

## 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 Messtürme 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 Blitzschlägen 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.

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 oscillogrammes, on a représenté statistiquement toutes les caractéristiques des courants de foudre, telles que valeur de crête, raideur de montée 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'oscillogrammes.

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.

### 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 benützt 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 Zweistrahl-Kathodenstrahl-Oszillographen-Röhren (KO) verfügbar. Zwei weitere kleine Einstrahl-KO dienen der Messung des Feldverlaufes im Turm 1 und der Aufzeichnung der Zeitmarkierung. Diese

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 Blitzschlag ge-

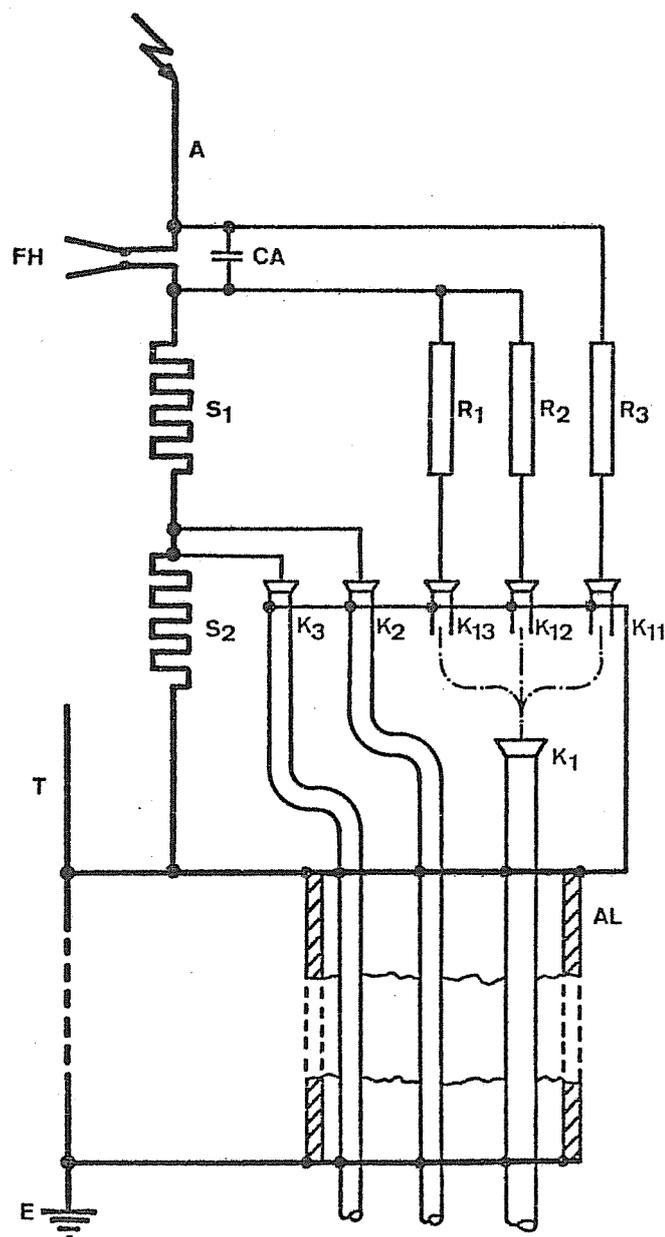
<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

<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 sirenenartigen 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 Feldmühlensegmenten 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 k $\Omega$
- $R_2$  Messwiderstand zu SO-Schleife 5000-A-Bereich, 7,0 k $\Omega$
- $R_3$  Messwiderstand für Glimmstrommessung 0...10 mA, 1 k $\Omega$
- T Turmstruktur
- $K_1$  altes Messkabel, enthaltend die Koaxialadern K 11...K 13 zur Messung der langdauernden Ströme, zur Auslösung des Schleifenoszillographen und zur Grundaufhellung des Kathodenstrahloszillographen (KO)
- $K_2$  Wellmantelkabel zur Auslösung der raschen Zeitablenkung des Kathodenstrahloszillographen
- $K_3$  Wellmantelkabel zur Messung der Stoßströme mit den Kathodenstrahloszillographen
- AL Aluminiumschutzrohr, bzw. Zoreskanal im Erdboden als äußerster Schirm
- E Erdung, bestehend aus den parallelgeschalteten Erdungsnetzen der Blitzmeßstation, der PTT-Anlageerde, dem Erdungsnetz der Seilbahnanlage und dem Wasserleitungsnetz auf dem San Salvatore

Im Ruhezustand ist die Blitzantenne durch das Funkenhorn (FH) von den Mess-Shunts getrennt. Kleine Glimmströme werden über  $R_3$  und  $K_{11}$  einem Registrier-Milliamperemeter 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 Schleifenoszillographen und der Grundaufhellung des Kathodenstrahloszillographen. Kurze Stromimpulse, entstanden durch Verschiebungsströme bei grossen Feldänderungen, werden im Auslösekondensator (CA) gespeichert, ohne dass eine Auslösung des Oszillographen erfolgt. Das Schema bezieht sich sinngemäss auf die Einrichtung pro Messturm.

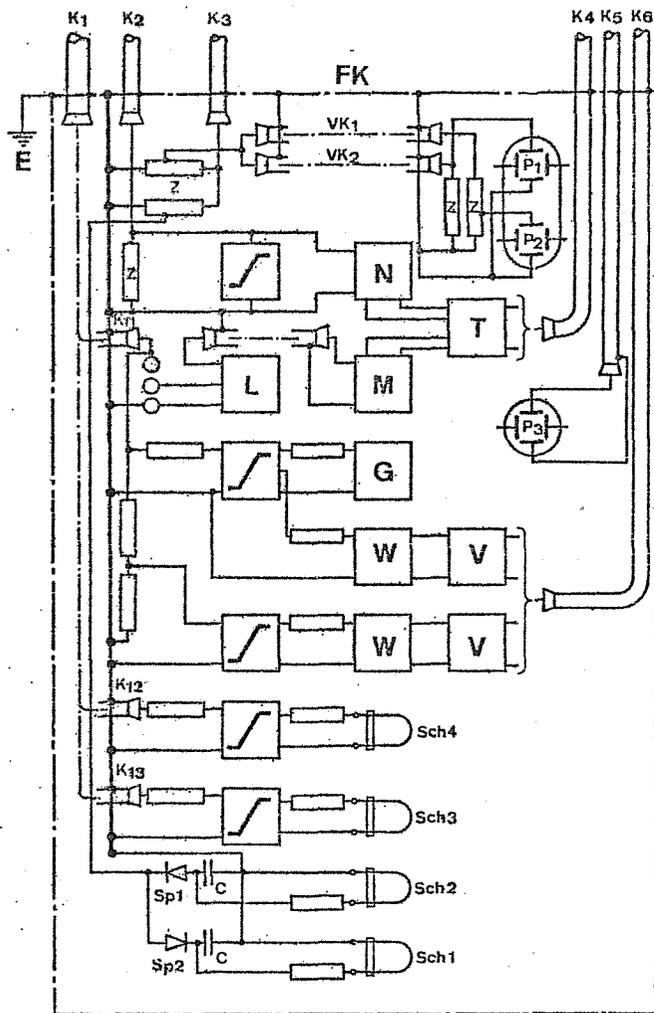


Fig. 2  
Messeinrichtungen im Blitzstrom-Messraum des «Antico Albergo»

FK	Faraday-Käfig
E	Erdung der gesamten Anlagen auf dem San Salvatore
K <sub>1</sub> ...K <sub>3</sub>	Zuleitungskabel vom Turm 1, nämlich:
K <sub>1</sub>	Altes Messkabel, enthaltend die Koaxial-Adern 11...13 für Strommessung durch den SO
K <sub>2</sub>	Wellmantel-Koaxialkabel zur Auslösung der raschen Zeitablenkung des KO
K <sub>3</sub>	Wellmantel-Koaxialkabel zur Messung von Stoßströmen mit dem KO
K <sub>4</sub> ...K <sub>6</sub>	Verbindungskabel zum Messraum «Kirche» und zur Feldmühle Turm 1, nämlich:
K <sub>4</sub>	Fernsteuerkabel zum Messraum «Kirche»
K <sub>5</sub>	Wellmantel-Koaxialkabel zur Feldmühle Turm 1
K <sub>6</sub>	PTT-Telephonkabel zum Messraum «Kirche»
	Zum Kathodenstrahloszillographen gehörend:
P <sub>1</sub> P <sub>2</sub>	KO Messplatten für Bereiche 65 kA und 200 kA
P <sub>3</sub>	Messplatten für elektrische Feldmessung (nur an Turm 1), 18 m über Turmbasis 1
VK <sub>1</sub> , VK <sub>2</sub>	Verzögerungskabel
Z	Abschlusswiderstände der Kabel
M	Auslöseelektronik für 1-s-Aufhellung (Grundaufhellung) des KO
N	Auslöseelektronik für Zeitablenkung und Vollaufhellung des KO
	Zum Schleifenoszillographen SO gehörend:
SP <sub>1</sub> , SP <sub>2</sub>	Speicherschaltung zur Messung der positiven und negativen Stoßstrom-Maximalwerte bis 200 kA mit dem SO
Sch <sub>1</sub> , Sch <sub>2</sub>	Meßschleifen zur Messung der positiven und negativen Stoßstrom-Maximalwerte bis 200 kA mit dem SO
Sch <sub>3</sub> , Sch <sub>4</sub>	Meßschleifen des SO zur Messung langdauernder Blitzströme der Strombereiche 300 bzw. 5000 A
L	Auslöse-Einheit für SO-Schleifenbeleuchtung
G	Registrier-Milliamperemeter zur Messung kleiner Glimm- und Verschiebungsströme in der Blitzantenne
W	Frequenzmodulator zur Übertragung gemessener Glimm- und Verschiebungsströme der Bereiche 7 mA bzw. 1 A auf den Magnetspeicher der Feldmühlmessungen im Messraum «Kirche»
V	Linienverstärker für die frequenzmodulierte Übertragung

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. 0,5 T, 1,5 T... in Fig. 4) kurzzeitig an Erde gelegt wird. Da dieses Kurzschliessen an Erde selbst unter Anwendung raschster 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 aufgezichnet. 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 Ausschnitt 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  $\frac{1}{50} \text{ s} \approx 10 \text{ ms}$ , die Dauer der vollen Abschirmung («Null-Zeit»)  $T/3 \approx 3,3 \text{ ms}$ . 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).

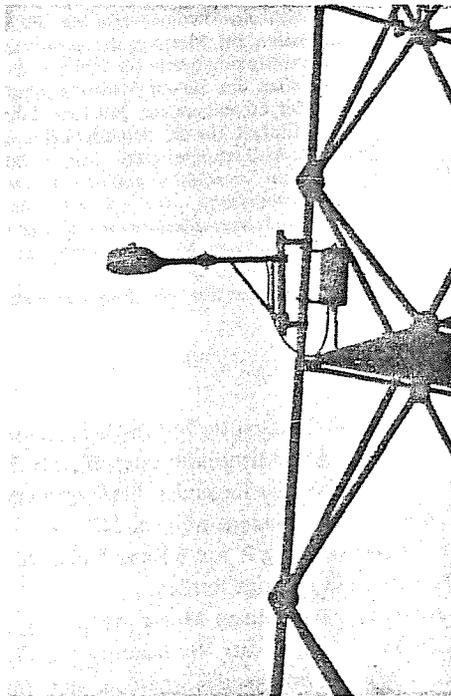
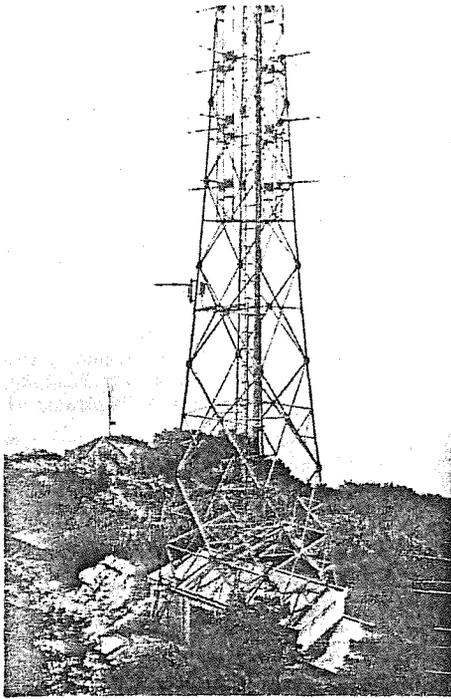


Fig. 3  
Messturm 1

- 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 benützt werden,

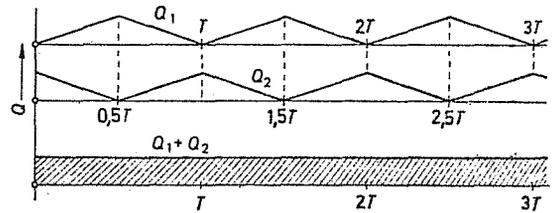


Fig. 4

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 Blitzeinschlags in die Messtürme 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 Oszillographer bedingt, in zweiter Linie durch die Trägerfrequenz von 13,5

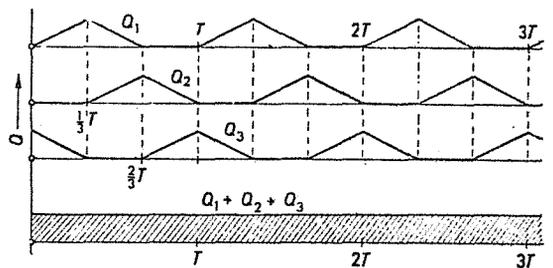


Fig. 5

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 Blitz einschlag aufgezeichnet, mit einem Papiervorschub von ca. 1 m/s bzw. 1 mm/ms.

