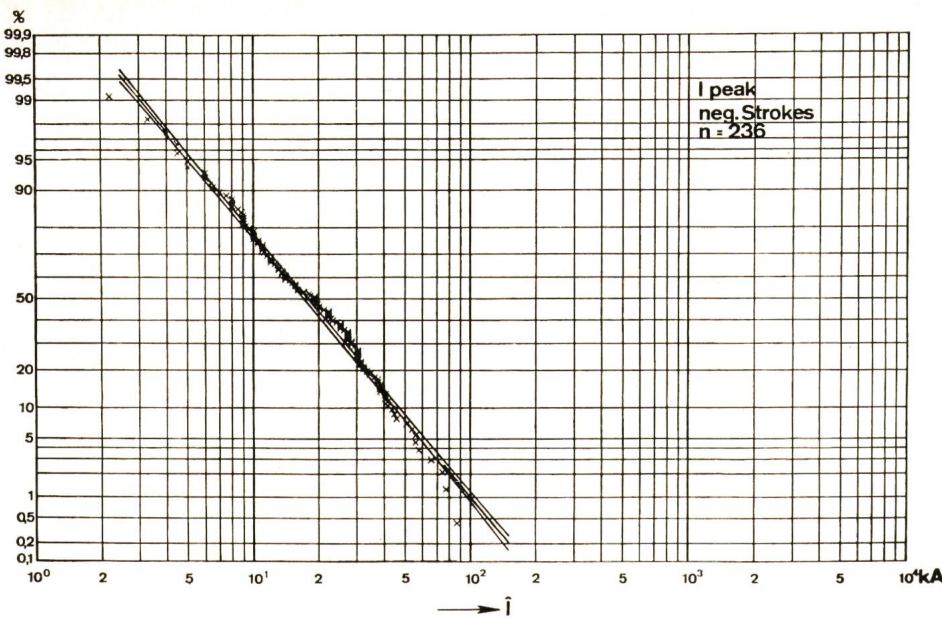


Fig. 12  
Häufigkeit verschieden hoher Blitzströme  $\hat{I}$   
aller negativen Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

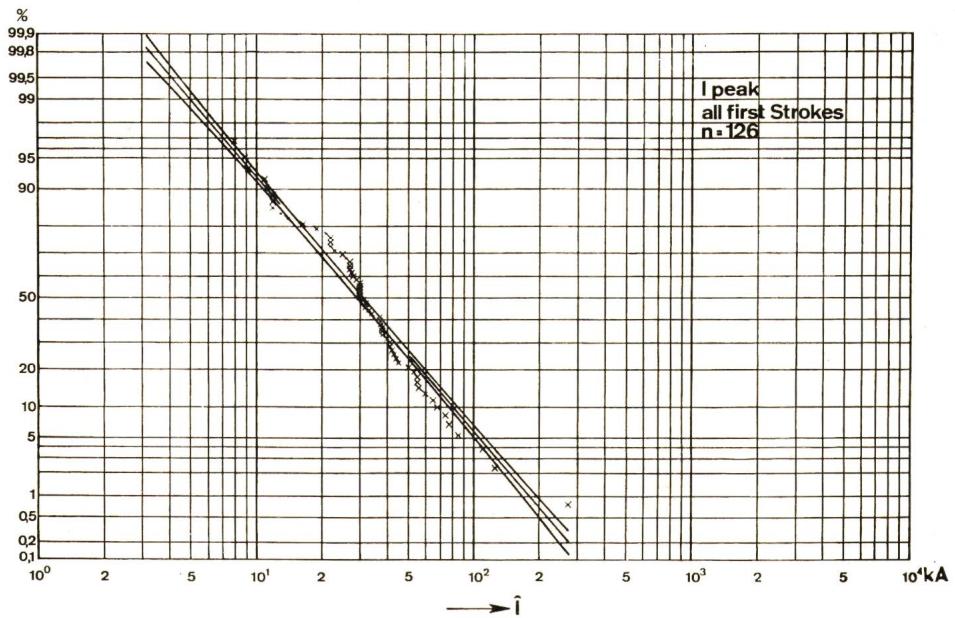


Fig. 13  
Häufigkeit verschieden hoher Blitzströme  $\hat{I}$   
aller ersten Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

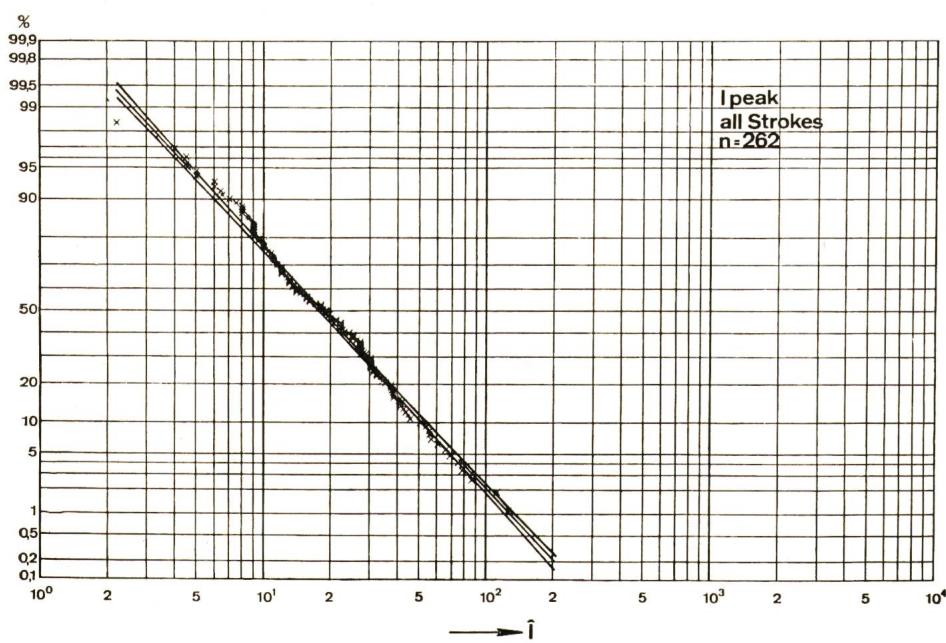


Fig. 14  
Häufigkeit verschieden hoher Blitzströme  $\hat{I}$   
aller Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

Fig. 15  
Häufigkeit verschiedener Frontdauern  $T$   
aller positiven Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