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

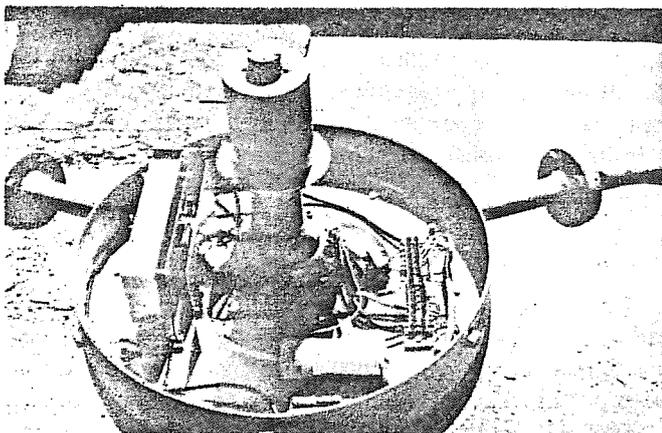
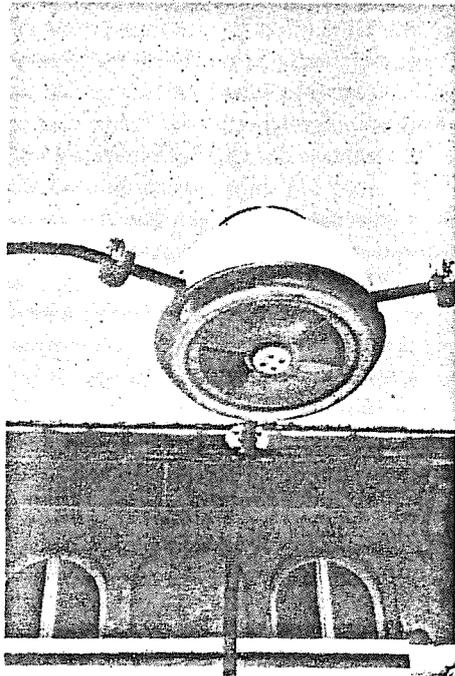


Fig. 6

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

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

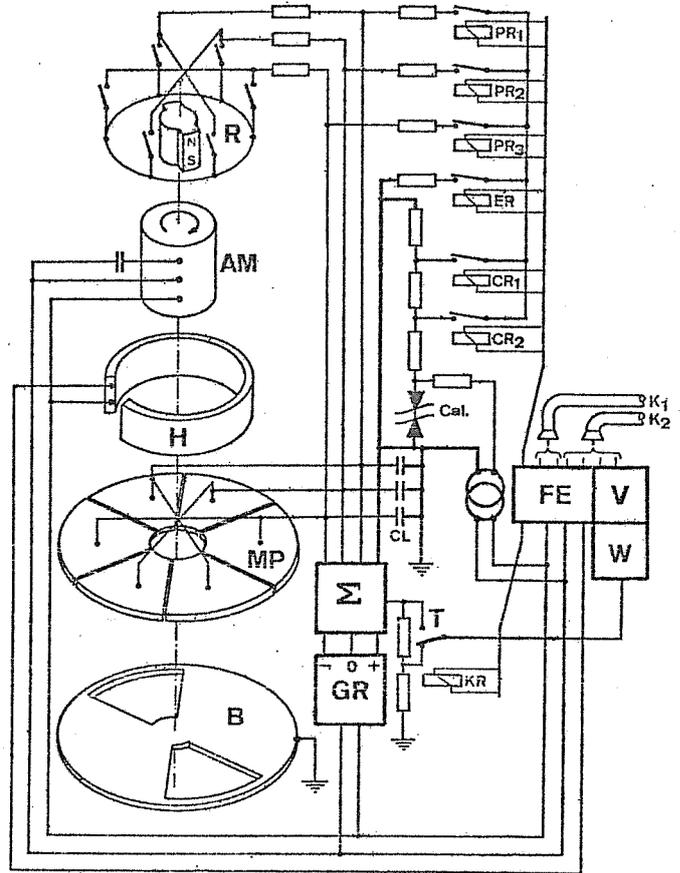


Fig. 7

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
- E Summationsverstärker, Nexus-Typ
- CL Belastungskapazität der Feldmühle
- Cal Eichspannungsquelle, stabilisiert mit Zener-Dioden
- PR(1...3) Parallelschaltrelais
- ER Erdungsrelais
- CR(1,2) Eichrelais
- T Spannungsteiler mit Umschalter
- KR Kanal-Wahl-Relais für zwei Empfindlichkeiten
- FE Fernsteuerempfänger und Messwert-Umformer
- K<sub>1</sub> Speisekabel 200 V + 0 + E
- K<sub>2</sub> 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
	<u>11,32 km</u>
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
	<u>5,62 km</u>
Pugerna Luftdistanz 2,5 km	4,53 km von $\varnothing = 0,6$ mm Cu
	4,13 km von $\varnothing = 1,0$ mm Cu
	<u>8,66 km</u>

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.

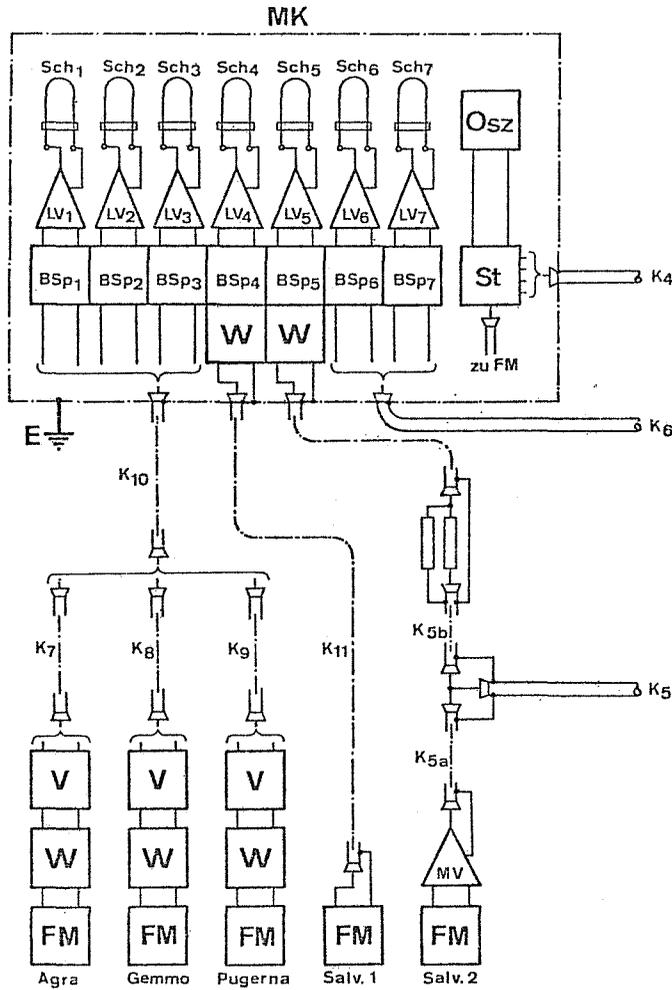


Fig. 8  
Blockschema der Feldmess-Einrichtungen.

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

## 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 benützt. 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 benützt 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 Entfernungen 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

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

Tabelle II

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	8	6	3	-	62	23. 3. bis 4. 10.
1965	3	-	4	10	11	14	11	10	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		1,3	6,2	11,2	13,6	13,6	12,8	7,9	1,9	1	69,5	

Gesamte Anzahl aufgenommener Ozzillogramme 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	1	2	108
1971	20	120	2	18	0	5	165
1963 bis 1971	106	732	27	102	5	54	1026

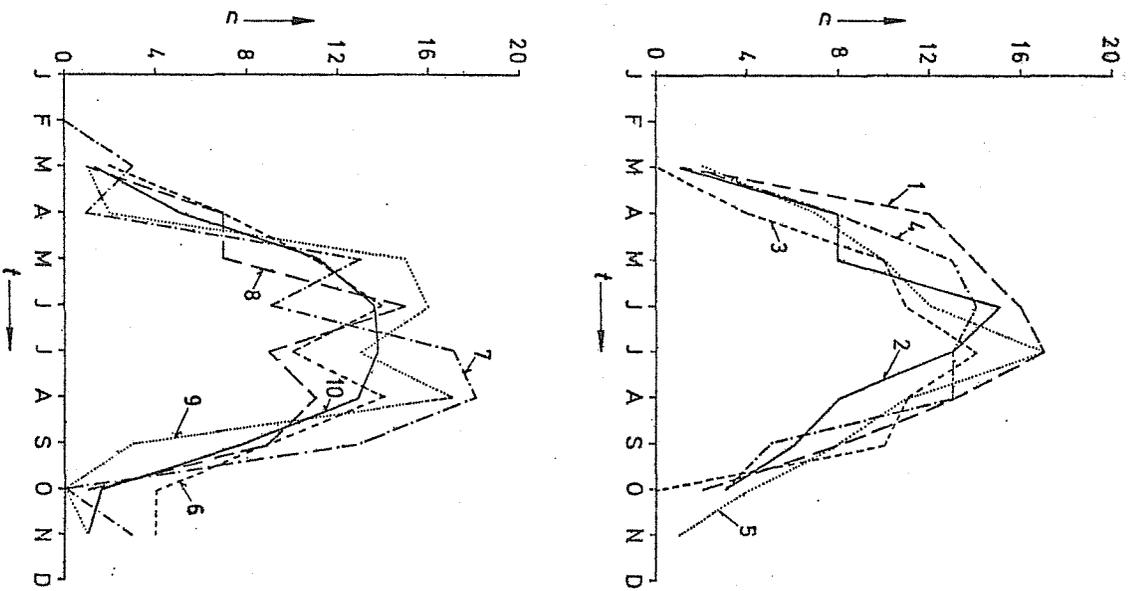


Fig. 9  
Anzahl Gewittertage (isoceraunic level) nach den Beobachtungen auf dem Monte San Salvatore 1963...1971  
Kurve 1...9 Gewittertage jeden Jahres 1963...1971  
Kurve 10 Mittelwert aller 9 Jahre  
n Anzahl Gewittertage pro Monat  
/ Bezeichnung der Kalendermonate

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 Blitzeinschläge, 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 Vorwachsrichtung. 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 Blitzeinschlägen 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 Blitzes 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 Kostenvorgütung 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

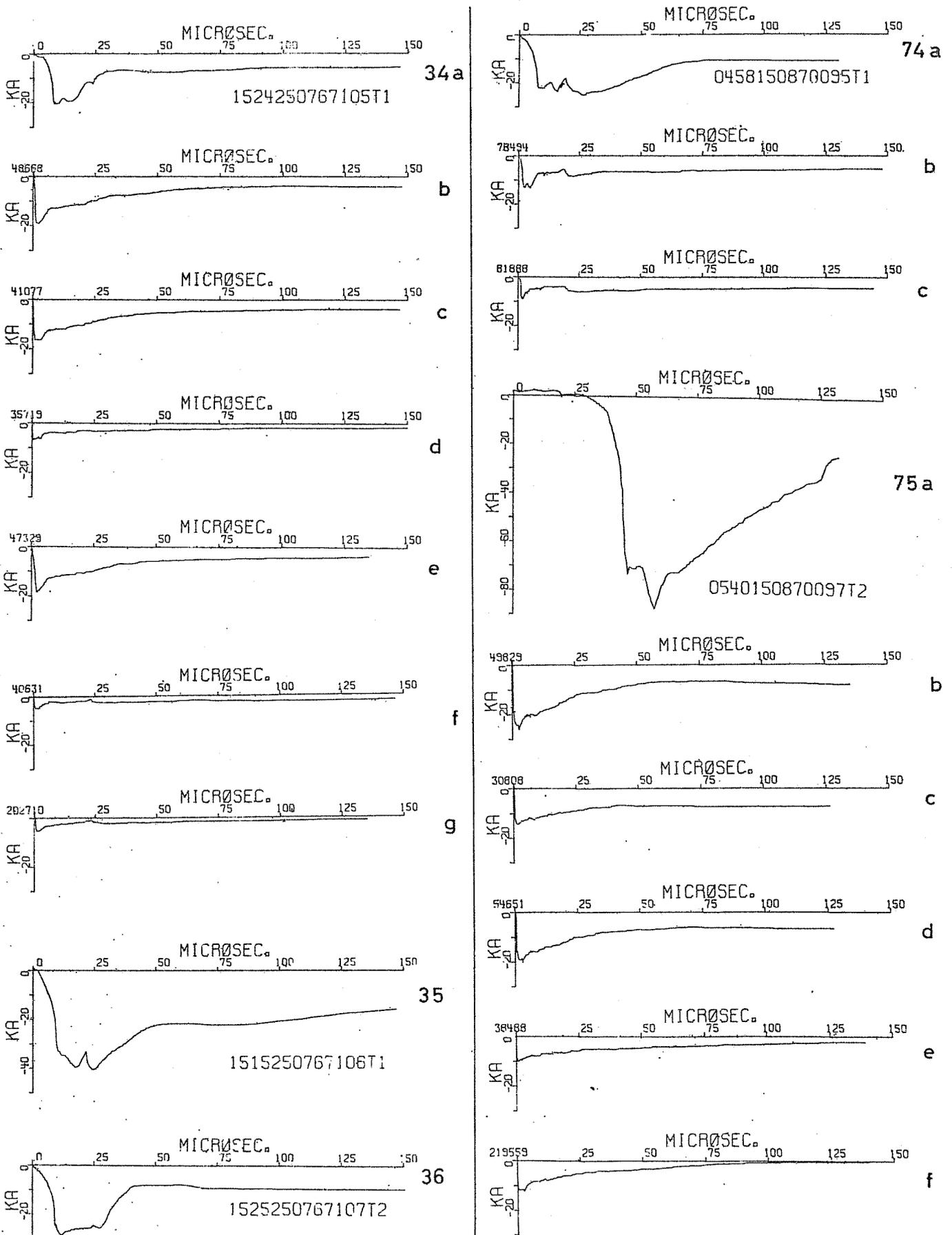
Anzahl Gesamtblitze mit der nachstehend bezifferten Anzahl Teilblitze 1... < 10 1963-1971

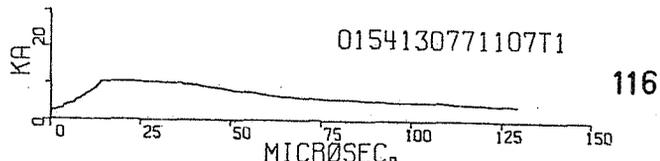
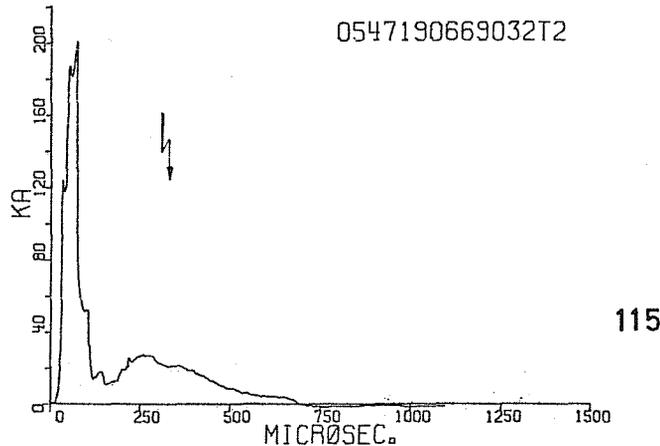
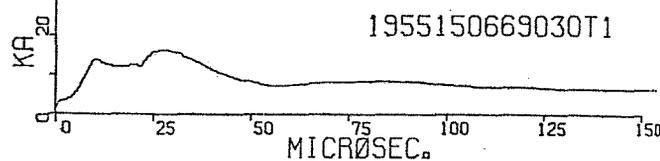
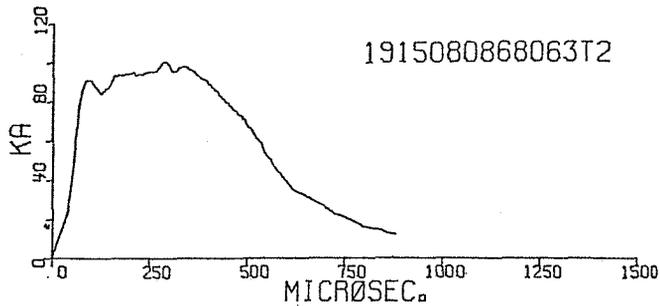
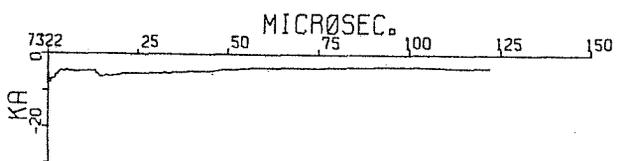
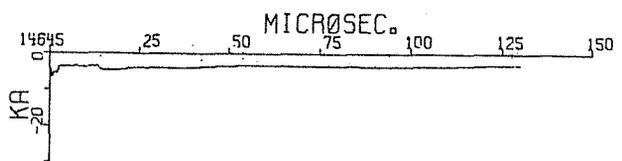
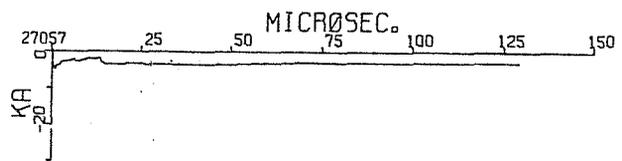
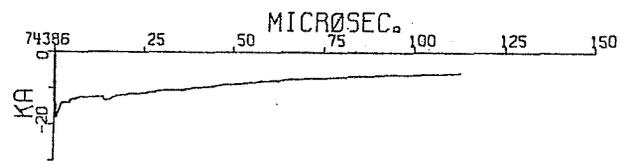
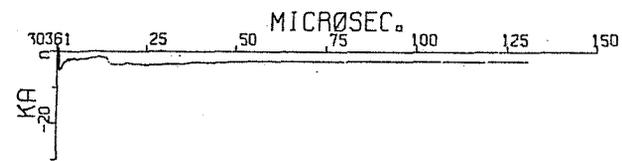
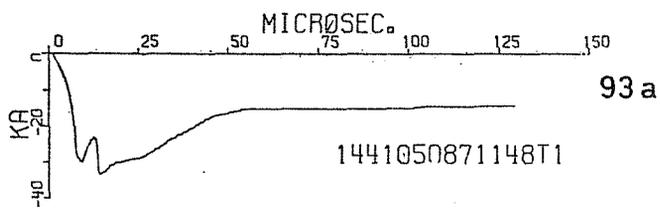
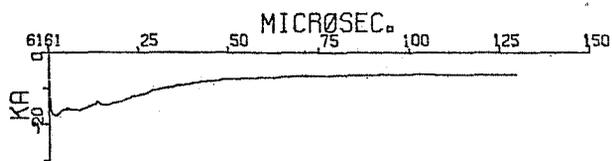
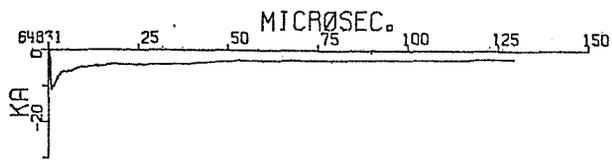
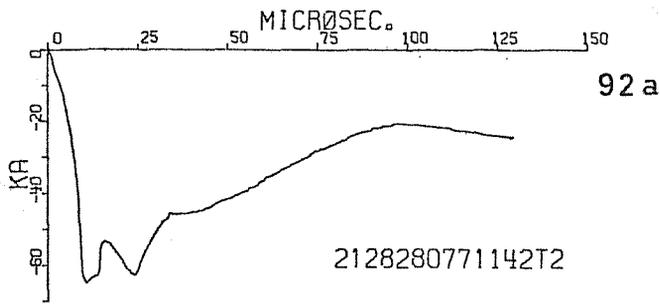
Tabelle V

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 Vor-entladung, 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) **Folgeblick** (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 Teilblitz (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 Messturmes 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 ( $di/dt$ ) 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 Blitzes 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/ $\mu$ s.

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  $\mu$ s 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-

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%-Vertrauensgrenze.

<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 Scheitelwert 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 kA/ $\mu$ s oder höher. Werte von 60 kA/ $\mu$ 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 Scheitelwert des Stromes auf und ist daher für den Blitzschutz von grundsätzlicher Bedeutung [5]. Grosse Steilheiten treten bekanntlich bei allen Folgeblitzen auf, deren Stromscheitelwerte 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  $\mu$ s bei grossen Stromscheitelwerten 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 kA führen, und
- ca. 0,2% aller pos. und neg. Abwärtsblitze mehr als 300 kA führen,

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

- ca. 10% aller positiven Abwärtsblitze mehr als  $10^7$  A<sup>2</sup>s führen, und
- ca. 0,5% aller pos. und neg. Abwärtsblitze mehr als  $10^7$  A<sup>2</sup>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 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  $R_e i$  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.

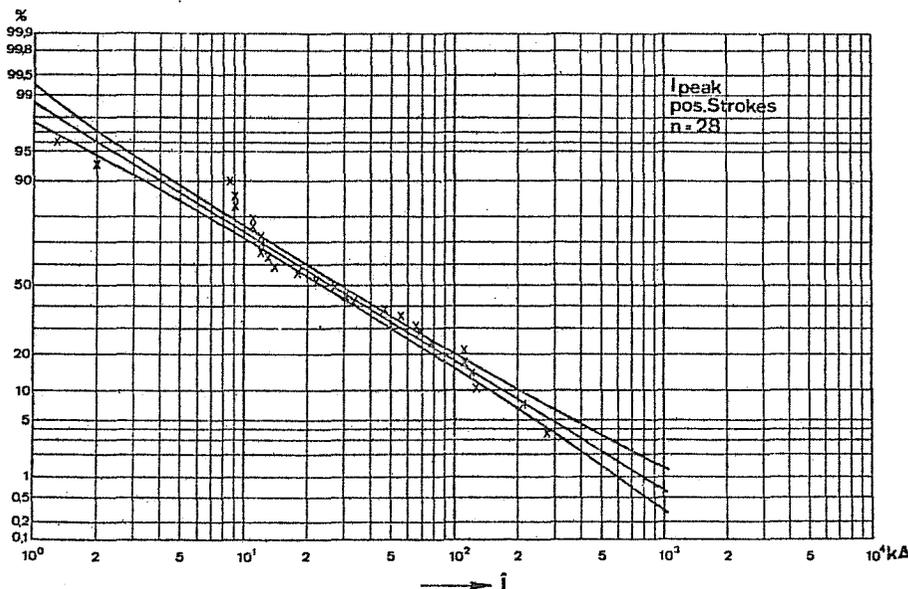


Fig. 11  
Häufigkeit verschieden hoher Blitzströme  $i$   
aller positiven Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

Fig. 12  
 Häufigkeit verschieden hoher Blitzströme  $i$   
 aller negativen Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

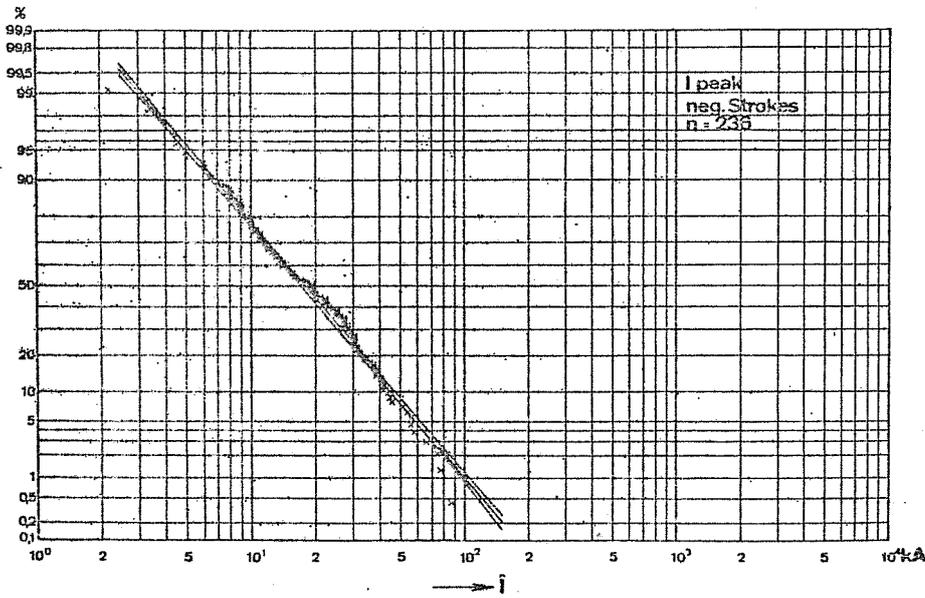


Fig. 13  
 Häufigkeit verschieden hoher Blitzströme  $i$   
 aller ersten Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

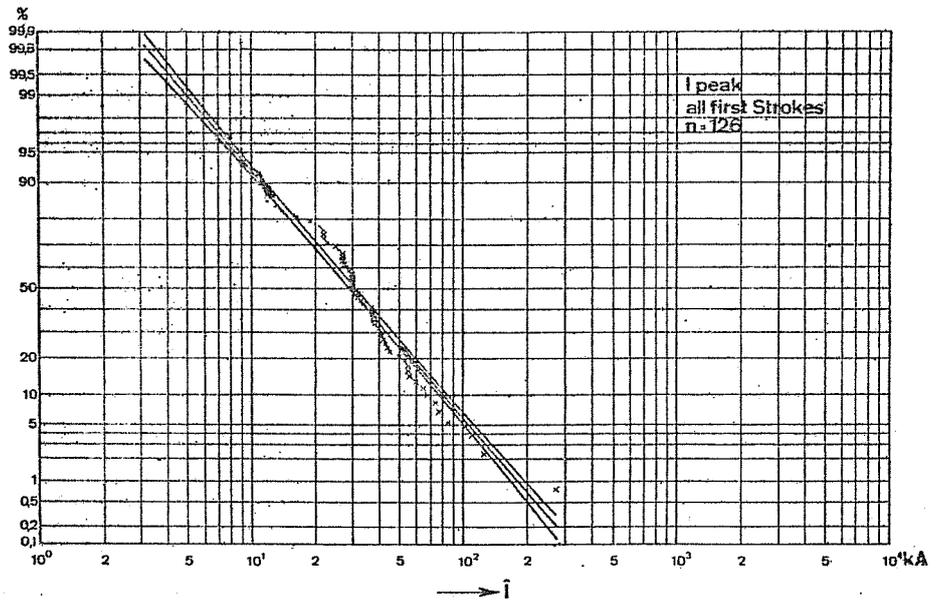


Fig. 14  
 Häufigkeit verschieden hoher Blitzströme  $i$   
 aller Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

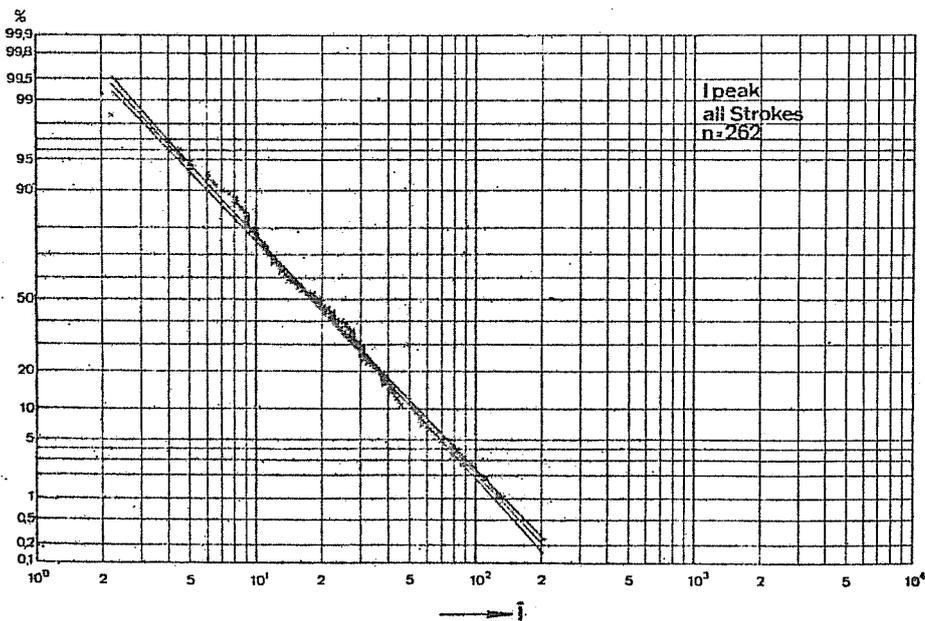


Fig. 15  
Häufigkeit verschiedener Frontdauern  $T$   
aller positiven Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

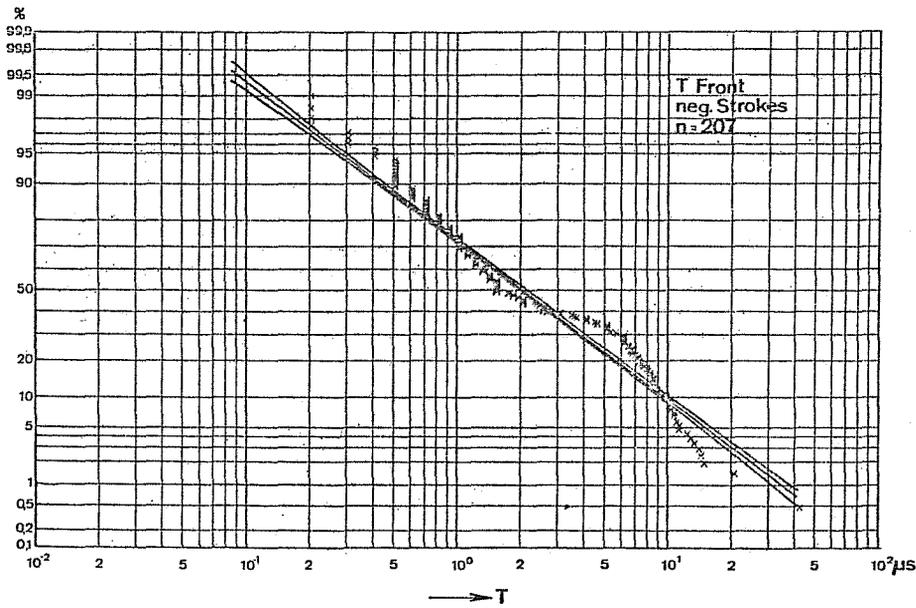
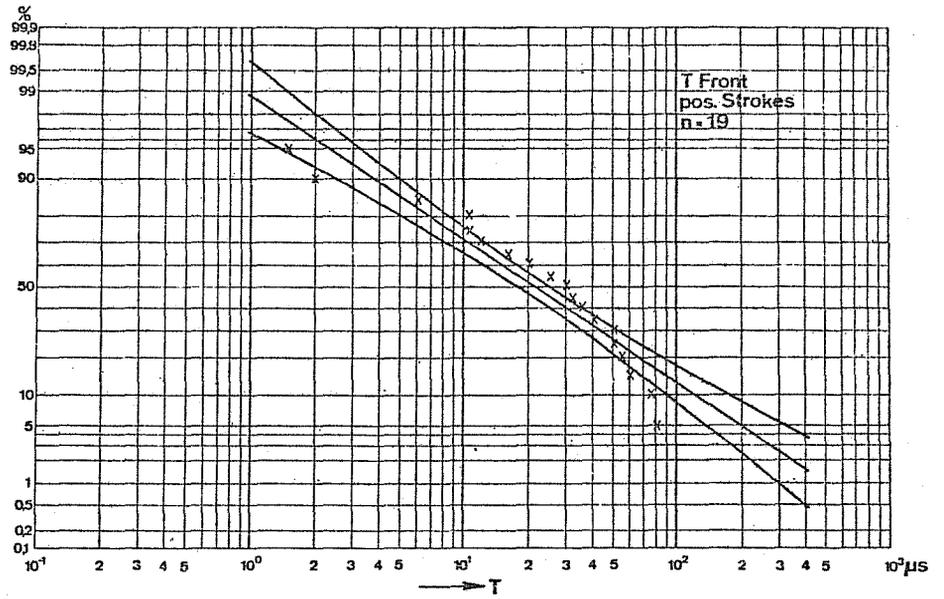