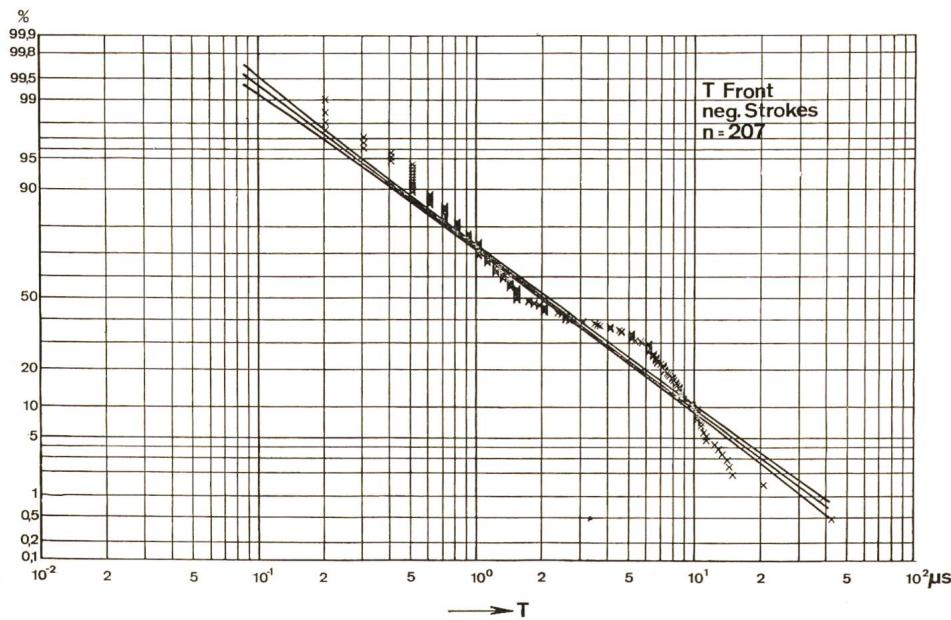
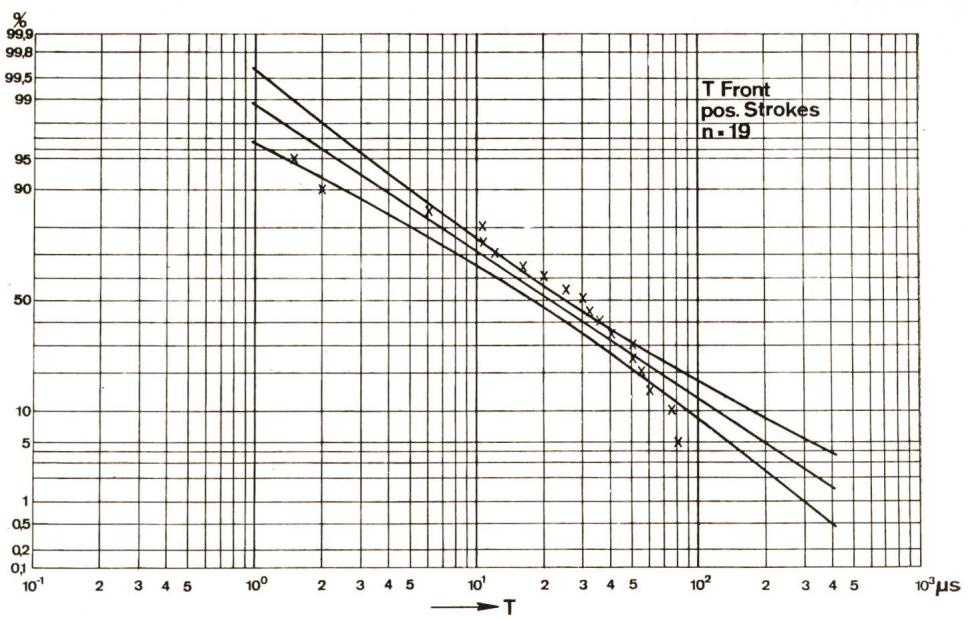


Fig. 16  
Häufigkeit verschiedener Frontdauern  $T$   
aller negativen Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

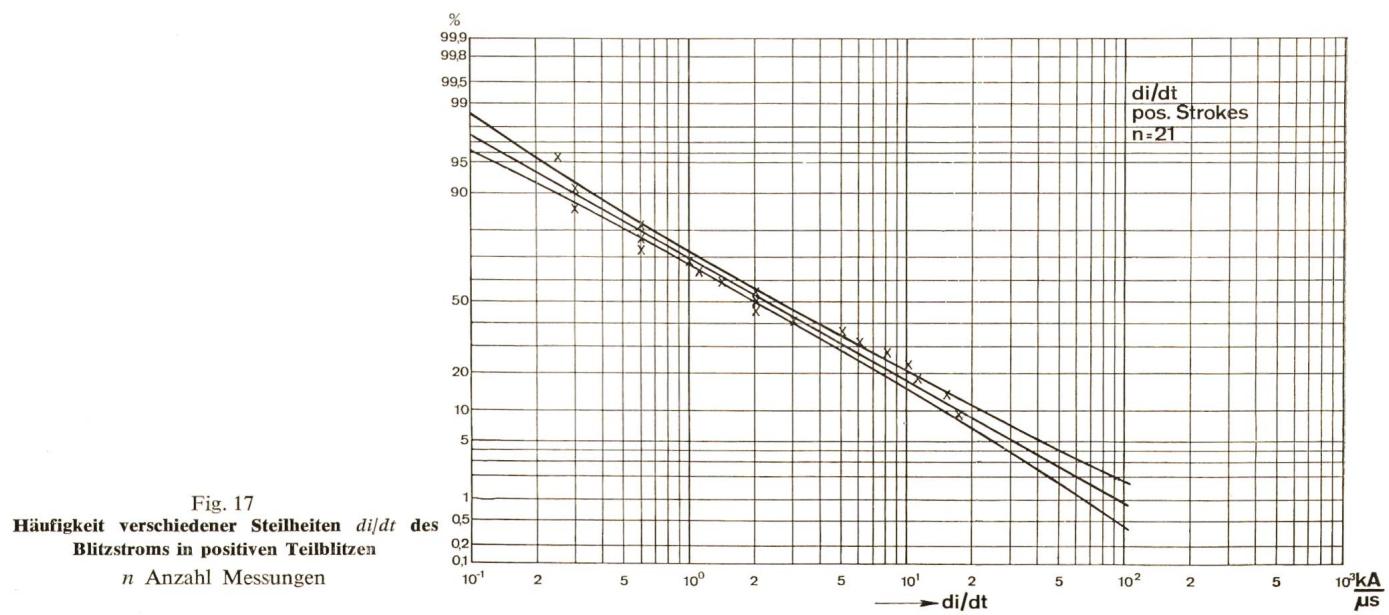


Fig. 17  
Häufigkeit verschiedener Steilheiten  $di/dt$  des  
Blitzstroms in positiven Teilblitzen  
 $n$  Anzahl Messungen