Fig. 16  
Häufigkeit verschiedener Frontdauern  $T$   
aller negativen Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

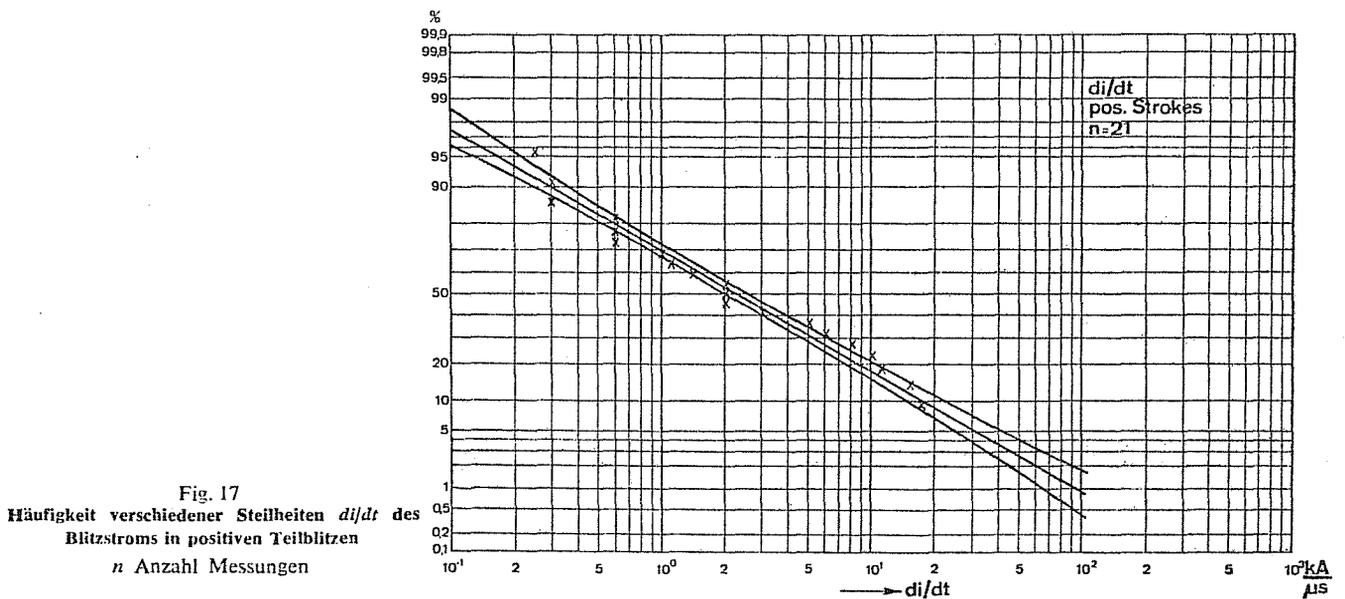


Fig. 17  
Häufigkeit verschiedener Steilheiten  $di/dt$  des  
Blitzstroms in positiven Teilblitzen  
 $n$  Anzahl Messungen

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

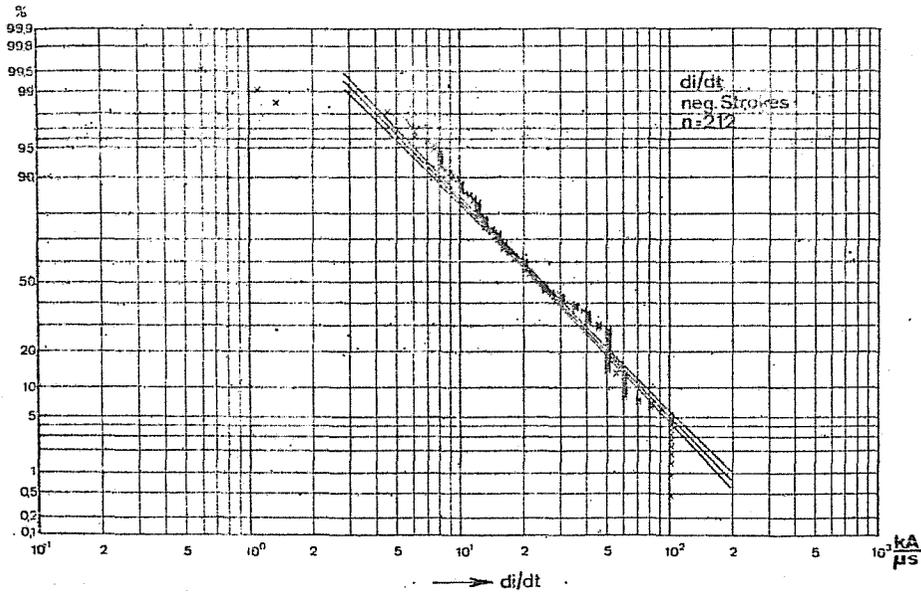


Fig. 19  
 Häufigkeit verschiedener Steilheiten  $di/dt$  des  
 Blitzstromes in allen ersten Teilblitzen  
 $n$  Anzahl Messungen

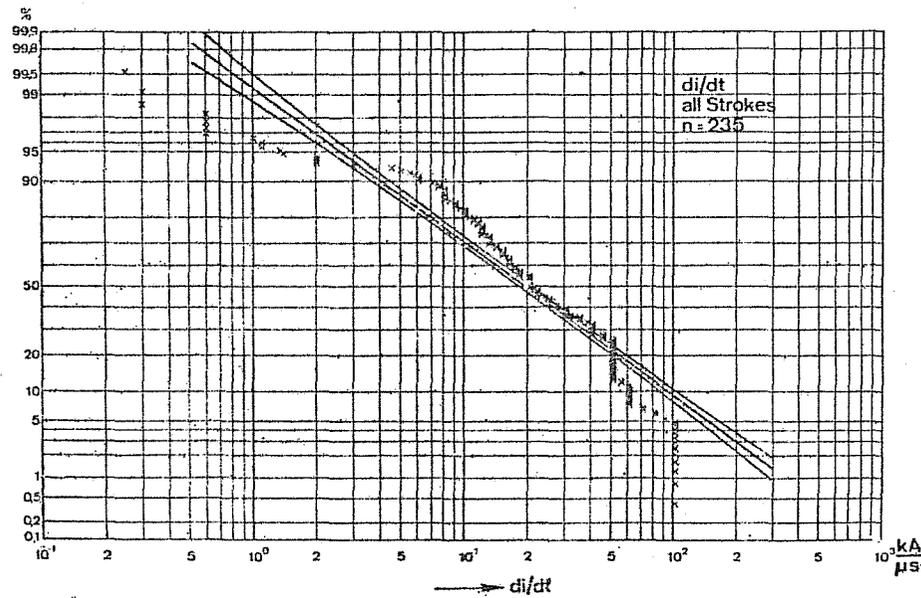
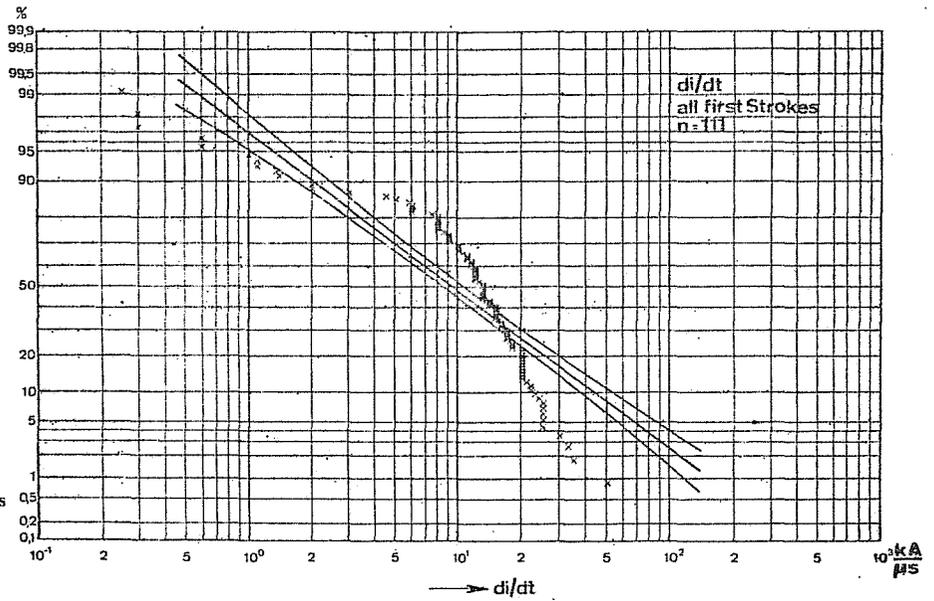


Fig. 20  
 Häufigkeit verschiedener Steilheiten des  
 Blitzstromes  
 $n$  Anzahl Messungen

Fig. 21  
 Korrelation zwischen Scheitelwert  $\hat{i}$  und Steilheit  $di/dt$  von positiven ersten Teilblitzen  
 $n$  Anzahl Messungen

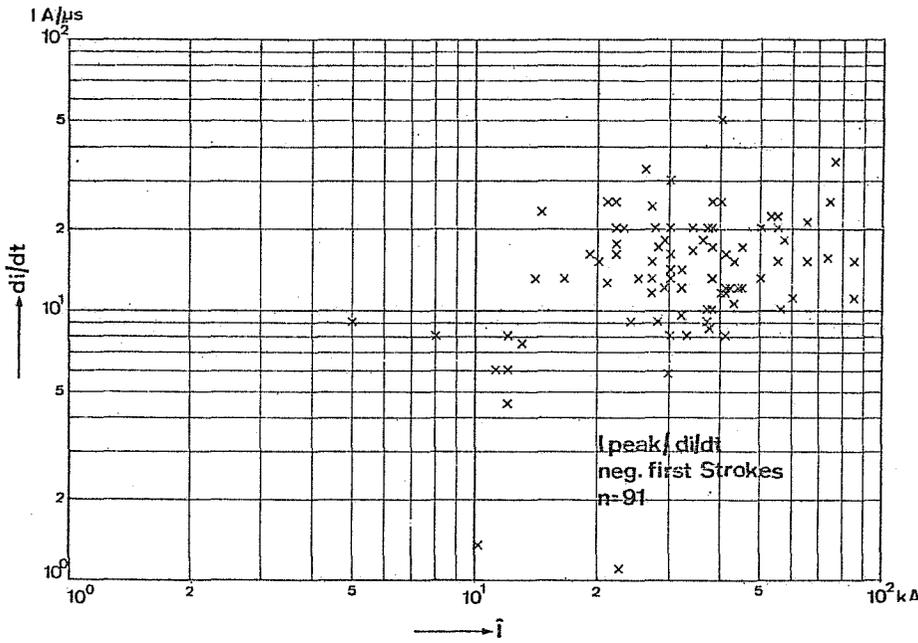
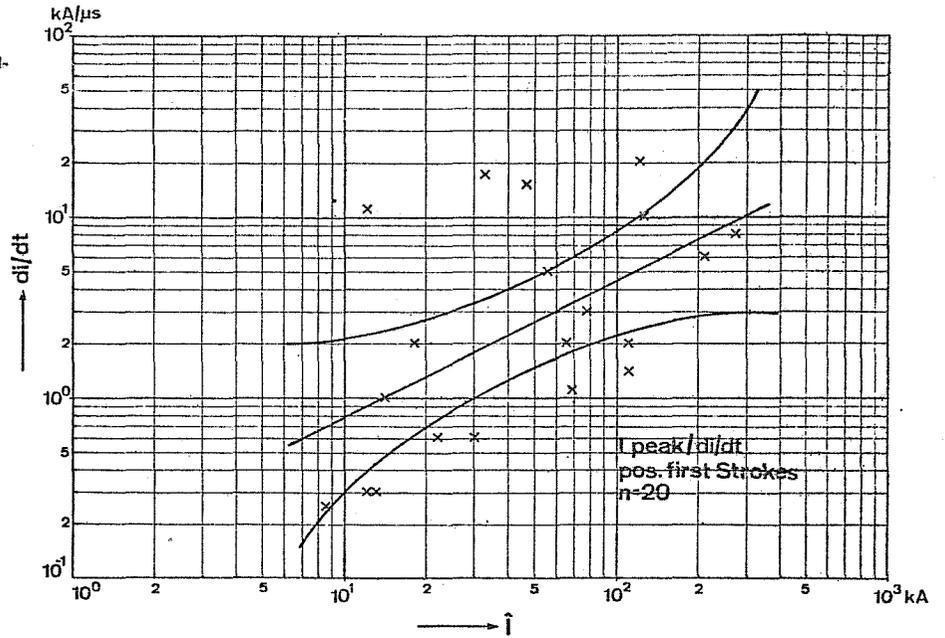


Fig. 22  
 Korrelation zwischen Scheitelwert  $\hat{i}$  und Steilheit  $di/dt$  von negativen ersten Teilblitzen  
 $n$  Anzahl Messungen