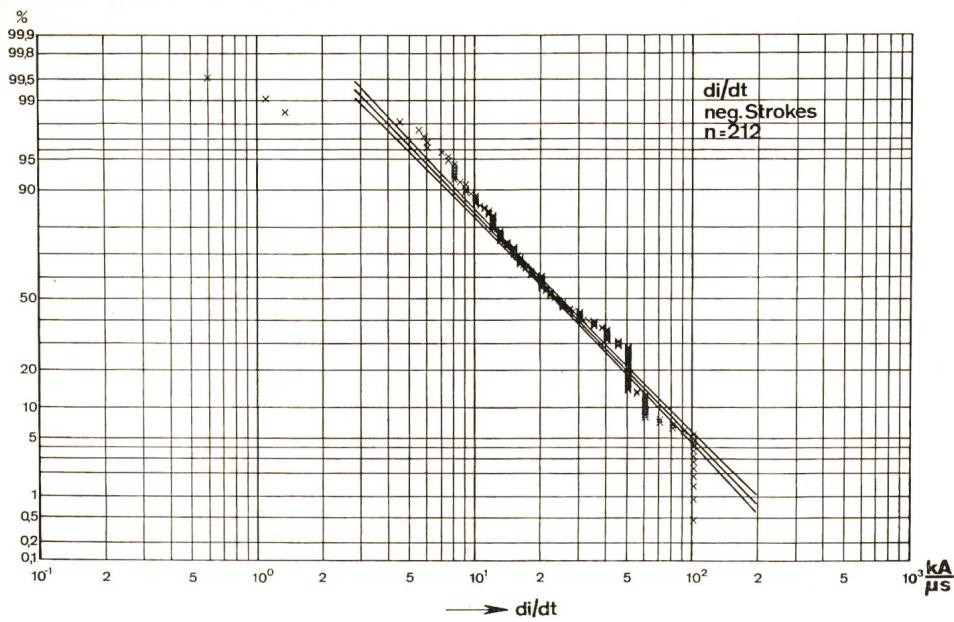


Fig. 18  
Häufigkeit verschiedener Steilheiten  $di/dt$  des Blitzstromes in negativen Teilblitzen  
n Anzahl Messungen

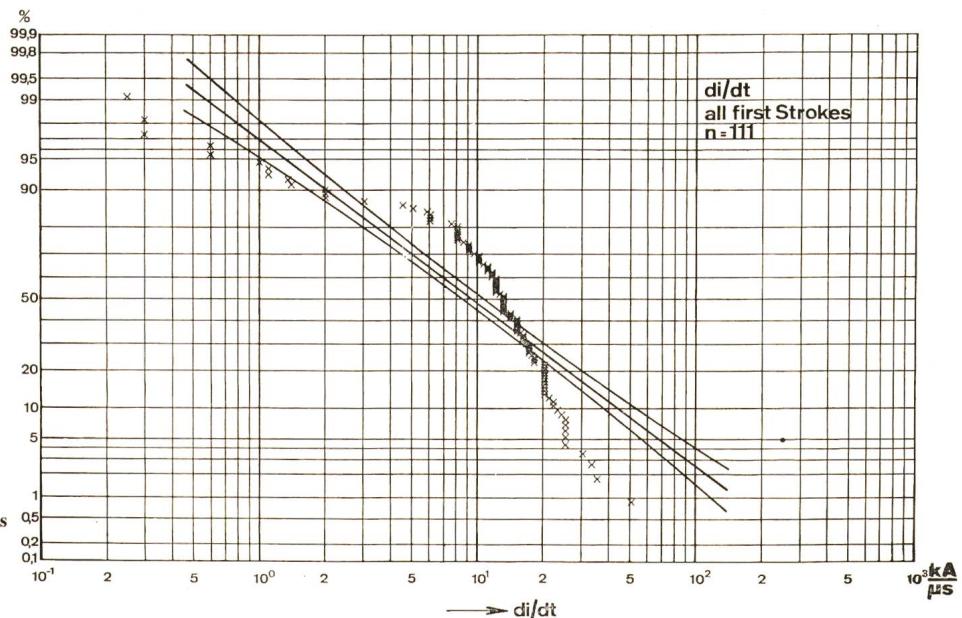


Fig. 19  
Häufigkeit verschiedener Steilheiten  $di/dt$  des Blitzstromes in allen ersten Teilblitzen  
n Anzahl Messungen

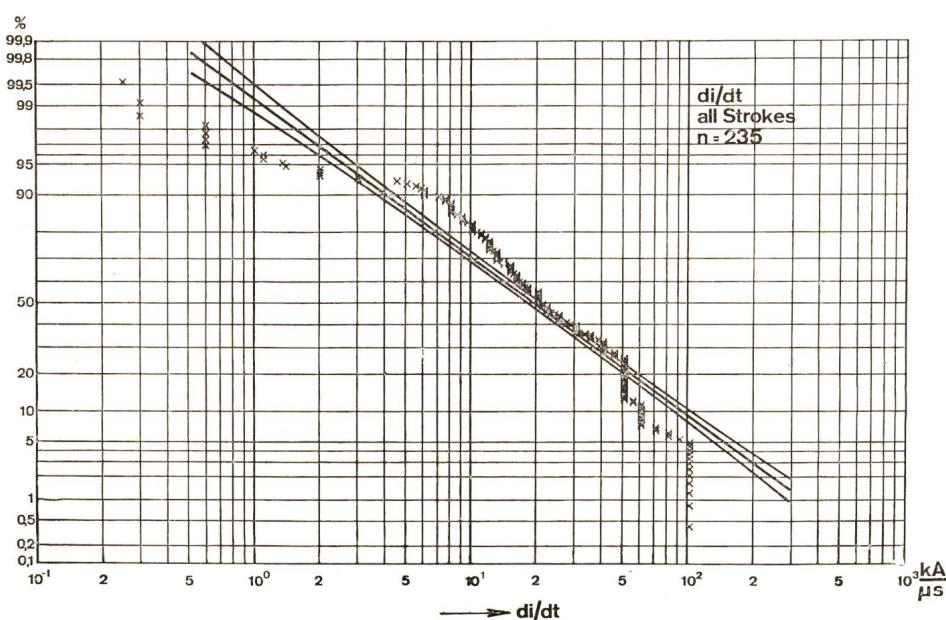
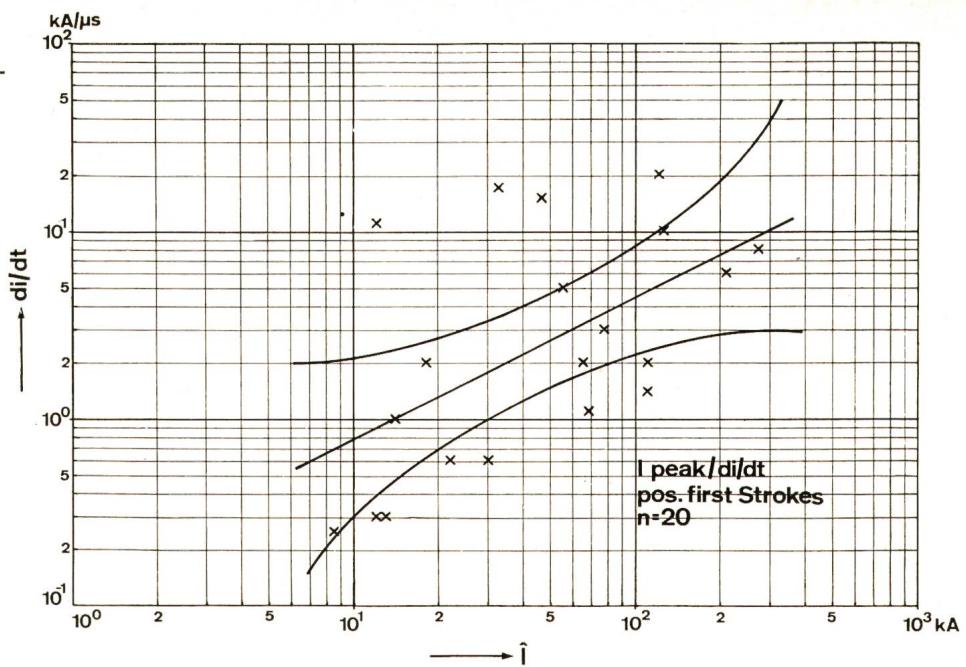


Fig. 20  
Häufigkeit verschiedener Steilheiten des Blitzstromes  
n Anzahl Messungen

Fig. 21

Korrelation zwischen Scheitelwert  $\hat{i}$  und Steilheit  $di/dt$  von positiven ersten Teilblitzen  
 n Anzahl Messungen



I A/μs

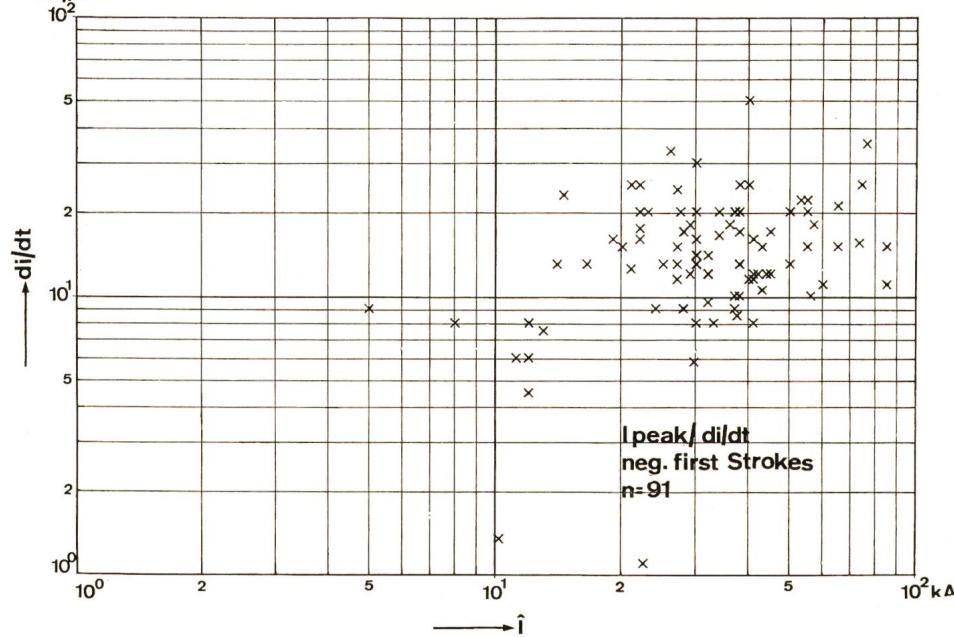


Fig. 22

Korrelation zwischen Scheitelwert  $\hat{i}$  und Steilheit  $di/dt$  von negativen ersten Teilblitzen  
 n Anzahl Messungen

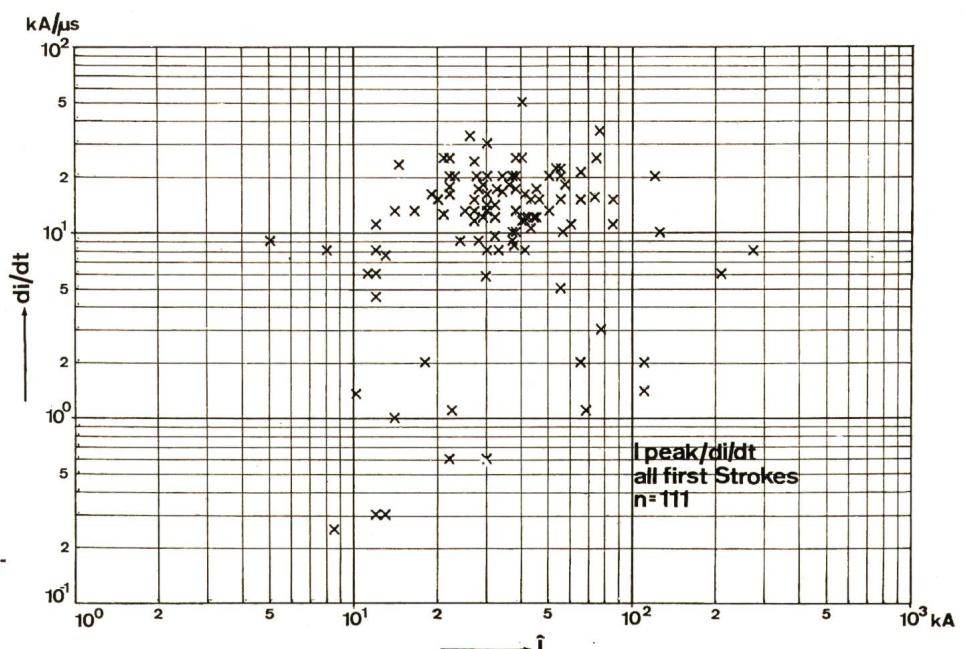


Fig. 23

Korrelation zwischen Scheitelwert  $\hat{i}$  und Steilheit  $di/dt$  von allen ersten Teilblitzen  
 n Anzahl Messungen