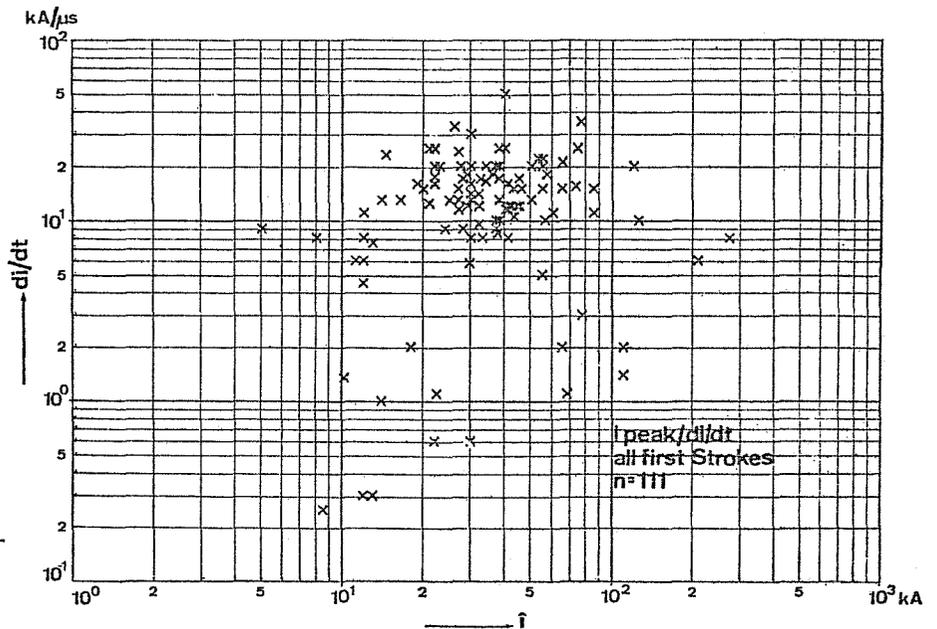


Fig. 23  
 Korrelation zwischen Scheitelwert  $\hat{i}$  und Steilheit  $di/dt$  von allen ersten Teilblitzen  
 $n$  Anzahl Messungen

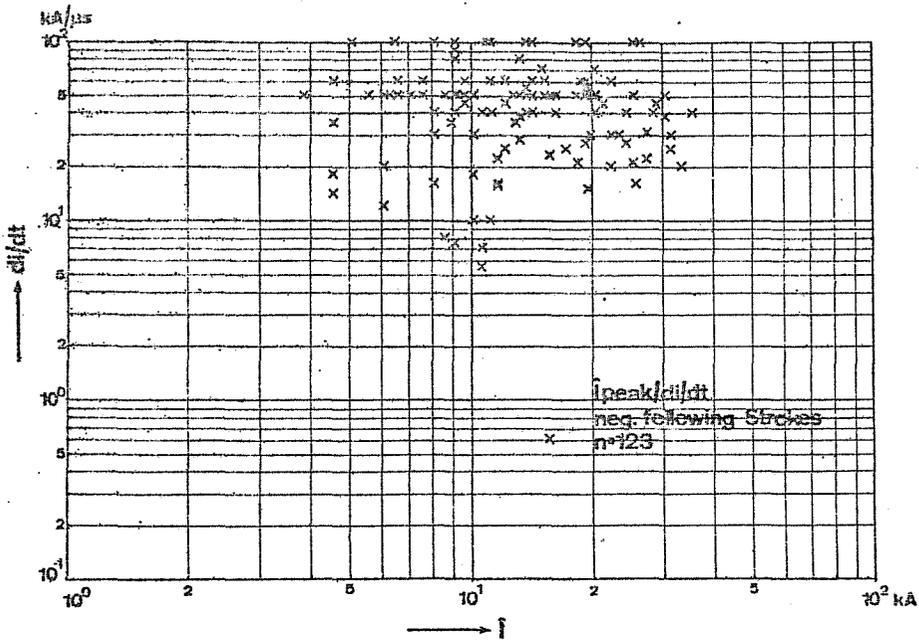


Fig. 24  
Korrelation zwischen Scheitelwert  $i$  und Steilheit  $di/dt$  von allen Folgebliitzen  
 $n$  Anzahl Messungen

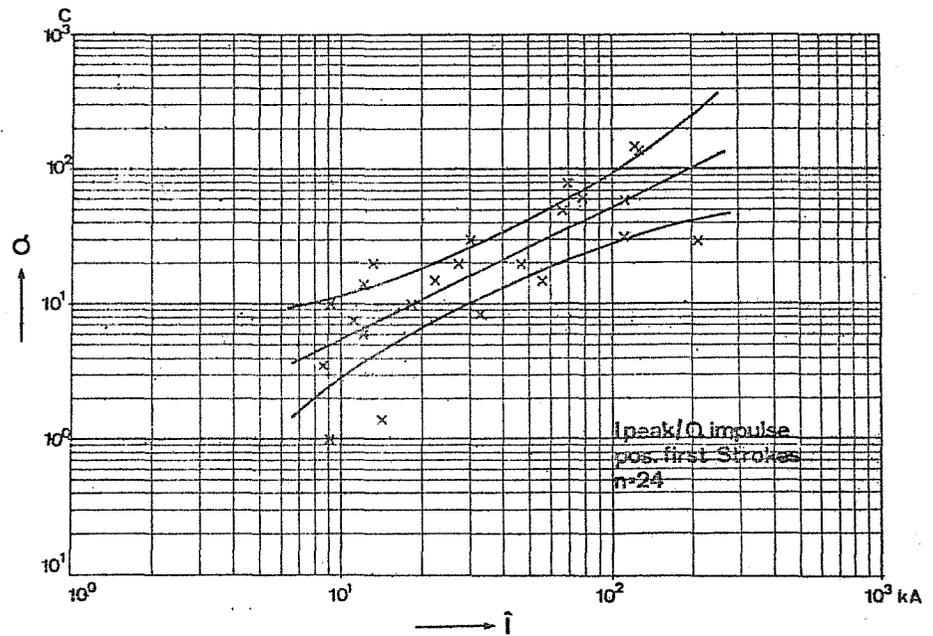


Fig. 25  
Korrelation zwischen Scheitelwert  $i$  und Ladung  $Q$  der ersten positiven Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

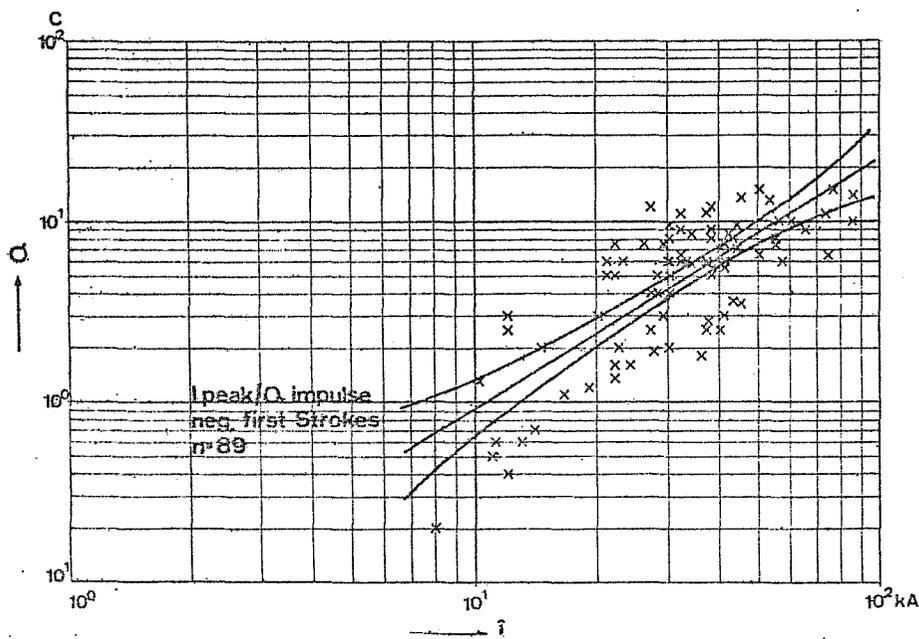


Fig. 26  
Korrelation zwischen Scheitelwert  $i$  und Ladung  $Q$  für den ersten negativen Teilblitz  
 $n$  Anzahl Messungen

Fig. 27  
 Korrelation zwischen Scheitelwert  $i$  und  
 Ladung  $Q$  für alle ersten Teilblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

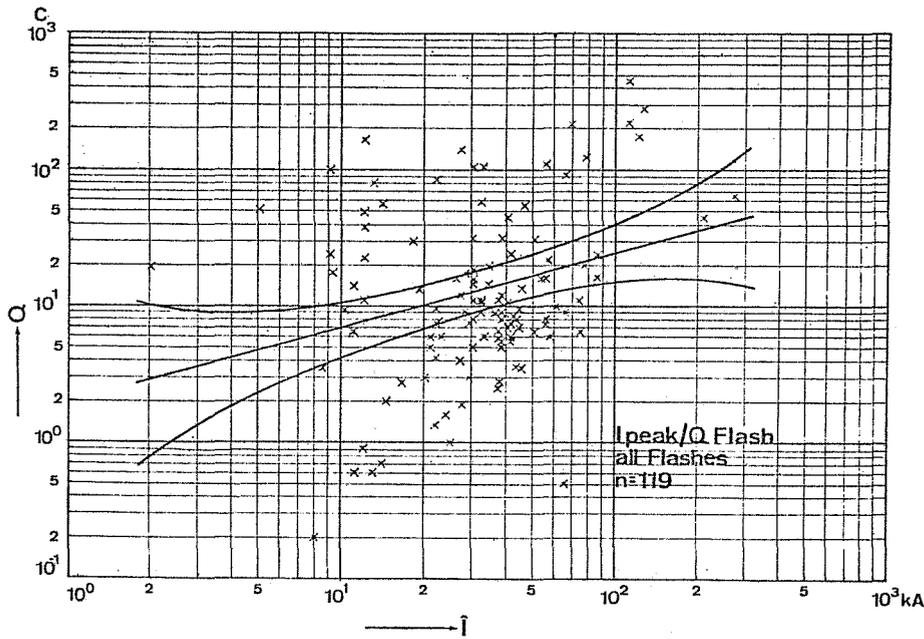
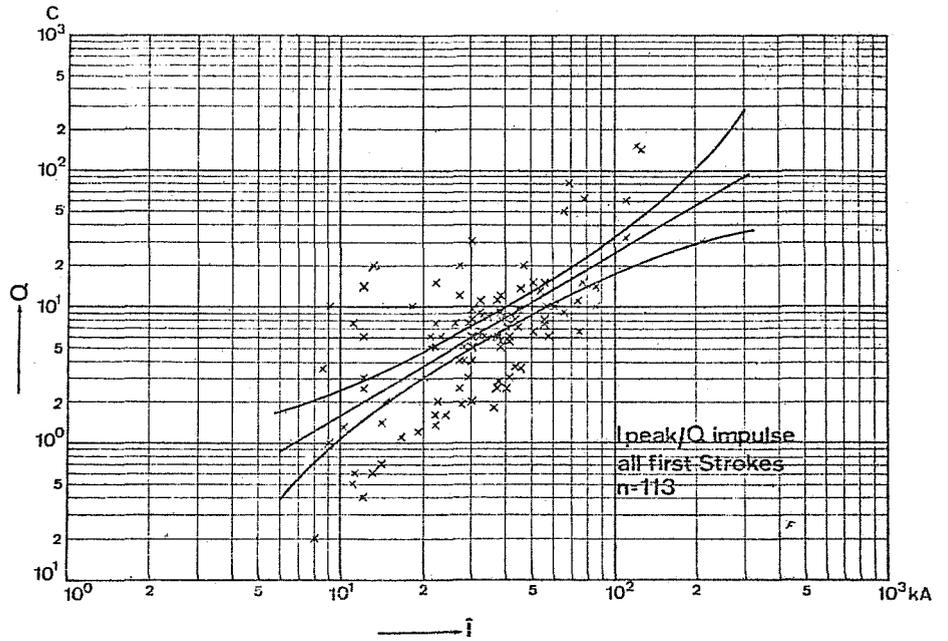


Fig. 28  
 Korrelation zwischen Scheitelwert  $i$  und  
 Ladung  $Q$  für Gesamtblitze  
 $n$  Anzahl Messungen

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

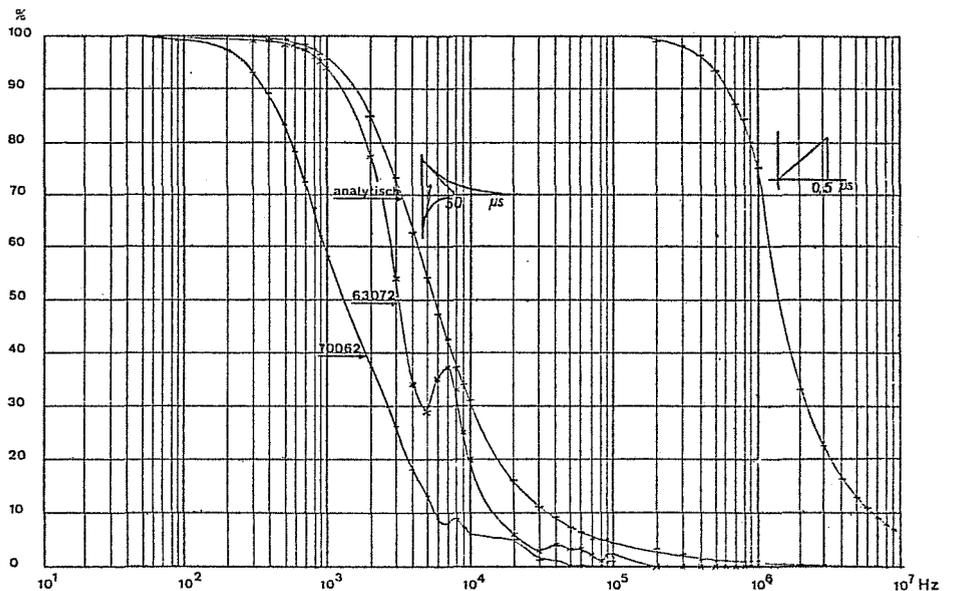


Tabelle VIII enthält eine Liste von 27 ausgeführten graphischen Darstellungen möglicher Korrelationen, insbesondere zwischen dem Stromscheitelwert und anderen Kenngrößen wie Ladung, Steilheit, Energie-Impuls und Dauer des Blitzstromes.  $n$  bedeutet die Anzahl Messungen. Davon werden nachstehend 8 Beispiele wiedergegeben, Fig. 21...28<sup>4)</sup>. Ausgeprägte Korrelationen sind vorhanden zwischen  $i$  und Impulsladung  $Q$  oder  $\int i dt$ , und zwischen  $i$  und  $i^2 dt$ , wenn nur der Strom-Impuls, nicht die längdauernde Stromkomponente berücksichtigt wird. Darin 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 Blitzeinschlag 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 («Blitz-ästen»), 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 Zusammenhanges 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 Impulsströmen 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. Andererseits 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 Bulletins 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*, Gstadtstrasse 31, 8702 Zollikon.