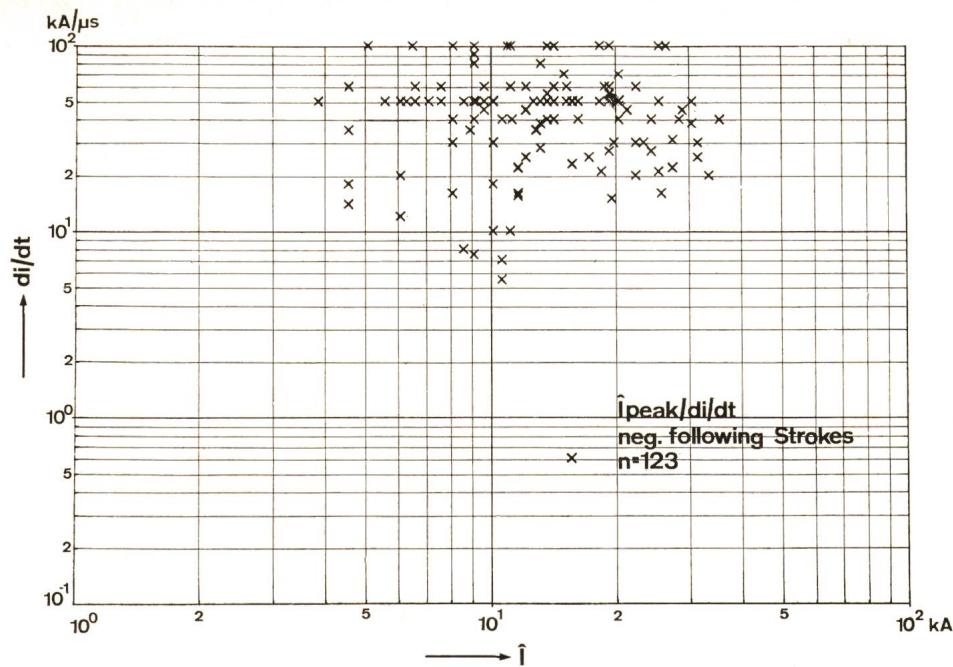


Fig. 24  
Korrelation zwischen Scheitelwert  $i$  und Steilheit  $di/dt$  von allen Folgeblitzen  
 $n$  Anzahl Messungen

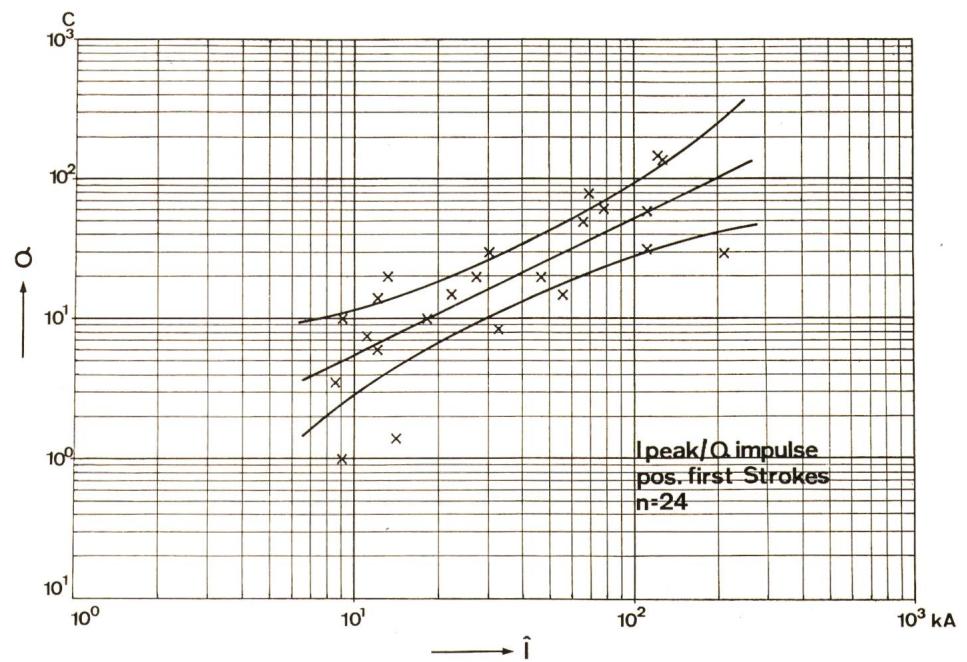


Fig. 25  
Korrelation zwischen Scheitelwert  $i$  und Ladung  $Q$  der ersten positiven Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

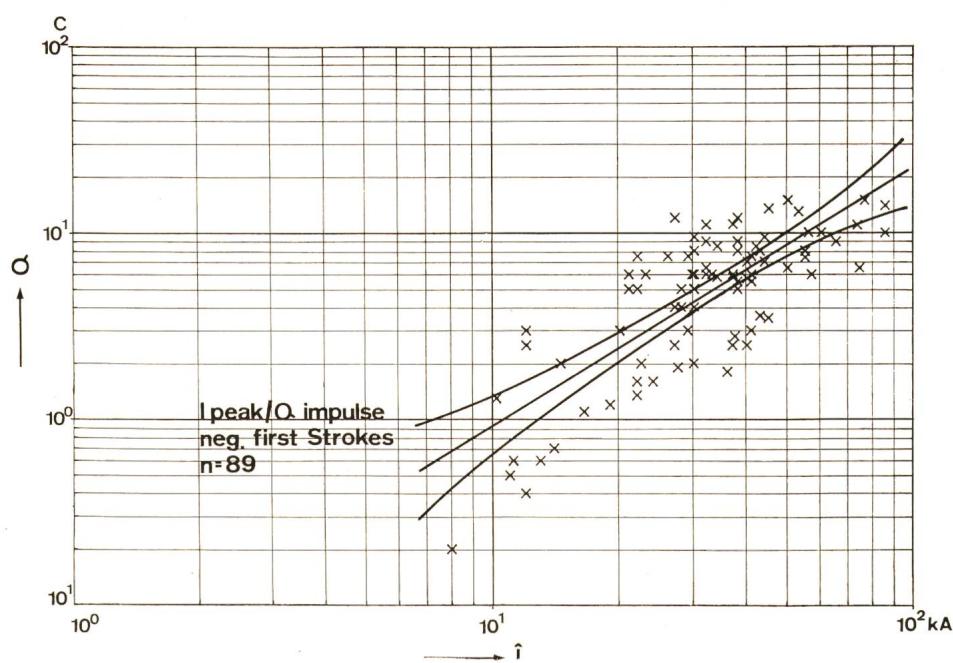


Fig. 26  
Korrelation zwischen Scheitelwert  $i$  und Ladung  $Q$  für den ersten negativen Teilblitz  
 $n$  Anzahl Messungen

Fig. 27  
**Korrelation zwischen Scheitelwert  $\hat{i}$  und  
 Ladung  $Q$  für alle ersten Teilblitze**  
 $n$  Anzahl Messungen