## Oszillographische Messungen des Feldverlaufs in der Nähe des Blitzeinschlags auf dem Monte San Salvatore<sup>1)</sup>

Von K. Berger

621.317.328 : 551.594.221

*Der Verlauf der elektrischen Feldstärke vor und während Blitzeinschlägen in den Monte San Salvatore wird anhand von Oszillogrammbeispielen beschrieben. Die gleichzeitig auftretenden Feldsprünge in der Umgebung des Berges werden damit und mit den Daten des Blitzstroms verglichen. Schliesslich wird das stufenförmige Vorwachsen von Abwärts- und Aufwärtsblitzen durch zwei typische neue Aufnahmen auf rasch bewegtem Film illustriert und aus einer Auswahl von etwa 3000 Blitzphotos eine kleine Anzahl schöner Blitzbilder wiedergegeben.*

*A l'aide d'exemples d'oscillogrammes, la variation du champ électrique avant et pendant des coups de foudre au Monte San Salvatore est décrite. Les sauts de champ qui se produisent simultanément aux alentours de la montagne sont comparés à cette variation et avec les caractéristiques du courant de foudre. Sont également reproduits la progression échelonné d'éclairs descendants et d'éclairs montants, par deux nouveaux enregistrements typiques sur film à déroulement rapide, ainsi que plusieurs belles images d'éclairs, choisies parmi quelque 3000 photographies.*

### 1. Einleitung

Die oszillographische Messung des Feldverlaufs in der nahen und weitem Umgebung des Einschlags während einer Zeitspanne vor, während und nach dem Blitz liefert wertvolle Hinweise über die Art des physikalischen Vorgangs, der zum Einschlag führt.

Zur Vornahme solcher Messungen wurde von der Forschungskommission für Hochspannungsfragen (FKH) im Jahre 1967 eine sog. «Feldmühle» klassischer Bauart ausgeführt und am Blitzmessturm auf dem Gipfel des Monte San Salvatore eingebaut. Eine Beschreibung dieser Feldmühle und der ersten damit gewonnenen Resultate findet sich in einem Bericht an die «Cigré» 1968 [1]<sup>1)</sup>. Die obere Grenzfrequenz dieser Feldmühle liegt bei ca. 1200 Hz, so dass Änderungen der Feldstärke innert einer Millisekunde nicht erfasst werden können. Zur Erweiterung des Frequenzbereichs und zur Verminderung des sirenenartigen Geräusches der ersten Feldmühle wurde dann 1969 mit finanzieller Unterstützung durch den Schweizerischen Nationalfonds ein neuer Feldmühlentyp nach einem Vorschlag von E. Vogelsanger gebaut. Resultate und Auswertungen neuer Feldmessungen beim Einschlag von Abwärtsblitzen werden nachstehend beschrieben.

### 2. Einbau der Feldmühlen

Die 1969 gebauten neuen Feldmühlen wurden in gleicher Weise wie die Feldmühle klassischer Bauart aus dem Jahre 1967 mit nach unten gerichteter und dadurch regengeschützter Messplatte montiert. Während die «alte» Feldmühle seitlich am Messturm 1 angeordnet ist, wurden die 4 neuen Apparate auf je einem Dreibein 2,5 bis 3 m hoch über dem Boden aufgestellt, wie das aus den Fig. 2...5 hervorgeht. Die Aufstellungsorte sind in der Karte von Fig. 1 eingetragen, es sind die folgenden:

- Punkt 1: Sanatorium *Agra*, Einbau nach Fig. 2;
- Punkt 2: Schaltkabine *Gemmo*, Einbau nach Fig. 3;
- Punkt 3: Zollhaus *Pugerna*, Einbau nach Fig. 4;
- Punkt 4: Aussichtsterrasse *San Salvatore*, Einbau nach Fig. 5

Punkt 5 ist ein Bezugspunkt für Messungen des Schönwetterfeldes, ohne Feldmühle.

### 3. Messeinrichtung

Das Schema der Feldmessungen wurde mit der Gesamtdarstellung der Messeinrichtungen auf dem Monte San Salvatore in den Jahren 1963 bis 1971 bereits beschrieben [2]. Die Einrichtung wurde im Laufe des Sommers 1971 noch ergänzt durch eine sehr empfindliche Vorstrommessung an der isolierten Spitze des Messturmes 1. Zu diesem Zweck wurde das Strombegrenzungsfilter für die Dauerregistrierung des Glimmstroms an zwei Stellen angezapft, so dass zwei empfindliche Strombereiche für die Vorstrommessung entstanden. Deren Speicherung auf einem geschlossenen Magnetband mit 5 s Umlaufzeit erlaubt, Ströme der Grössenordnung von 1 mA, die dem Blitzeinschlag vorangehen, im gleichen Zeitmaßstab wie das elektrische Feld mit einer Grenzfrequenz von 4 kHz zu registrieren.

Ein erster Messbereich ist so gewählt, dass die Aufzeichnung bis zu ca. 7 mA mit ca. 30 mm Ausschlag im Originaloszillogramm linear erfolgt (Bezeichnung *i<sub>7</sub>*). Bei grösseren Strömen ist der Ausschlag auf ca. 40 mm begrenzt.

Ein zweiter Messbereich erfasst Ströme von 1 A mit ca. 15 mm im Original linear, grössere Ströme nicht linear mit maximal ca. 27 mm. Der Strom wird durch das Ansprechen der Funkenstrecke auf dem Turm auf ca. 4 A begrenzt. Der grösste Messwert ist 1,3 A. Der Verlauf der Vorstromkurven zeigt, dass es sich in erster Linie um Verschiebungsströme handelt, die beim raschen Ansteigen und beim plötzlichen Zusammenbruch des Feldes entstehen.

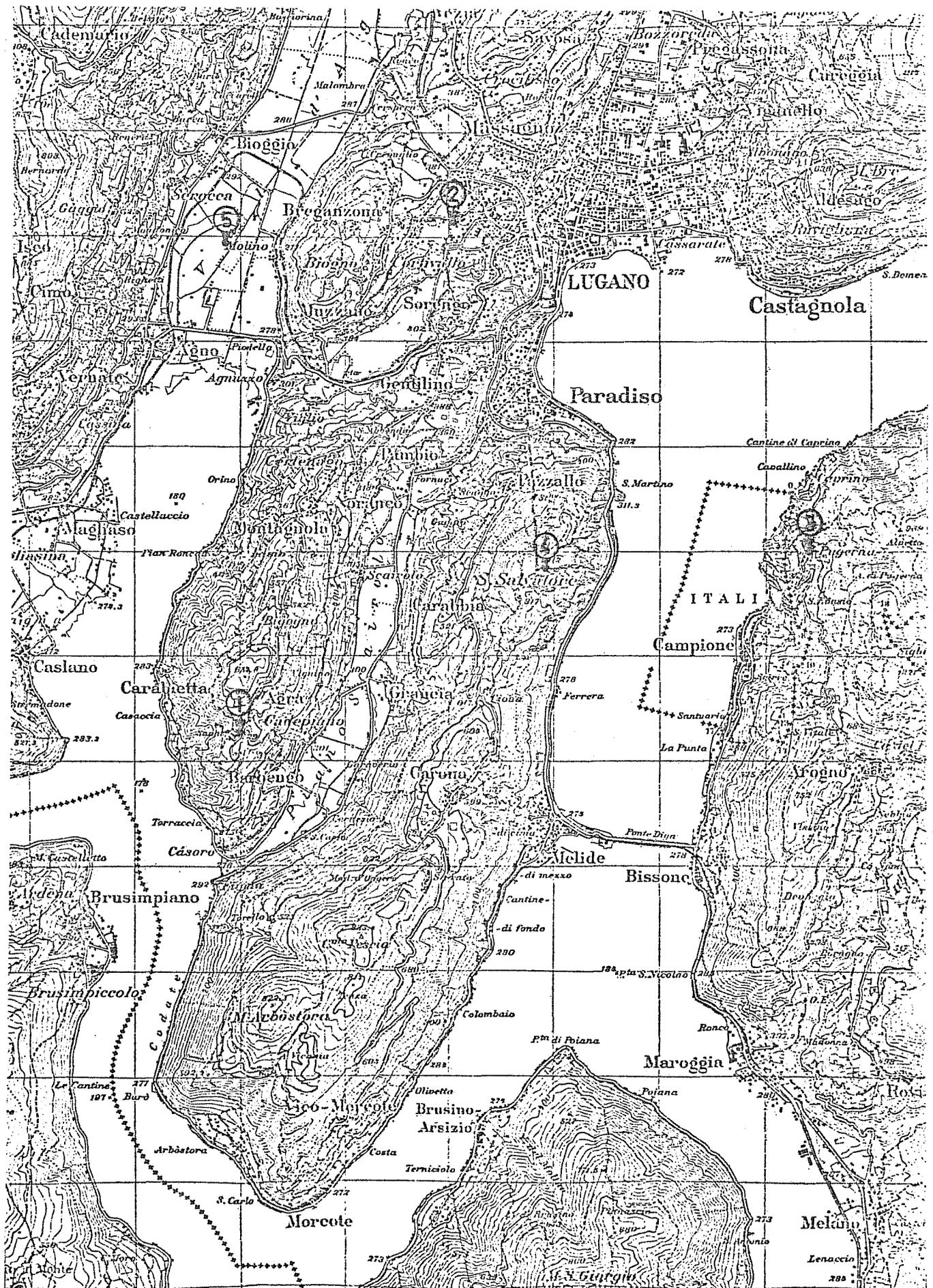
Der Strom an der Turmspitze setzt oft ausserordentlich scharf ein. Sein Verlauf bildet die empfindlichste Anzeige für rasche Feldänderungen vor und während des Blitzes und damit auch für die gesamte Dauer des sichtbaren und unsichtbaren Blitzvorganges.

### 4. Oszillogramm-Beispiele

Nachstehend werden ausschliesslich die Resultate der Feldmühlen-Messungen der Gewitterperiode 1971 wiedergegeben, da erst im Sommer 1971 alle Feldmühlen funktionstüchtig waren. Bei 16 Abwärtsblitzen zum Monte San Salvatore gelang die gleichzeitige Registrierung des Feldes auf dem San Salvatore

<sup>1)</sup> Siehe auch Bull. SEV 63(1972)24, S. 1403...1422.

<sup>2)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.



Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopographie

Fig. 1  
 Geographische Lage der Messpunkte mit neuen Feldmühlen  
 1 Agra 3 Pugerna  
 2 Gemmo 4 Monte San Salvatore

und in den drei Aussenstationen zusammen mit der Blitzstromregistrierung auf dem Berg. 11 Beispiele des Feldverlaufs, wie er über den Magnetspeicher aufgezeichnet wurde, zeigt Fig. 6a...6l. Die Oszillogramme tragen folgende Nummern: 17, 33, 107, 115, 116, 139, 141, 142, 148, 167 und 168. Darin bedeuten:

- A Feldverlauf mit Nulllinie in Agra, Maßstabstrecke A zum Teil 10 kV/m, zum Teil 30 kV/m
- G Feldverlauf mit Nulllinie für Gemmo, Maßstabstrecke G zum Teil 10 kV/m, zum Teil 30 kV/m
- P Feldverlauf mit Nulllinie für Pugerna, Maßstabstrecke P zum Teil 10 kV/m, zum Teil 30 kV/m
- S1 Feldverlauf mit Nulllinie für San Salvatore, Aussichtsterrasse auf dem Kirchendach, Maßstabstrecke S1 = 100 kV/m
- S2 Feldverlauf und Nulllinie für San Salvatore, Turmflanke, Maßstabstrecke S2 (Bandbreite) = 100 kV/m, Frequenz ca. 1150 Hz

Der Zeitmaßstab aller Oszillogramme ergibt sich aus obiger Frequenz, er beträgt im Original ca. 1...1,2 ms/mm.

### 5. Tabellarische Zusammenstellung der gemessenen Feldstärken

Die zahlenmäßige Auswertung der bereits erwähnten 16 Abwärtsblitze ist in Tabelle I wiedergegeben. Darin sind für jede Oszillogrammnummer folgende Angaben enthalten:

a) Blitzstrom-Scheitelwert  $i$  und gesamte Ladung  $Q$  eines Blitzes (Flash) zu den Messstürmen, gemäss Auswertung der Strom-Oszillogramme;

b<sub>1</sub>) Stationäre Feldstärke vor dem Beginn der Feldstärkeschwankungen der Blitzvorentladung oder kurz «Feldstärke vor dem Blitz», gemessen in kV/m<sup>3</sup>;

b<sub>2</sub>) Bei den Kolonnen «San Salvatore» ausserdem die grösste Feldstärke während des Blitzeinschlages, in kV/m<sup>3</sup>;

b<sub>3</sub>) Stationäre Feldstärke nach Beendigung der Feldstärkeschwankungen des Blitzes oder kurz die «Feldstärke nach dem Blitz», in kV/m<sup>3</sup>;

c) Feldstärkesprünge an allen fünf Messorten (Agra, Gemmo, Pugerna, San Salvatore 1 und 2) infolge von Teilblitzen (strokes) in

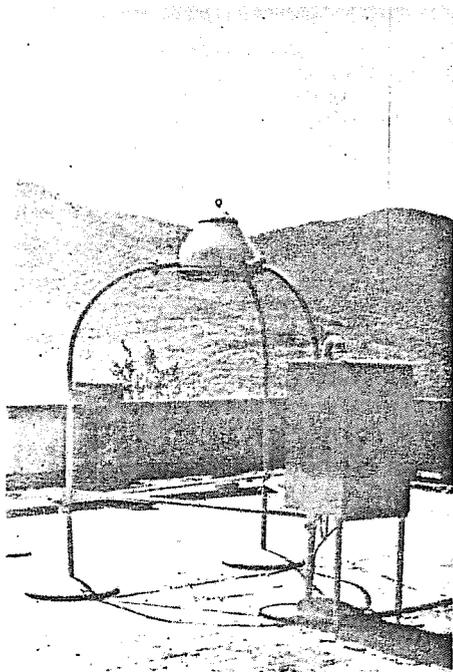


Fig. 2  
Einbau der Feldmühle auf dem Dach des Sanatoriums Agra

<sup>3</sup>) Die Zahlenwerte zu a), b), c) sind in der Tabelle I untereinander gesetzt.

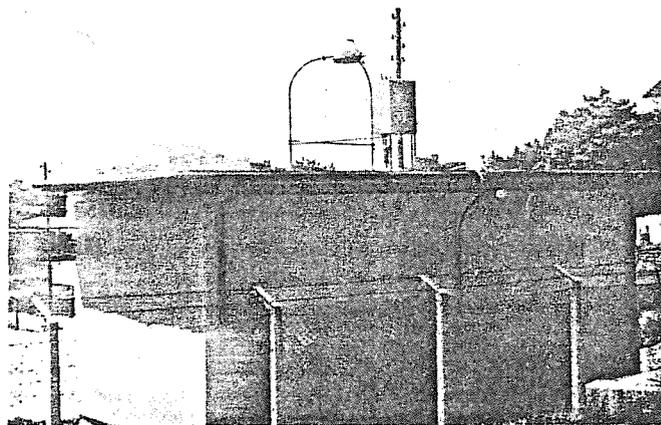


Fig. 3  
Einbau der Feldmühle auf dem Dach der Schaltkabine Gemmo des Elektrizitätswerkes Massagno

den San Salvatore, genauer infolge der Stromimpulse von Teilblitzen, die sich bei negativen Blitzen immer, bei positiven in der Regel innert 1 ms abspielen. D. h. es wird der Mittelwert  $\Delta E/\Delta t$  für die Dauer von 1 ms angegeben (kV/m/ms).

d) Dauer der Vorentladung vor dem Blitzeinschlag; bei Mehrfachblitzen Dauer bis zur ersten Vorentladung plus dem Zeitintervall bis zum zweiten Teilblitz;

e) Aus den Feldstärkeschwankungen ersichtliche Dauer des Leitblitzes (leaders);

f) Auf Grund der Feldstärkeschwankungen ermittelte Gesamtdauer des Blitzes.