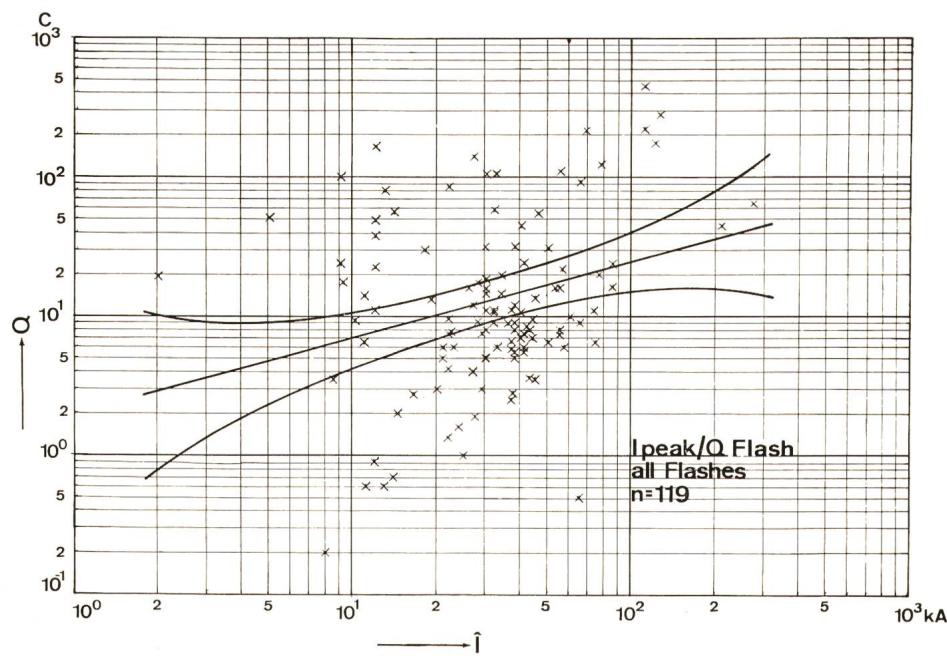
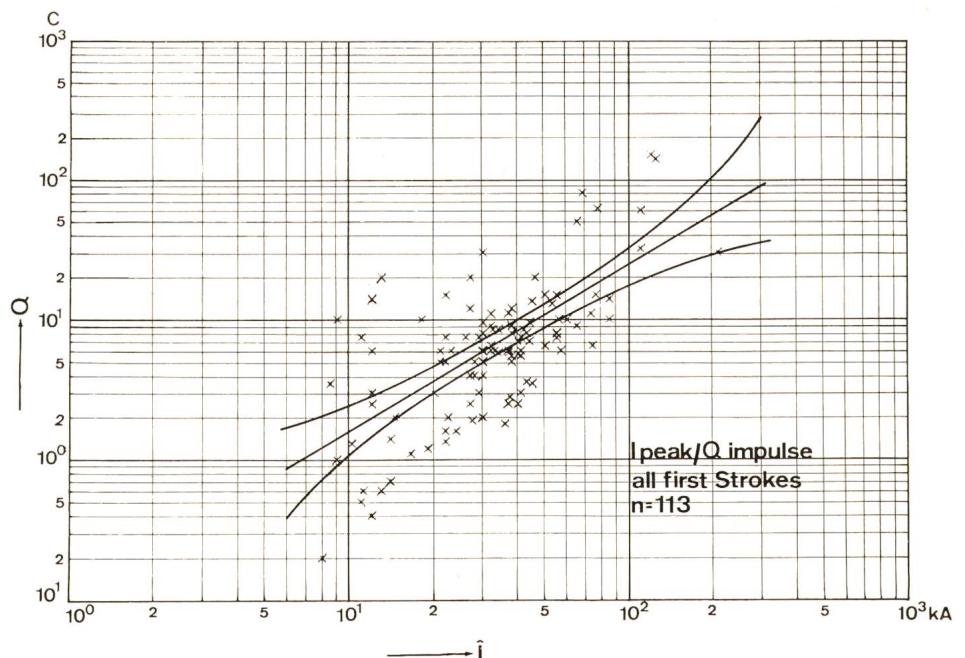


Fig. 28  
**Korrelation zwischen Scheitelwert  $\hat{i}$  und  
 Ladung  $Q$  für Gesamtblitze**  
 $n$  Anzahl Messungen

Fig. 29  
**Amplitudenspektrum des Blitzstromes gemäß  
 Oszillogrammen No 63072 und 70062**  
 $n$  Anzahl Messungen

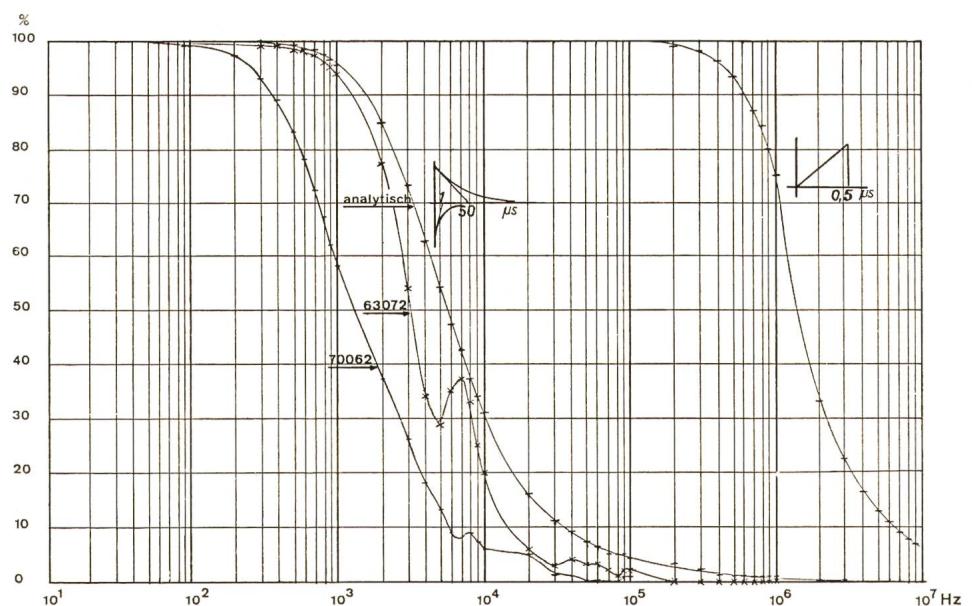


Tabelle VIII enthält eine Liste von 27 ausgeführten graphischen Darstellungen möglicher Korrelationen, insbesondere zwischen dem Stromscheitelwert und anderen Kenngrößen wie Ladung, Steilheit, Energie-Impuls und Dauer des Blitzstromes.  $n$  bedeutet die Anzahl Messungen. Davon werden nachstehend 8 Beispiele wiedergegeben, Fig. 21...28<sup>4</sup>). Ausgeprägte Korrelationen sind vorhanden zwischen  $i$  und Impulsladung  $Q$  oder  $fidt$ , und zwischen  $i$  und  $\int i^2 dt$ , wenn nur der Strom-Impuls, nicht die langdauernde Stromkomponente berücksichtigt wird. Daran sollen einige theoretische Überlegungen zur Frage des sog. «Schutzraumes» von Blitzableitern geknüpft werden.

### 7.2 Problem des «Schutzraumes» eines Blitzableiters

Der feste Zusammenhang zwischen Stromscheitelwert und Stossladung eines Teilblitzes bildet die Grundlage der einzigen heute noch in Frage kommenden Theorie eines sog. «Schutzraumes» von Blitzableitern, innerhalb dessen kein Einschlag vorkommen soll. Die Grundlage dieser Theorie wurde von

Darstellung der Korrelation nachstehender Größen

Tabelle VIII

1. Stromscheitelwert zu Gesamtladung eines Blitzes	für alle Blitze	$n = 119$
2.	für pos. Blitze	$n = 26$
3.	für neg. Blitze	$n = 93$
4. Stromscheitelwert zu Stossladung eines Teilbl.	für erste Teilblitze	$n = 113$
5a.	für pos. erste Teilbl. (log. Skala)	$n = 24$
5b.	für pos. erste Teilbl. (lineare Skala)	$n = 24$
6a.	für neg. erste Teilbl. (log. Skala)	$n = 89$
6b.	für neg. erste Teilbl. (lineare Skala)	$n = 89$
7.	für Folgeblitze	$n = 118$
8. Stromscheitelwert zu Strom-Steilheit	für erste Teilblitze	$n = 111$
9.	für pos. erste Teilbl.	$n = 20$
10.	für neg. erste Teilbl.	$n = 91$
11.	für Folgeblitze	$n = 123$
12. Stromscheitelwert zu Stromquadrat-Impuls	für erste Teilblitze	$n = 115$
13a.	für pos. erste Teilbl. (log. Skala)	$n = 25$
13b.	für pos. erste Teilbl. (lineare Skala)	$n = 25$
14a.	für neg. erste Teilbl. (log. Skala)	$n = 90$
14b.	für neg. erste Teilbl. (lineare Skala)	$n = 90$
15.	für Folgeblitze	$n = 88$
16. Stromscheitelwert zu Blitzdauer	für alle Blitze	$n = 118$
17.	für pos. Teilblitze	$n = 25$
18.	für neg. Teilblitze	$n = 93$
19. Stromscheitelwert zu Frontdauer	für erste Teilblitze	$n = 106$
20.	für pos. 1. Teilblitze	$n = 18$
21.	für neg. 1. Teilblitze	$n = 88$
22. Stromscheitelwert zu Zeitintervall vor Teilblitz	für neg. Teilblitze	$n = 132$
23. Gesamte Blitzladung zu Blitzdauer	für alle Blitze	$n = 113$
24.	für pos. Blitze	$n = 25$
25.	für neg. Blitze	$n = 87$
26. Teilblitzladung zu Zeitintervall vor Teilblitz	für neg. Teilblitze	$n = 117$
27. Zeitintervall vor Teilblitz zu Steilheit des Teilbl.	für neg. Teilblitze	$n = 120$

<sup>4</sup>) Die Kurvenblätter nach Tab. VIII können von Interessenten gegen Kostenvergütung vom Autor bezogen werden.

R. M. Golde 1961 veröffentlicht [6; 7]. In der Tat sollte theoretisch bei einer bestimmten Ladungsverteilung längs des unverzweigt gedachten Leaders einer bestimmten Länge das Potential des Leader-Kopfes vor dem Blitzschlag sowohl dem Blitzstrom-Scheitelwert als auch der im Leader gespeicherten Ladung proportional sein. Die Streuung der Messwerte für den Zusammenhang  $i$  (Impuls) und  $Q$  (Impuls) kann einerseits in der Blitzlänge, andererseits in der nicht immer gleichen Ladungsverteilung des Leaders begründet sein, d.h. praktisch vor allem im Vorhandensein von Kanalverzweigungen («Blitzästen»), die wohl die Stossladung des ersten Blitzstrom-Impulses, aber nicht dessen Stromscheitelwert erhöhen. Die Kurven der Fig. 25...28 zeigen, dass eine angenäherte Proportionalität zwischen Stossladung und Stromscheitelwert des Blitzstrom-Impulses als gesichert gelten darf, ebenso der Unterschied zwischen positiven und negativen ersten Teilblitzen.

Für die Frage des Schutzraumes gegenüber Blitzschlägen bleibt aber ausserdem die offene Frage des Zusammenhangs zwischen dem sehr hohen Potential des Leader-Kopfes und der Schlagweite bestehen. Wenn ein eindeutiger Zusammenhang besteht, lässt sich auf Grund des genannten gesicherten Zusammenhangs zwischen  $i$  und Impulsladung  $Q$  ein Schutzraum berechnen. Besteht aber bei den hohen Spannungen kein eindeutiger Zusammenhang mehr zwischen Schlagweite und Messung, so besteht die gleiche Unsicherheit auch beim sog. Schutzraum. Versuche, die mit sog. «Schaltspannungen» von mehr als ca. 2 MV mit Frontdauern von einigen 100 bis 1000  $\mu$ s in grossen Hochspannungslaboratorien durchgeführt wurden, zeigen, dass ein eindeutiger Zusammenhang an positiven Stab- und Spitzenelektroden nicht mehr besteht [8]. Da beim Abwärtsblitz der Leader-Kopf als Spitze gelten muss, besteht diese Unsicherheit vor allem bei den seltenen, strom- und ladungsstarken Blitzen aus positiven Wolken. Trotz der guten Bestätigung des Zusammenhangs von  $i$  und  $Q$  (Stoss) muss daher die Frage nach der Möglichkeit eines definierten Schutzraumes theoretisch skeptisch beurteilt werden.

### 8. Spektral-Analyse der Stosskomponente von Blitzströmen

Die digitale Speicherung des Kurvenverlaufes von Impulströmen der Abwärtsblitze erlaubte ihre Frequenz-Analyse. Wegen der beschränkt zur Verfügung stehenden Zeit seit der erwähnten Speicherung konnten bisher nur wenige Beispiele von Stromkurven analysiert werden, wozu einmal ein im üblichen Zeitintervall von 150  $\mu$ s erfasster Blitzstrom, das andere Mal ein langdauernder Blitzstrom mit etwas mehr als 1000  $\mu$ s Dauer ausgewählt wurde. Die Analyse wurde nach der für digitale Zeitserien angewandten klassischen Methode der Fourier-Analyse im Rechenzentrum der ETH Zürich durchgeführt. Das Resultat einer solchen Analyse ist für zwei extreme Stromformen in Fig. 29 reproduziert.