### 6. Vorzeichen und Empfindlichkeit

Bezüglich der Vorzeichen wird daran erinnert, dass in gleicher Weise wie bei den früheren Berichten Folgendes gilt:

Der aus einer negativ geladenen Wolke zur Erde fließende Strom wird mit dem negativen Vorzeichen versehen, gilt somit als negativer Strom. Ebenso wird die auf der Erdoberfläche unter einer negativen Wolke entstehende Feldstärke  $E$  mit negativem Vorzeichen versehen und gilt somit als negative Feldstärke. Umgekehrt erzeugt eine positive Wolkenladung einen positiven Strom zur Erde und eine positive Feldstärke an der Erdoberfläche. Alle Vorzeichen richten sich somit bei dieser Konvention nach der Polarität der Wolkenladung.

Unter einer negativen Wolkenladung bildet die Turmspitze die positive Elektrode mit einer nach oben gerichteten Feldstärke, die nach obiger Definition das negative Vorzeichen trägt. Unter einer positiven Wolke bildet der Turm die negative Elektrode, mit den einer solchen entsprechenden Entladungserscheinungen.

Die Empfindlichkeit der auswärtigen Feldmühlen ist derart eingestellt, dass mit Oszillogramm-Ausschlägen von 1 mm entweder  $E$ -Werte oberhalb 1 kV/m oder oberhalb 3,5 kV/m erfasst werden können, je nach dem wählbaren Übertragungskanal 1 oder 2. Schwierigkeiten infolge Übersteuerung der Übertragung führten dazu, dass teilweise der weniger empfindliche Kanal benützt wurde, was, wie die Erfahrung zeigte, die Auswertung des Zusammenhangs zwischen Blitzladung und Feldstärkesprung unmöglich machte. Der Zeitmaßstab der Oszillogramme entspricht ca. 1 mm pro ms im Original, so dass im Hinblick auf die Grenzfrequenz der Übertragung und des Oszillographen (ca. 4 kHz) die Millisekunde (ms) noch sicher auswertbar ist.

Alle in der Tabelle genannten Feldstärkewerte stellen die unmittelbar vor der Messplatte der Feldmühlen vorhandenen

Feldstärken dar. Diese Werte sind der Eichung genau zugänglich, wozu eine grosse Metallplatte vor der Feldmühle auf Gleichspannungen oder Wechselspannungen bekannter Grössen gebracht wird. Die Übertragung dieser Feldstärkewerte auf eine ebene Umgebung muss mittels des Feldbildes geschehen, z. B. durch Ausmessung im elektrolytischen Trog.

### 7. Diskussion der Feld-Oszillogramme, 4 Beispiele

Beim Betrachten der Oszillogramme des Feldverlaufes auf dem Monte San Salvatore kommen zwei grundsätzlich verschiedene Typen der Blitzbildung zum Vorschein:

a) Blitze, deren Leader plötzlich aus einem während mindestens Sekunden konstanten Feld einsetzt, der nach 5...50 ms zum Einschlag führt. Beispiele dazu sind die Oszillogramme 116, 139, 140, 141, 142, 148, 166, 167, 168.

b) Blitze, deren Leader erst im Verlauf von unregelmässigen Feldschwankungen, die offenbar von Entladungen innerhalb der Wolken herrühren, einsetzen. Beispiele dafür sind insbesondere die Oszillogramme 33 und 107, weniger ausgeprägt auch die Oszillogramme 02, 17, 115, 161, 165.

Die erste Gruppe entspricht dem Idealbild, das man sich vom Blitz, der plötzlich «aus heiterem Himmel» zur Erde herunterfährt, macht. Die diesen Blitzen vorangehende Feldstärke ist in der Regel negativ, d. h. entspricht einer negativen Wolkenladung.

Die zweite Gruppe enthält Blitze mit mehr oder weniger langen Vorentladungen, die innerhalb der Wolken verlaufen und daher in den Blitzphotos nicht sichtbar sind. Sie verursachen sehr oft Polaritätswechsel, wobei ein in der Regel anfangs negatives Feld in ein positives übergeht, das längere Zeit andauert und kurz vor dem Einschlag wieder negativ werden kann. Einige Oszillogramme sollen kurz beschrieben werden.

Um die Oszillogramme leichter lesen zu können, sei erwähnt, dass die Reihenfolge der Feldkurven stets die gleiche ist, nämlich von oben nach unten: Agra – Gemmo – Pugerna – San Salvatore 1 (neue Feldmühle auf dem Kirchendach) – San Salvatore 2 (alte Feldmühle an der Turmflanke, leicht erkenntlich an der 1150-Hz-Kurve, deren Bandbreite der Feld-

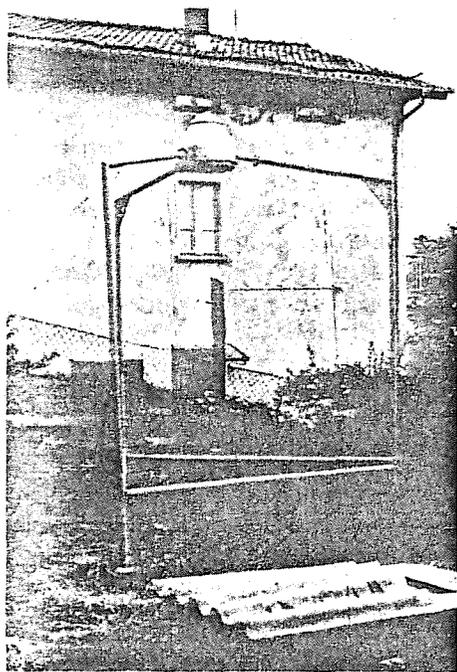


Fig. 4

Einbau der Feldmühle im Garten des Zollhauses Pugerna

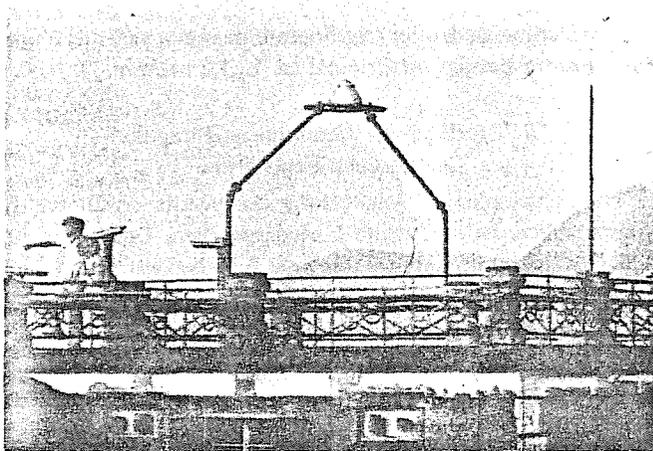
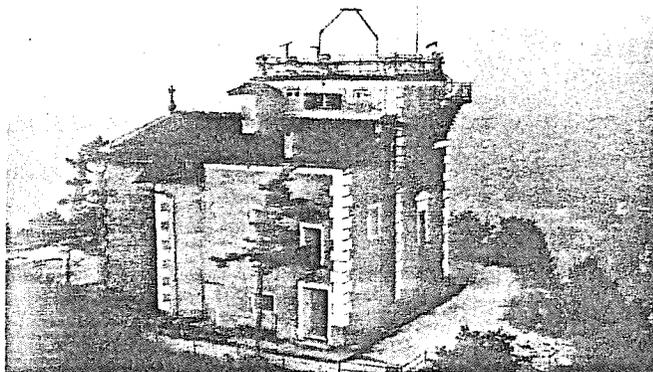


Fig. 5

Einbau der Feldmühle auf der Aussichtsterrasse auf dem San Salvatore  
Blickrichtung nach Osten

stärke entspricht). Dann folgen die Kurven für  $i_7$  (7 mA) und für die Oszillogramme ab Nummer 139 auch für  $i_1$  (1 A). Die flackernden und stark übersteuerten Kurven gehören stets zu  $i_7$ .

Oszillogramm 116 als Beispiel der ersten Gruppe zeigt bei (1) einen ersten Einschlag in den Messturm 1, der gefolgt ist von einem zweiten Feldanstieg, dem kein Strom in die Messtürme entspricht. Offenbar bedeutet dieser zweite Anstieg mit scharfem Feldzusammenbruch einen Teilblitz in Richtung Agra, da dort eine stärkere Feldänderung entsteht. Nach rund 0,1 s folgt ein weiterer Feldsprung, nach rund 0,3 s ein vierter, nach weiteren 0,2 s ein fünfter Feldsprung, deren Verläufe anschliessend an das Oszillogramm der ersten drei Teilblitze reproduziert wurden (Osz. 116a und b). Nur der erste Teilblitz erfolgte in den Messturm 1; die späteren «Teilblitze» müssen anderswo niedergegangen sein, der vierte vermutlich in der Gegend von Gemmo, wo eine starke Feldänderung ersichtlich ist.

Oszillogramm 33 bildet ein Beispiel für die zweite Gruppe von Blitzen, nämlich solche mit Vorentladungen. Nachdem das stationäre Feld vor dem Blitz lange konstant und negativ war, dann während 0,15 s noch etwas anstieg, nimmt es zu Beginn des Oszillogramms 33a während ca. 30 ms ab, geht im Punkt N1 durch Null, wird positiv und steigt in weiteren 30 ms auf Werte von ca. +300 kV/m auf dem Kirchendach (S1) und ca. 400 kV/m an der Turmflanke (S2), ohne dass es zum Blitz kommt. Das positive Feld geht dann während ca. 0,3 s langsam zurück, wie am Anfang des Oszillogramms 33b ersichtlich ist. Es läuft bei N2 sehr rasch durch Null und erreicht nach ca. 5 ms einen negativen Wert von ca. -315 kV/m, wobei der Blitz einsetzt. Ein zweiter Teilblitz erfolgt nach ca. 0,1 s bei wesentlich kleinerer Feldstärke.

Dieses Oszillogramm (33) zeigt starke periodische Schwankungen der Feldstärkekurven mit einer Frequenz von ca. 100 Hz. Es wurde am 28. Mai 1971 während eines starken Gewitterregens aufgezeichnet. Dieser hat offenbar die Isolation der drei Meßsektoren der Feldmühlen ungleich stark reduziert, so dass die Summation der drei sichtbaren Spannungen keinen konstanten Wert mehr liefert. Die Schwankungen lassen erkennen, dass auch die Summenauswertung nicht mehr zuverlässig ist. Es zeigte sich, dass bei Regen feine, lei-

tende Brücken an den Sektoren entstanden sind. Nach der nachfolgenden periodischen Kontrolle des Isolationszustandes, speziell der feinen Staubfäden (Spinnfäden), verschwand dieser Messfehler.

Oszillogramm 107 ist ein weiteres Beispiel der zweiten Gruppe, wobei es erst nach einer langen Vorentladung zum Blitzschlag bei positivem Feld kommt. In den Sekunden vor dem Blitzschlag besteht wie gewöhnlich ein negatives Feld, das im Anfang des Oszillogramms ersichtlich ist. Das Feld geht bei Punkt N durch Null und wird positiv. Es erreicht nach einer knappen Zehntelsekunde den Wert von ca.  $+350 \text{ kV/m}$  vor der Feldmühle auf dem Kirchendach (Kurve S1) und ca.  $+300 \text{ kV/m}$  an der Feldmühle der Turmflanke (S2). Während dieses langsamen Feldanstieges setzt der Blitzstrom bei Punkt 1 ein. Er erreicht gemäss dem hier nicht reproduzierten Strom-Oszillogramm nach ca. 20 ms ca.  $+400 \text{ A}$  und springt dann plötzlich auf

einen Impuls von  $+11 \text{ kA}$  an (Punkt 2). Dem kurzen Impuls folgt ein positiver Nachstrom von ca.  $2 \text{ kA}$ , der in  $0,13 \text{ s}$  abklingt. Nach dieser Zeit bleibt auch die Feldstärke wieder konstant und behält während der weiteren Registrierung einen beträchtlichen positiven Wert.

Dieses Beispiel zeigt, dass die Untersuchung von Abwärts- und Aufwärtsblitzen nicht immer sofort klar ist. Aus dem langsamen Anstieg eines relativ kleinen Stromes wäre zunächst auf einen Aufwärtsblitz zu schliessen. Der anschliessende, plötzliche Anstieg des Stromes auf  $11 \text{ kA}$  während ca.  $1 \text{ ms}$  deutet aber darauf hin, dass ein bereits geladener Kanal erreicht wurde, der sich nun über den Aufwärtskanal plötzlich entladen kann. Dabei kommt eine vielfach grössere Ladung zum Ausgleich, als sie in den Aufwärtskanal geliefert wurde. Somit ist es logisch, den Blitz als einen Abwärtsblitz, und die linear