Daraus ergibt sich, dass die Frequenzkomponenten im Gebiet von ca.  $10^3$ ... $10^5$  Hz bei negativen, und ca.  $300$ ... $10^5$  Hz bei positiven Blitzströmen von ca. 95 % auf wenige Prozente abfallen. Nun ist bekannt, dass bei den sog. Sferics, d. h. bei den vom Blitz verursachten elektrischen Feldstärken in Hunderten bis Tausenden von km Entfernung vom Blitz vorwiegend höhere Frequenzen festgestellt werden. Diese Erscheinung ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass im Strahlungsfeld eines Dipols die hohen Frequenzen mit kleinerer Dämpfung übertragen werden als die tiefen, so dass erstere um so mehr überwiegen, je grösser die Entfernung wird. Andrerseits zeigen

auch die Feldmessungen in der Nähe des Blitzes Frequenzanteile von MHz mit rel. kleinen Amplituden. Diese sind vermutlich auf die feinen Verästelungen des Blitzes innerhalb der Wolken zurückzuführen, die im Stromverlauf am Erdboden nicht zum Vorschein kommen.

Die Resultate von Feldmessungen in unmittelbarer Nähe des Blitzeinschlags und in seiner Umgebung sind einem zweiten Bericht vorbehalten, der in einem der nächsten Hefte des Bulleitins des SEV erscheinen wird.

Der schweizerische Nationalfonds für wissenschaftliche Forschung ermöglichte die Durchführung der vorstehenden Arbeit. Die statistische Auswertung und Oszillogramm-Linearisierung erfolgte durch *H. Kröninger*, Pretoria, mit Hilfe verschiedener Institute der ETH und Mitarbeiter der FKH.

## Literatur

- [1] *K. Berger und E. Vogelsanger*: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore, Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.
- [2] *K. Berger und E. Vogelsanger*: Photographische Blitzuntersuchungen der Jahre 1955...1965 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 57(1966) 14, S. 599...620.
- [3] *K. Berger et E. Vogelsanger*: Nouveaux résultats d'observation de la foudre. Rapport Cigré No 33-03, 1968.
- [4] *S. A. Prentice*: Compteurs de coups de foudre Cigré. Electra -(1972)22, p. 149...171.
- [5] *K. Berger*: Das Grundprinzip des Blitzschutzes. Bull. SEV 61(1970)6, S. 272...274.
- [6] *R. H. Golde*: Theoretische Betrachtungen über den Schutz von Blitzableitern. ETZ-A 82(1961)9, S. 273...277.
- [7] *F. Schwab*: Berechnung der Schutzwirkung von Blitzableitern und Türmen. Bull. SEV 56(1965)17, S. 678...683.
- [8] *H. Baatz*: Radioaktive Isotope verbessern nicht den Blitzschutz. ETZ-A 93(1972)2, S. 101...104.

## Adresse des Autors:

Prof. Dr. *K. Berger*, Gstadstrasse 31, 8702 Zollikon.

## EVANGELISTA TORRICELLI

1608–1647



Bibliothek ETHZ

Um die gleiche Zeit, da in Deutschland Otto v. Guericke über das «Nichts» nachsann und mit seinen «Magdeburger-Halbkugeln» Weltruhm erlangte, beschäftigte sich in Italien ein junger Mathematiker und Physiker mit dem Vakuum. Das war Evangelista Torricelli, der am 15. Oktober 1608 in Modigliano (Toskana) geboren wurde und im Alter von nur 39 Jahren am 25. Oktober 1647 in Florenz starb.

Seine erste Ausbildung erhielt Torricelli in Faenza von einem Onkel im dortigen Kloster und nachher in der Jesuitenschule. 1627 wurde er an die Universität Rom geschickt, wo er Schüler Benedetto Castellis wurde, der seinerseits Schüler Galileis gewesen war. Torricelli studierte die Schriften Galileis, insbesondere die 1638 erschienenen «Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze». Er machte sich auch Gedanken über Galileis Theorie, derzu folge die Natur eine Abscheu vor dem Vakuum habe. 1641 verfasste er einen Bericht, in welchem er den dritten Dialog Galileis kommentierte und erweiterte. Castelli, tief beeindruckt von dieser Arbeit, brachte sie dem erblindeten Galilei zur Kenntnis und empfahl ihm, Torricelli als Sekretär zu sich zu berufen. Anfang Oktober des gleichen Jahres traf Torricelli in Florenz bei Galilei ein, aber schon 3 Monate später starb dieser. Torricelli wurde alsdann vom Grossherzog zum Professor der Mathematik und Philosophie der Universität Florenz berufen und in dieser Eigenschaft entwickelte er eine sehr fruchtbare Tätigkeit: Untersuchungen über den freien Fall, den Nachweis der Erdrehung, verbesserte Fernrohre und Mikroskope. In der Hydraulik stammt das Gesetz über die Ausflussgeschwindigkeit von Flüssigkeiten von ihm. Von mathematischen Arbeiten sind die Berechnungen der Zykloiden sowie ballistische Studien erwähnenswert.

Was aber Torricelli zu Berühmtheit führte, war die Erfindung des Barometers und die damit verbundene erstmalige Erzeugung eines Vakuums (Torricellische Leere, 1643/44). Er füllte ein einseitig abgeschmolzenes Glasrohr mit Quecksilber, drehte das Rohr, indem er die Öffnung mit dem Finger verschloss, und stellte das Rohr mit dem offenen Ende in ein mit Quecksilber gefülltes Gefäß. Die Höhe der Quecksilbersäule hatte er im

voraus berechnet und vom Versuch bestätigt gefunden. Sie ist nicht durch das Vakuum, sondern durch den Luftdruck bestimmt. Das Torricelli-Experiment ist die einfachste Methode zur Erzeugung eines Vakuums und wird im Prinzip auch für moderne Vakuumpumpen verwertet. In der Elektrotechnik spielt das Vakuum eine grosse Rolle: Bei Glühlampen, Quecksilbergleichrichtern, Neonröhren, Radioröhren, um nur diese zu nennen, macht man davon Gebrauch. Auch bei den Wärmekraftmaschinen, angefangen bei der Feuermaschine von Thomas Newcomen über die Wattsche Dampfmaschine bis zu den neuesten Dampfturbinen wird das sich bei Kondensation bildende Vakuum ausgenutzt.

Torricelli hatte in seinem Testament den Wunsch ausgesprochen, zwei seiner Freunde möchten dafür besorgt sein, dass die noch «unveröffentlichten Werke» publiziert würden. Doch der eine seiner Freunde starb einen Monat nach ihm, der andere war der Aufgabe nicht gewachsen. Erst 1919 ging sein Wunsch in Erfüllung, als sein Gesamtwerk herauskam.

*H. Wüger*