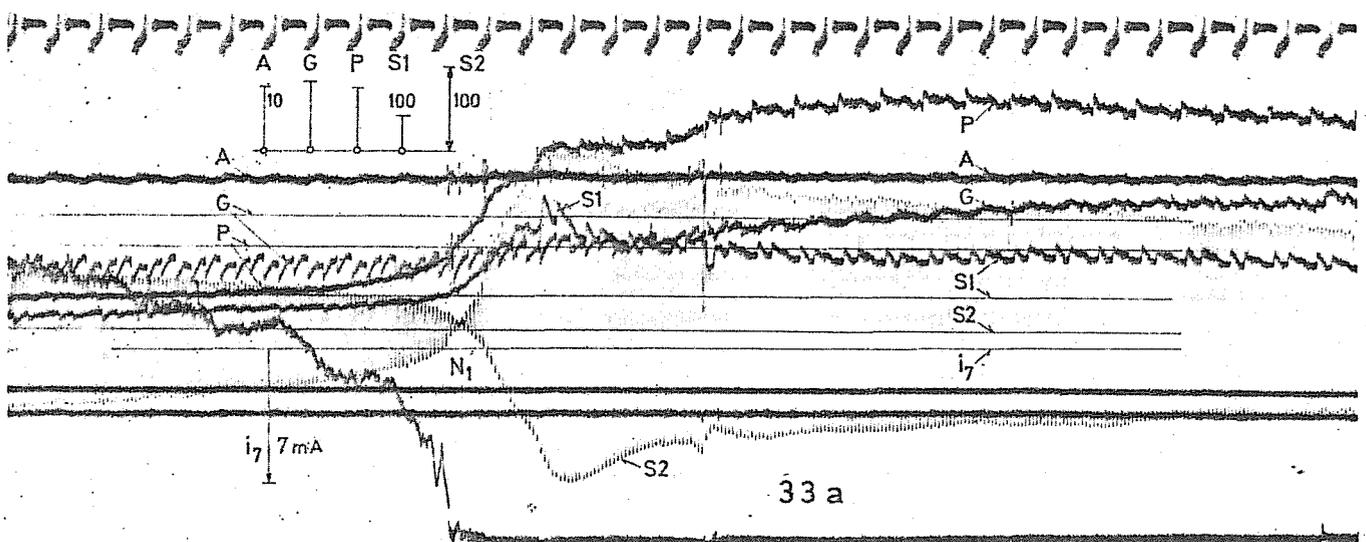
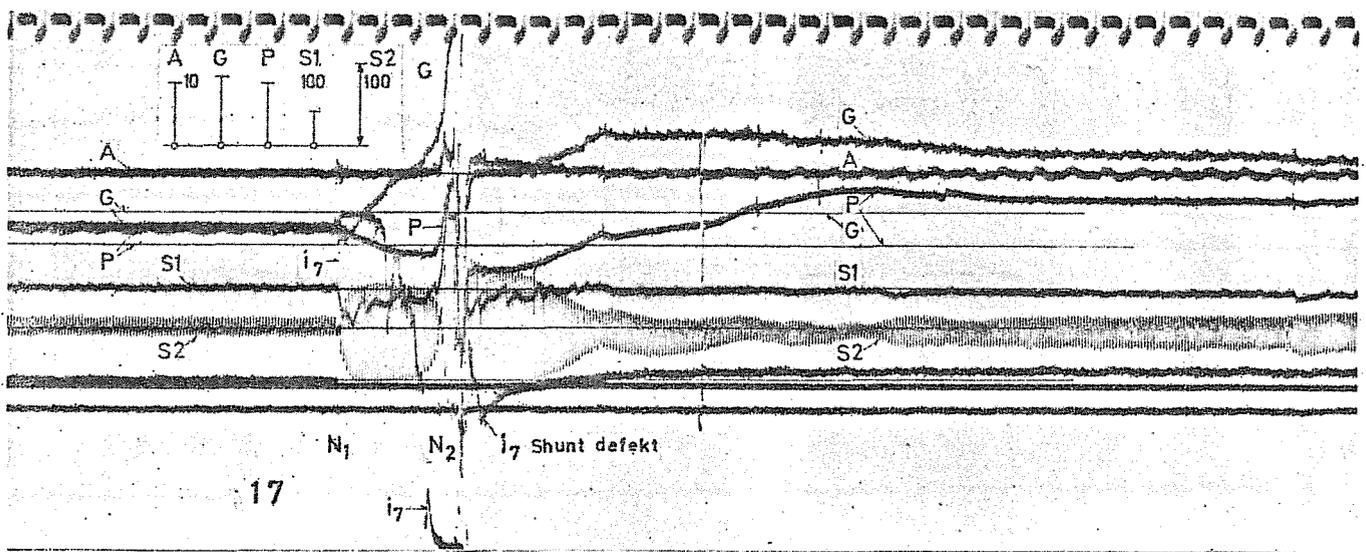
Fig. 6  
Oszillogramm-Beispiele des Feldverlaufs bei Blitzschlägen am Monte San Salvatore

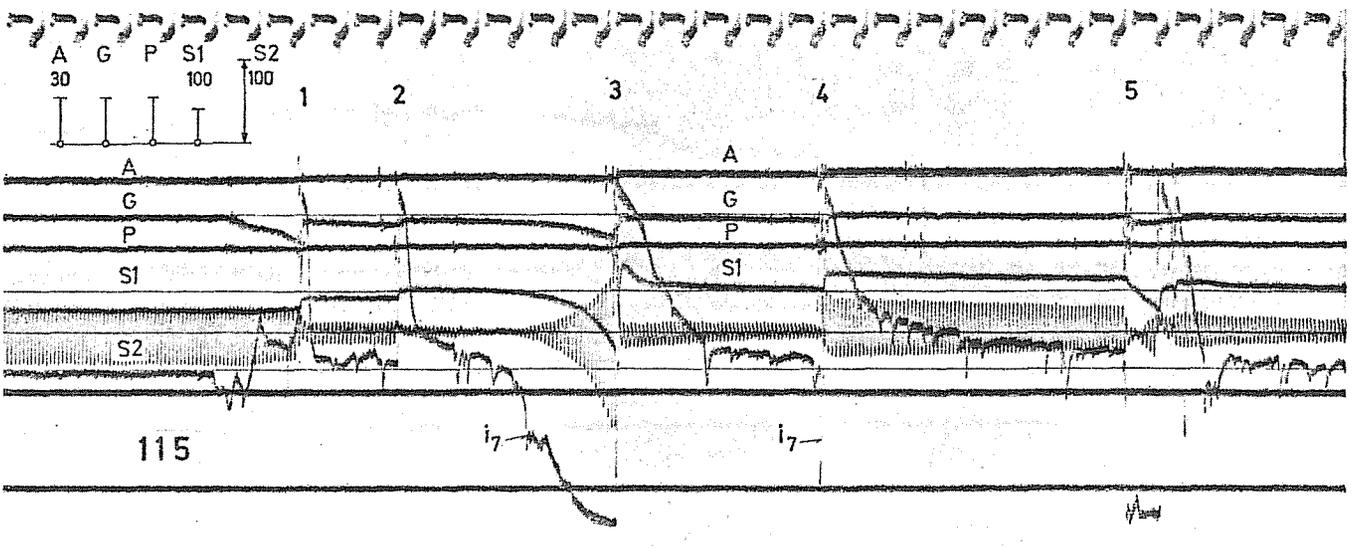
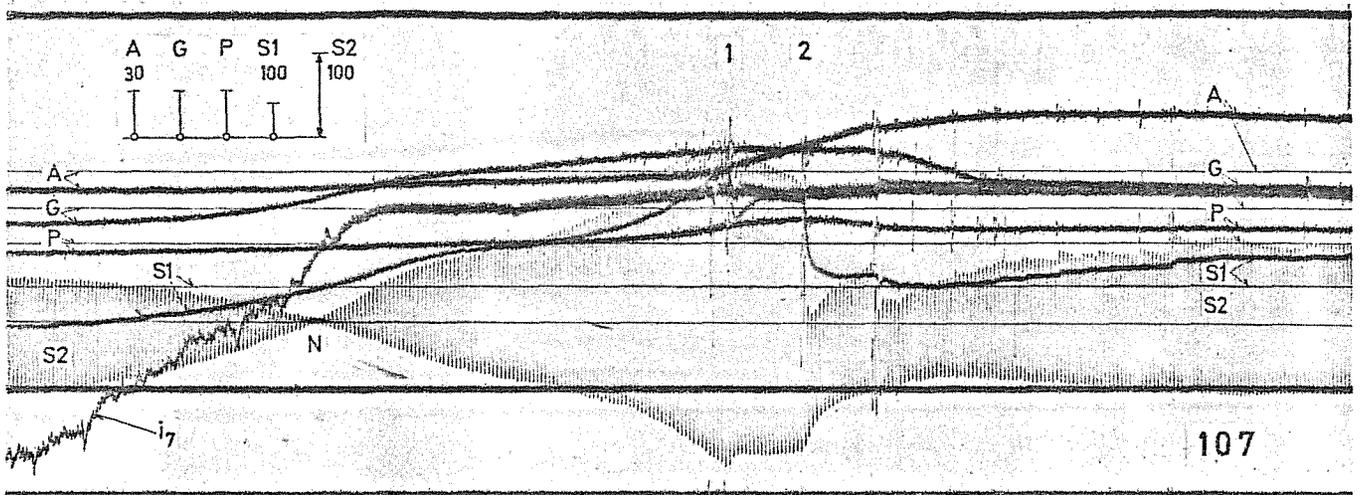
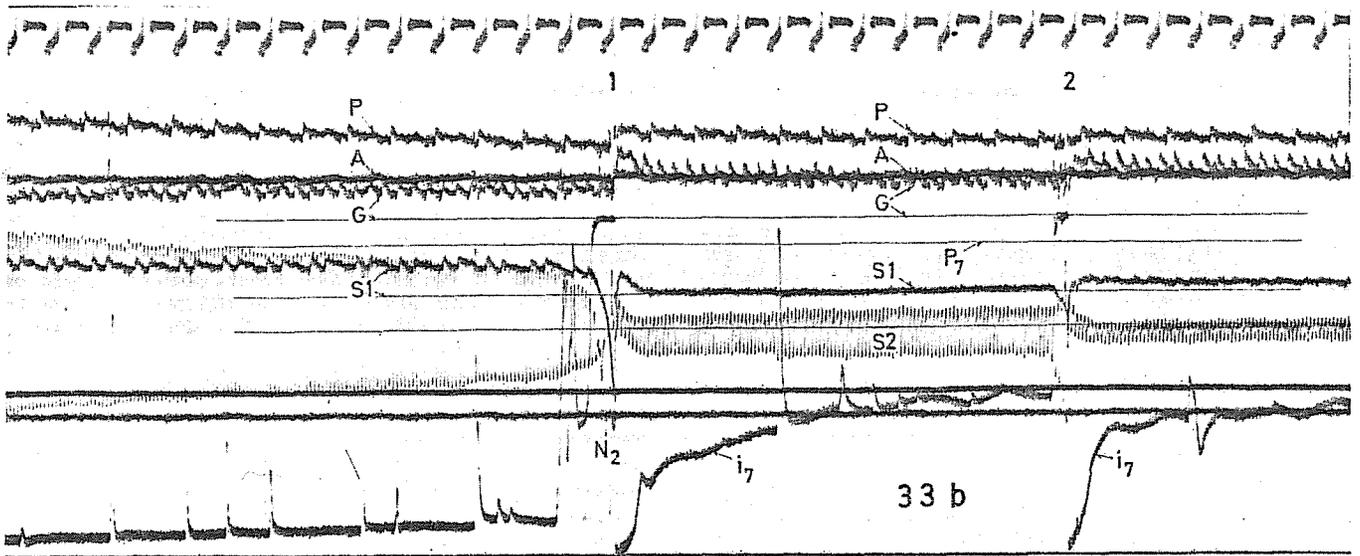
Bezeichnungen:

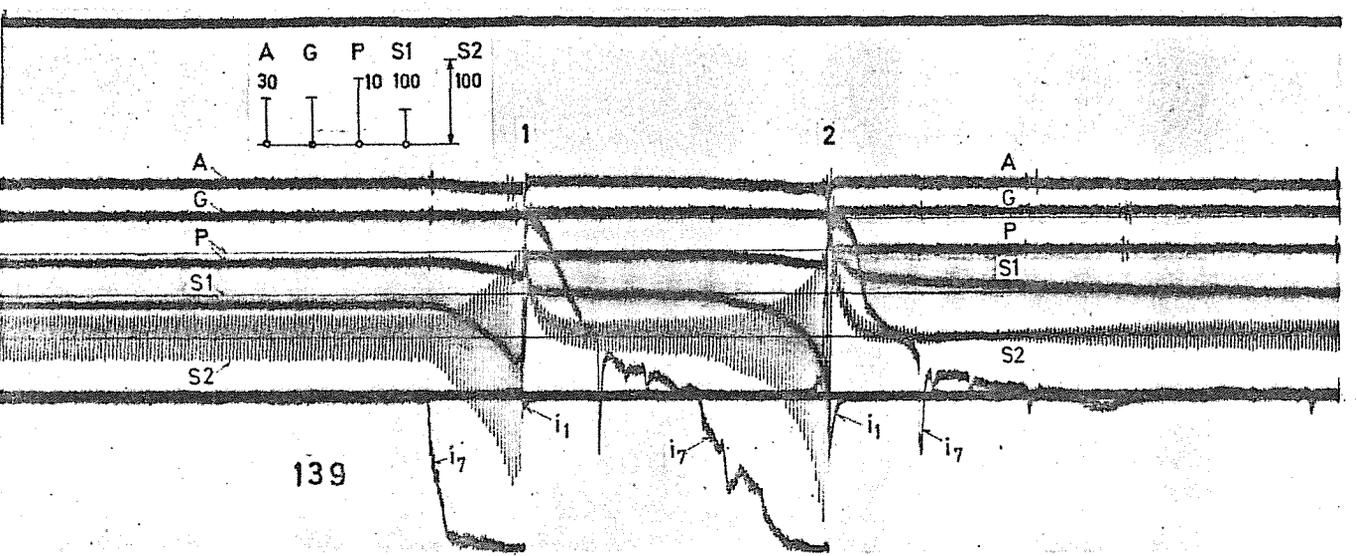
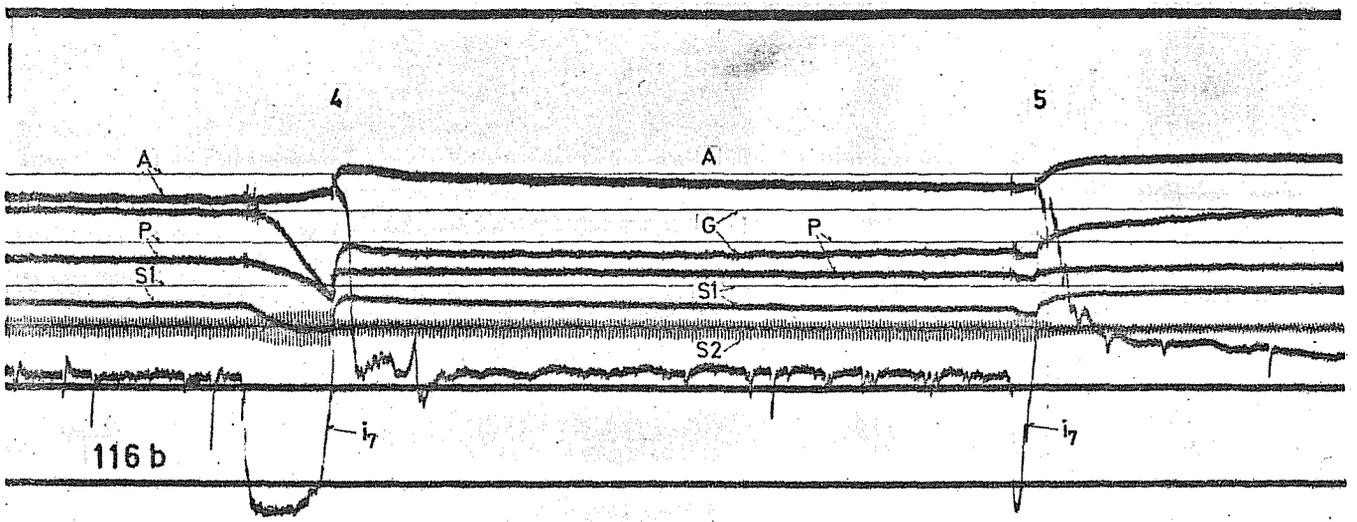
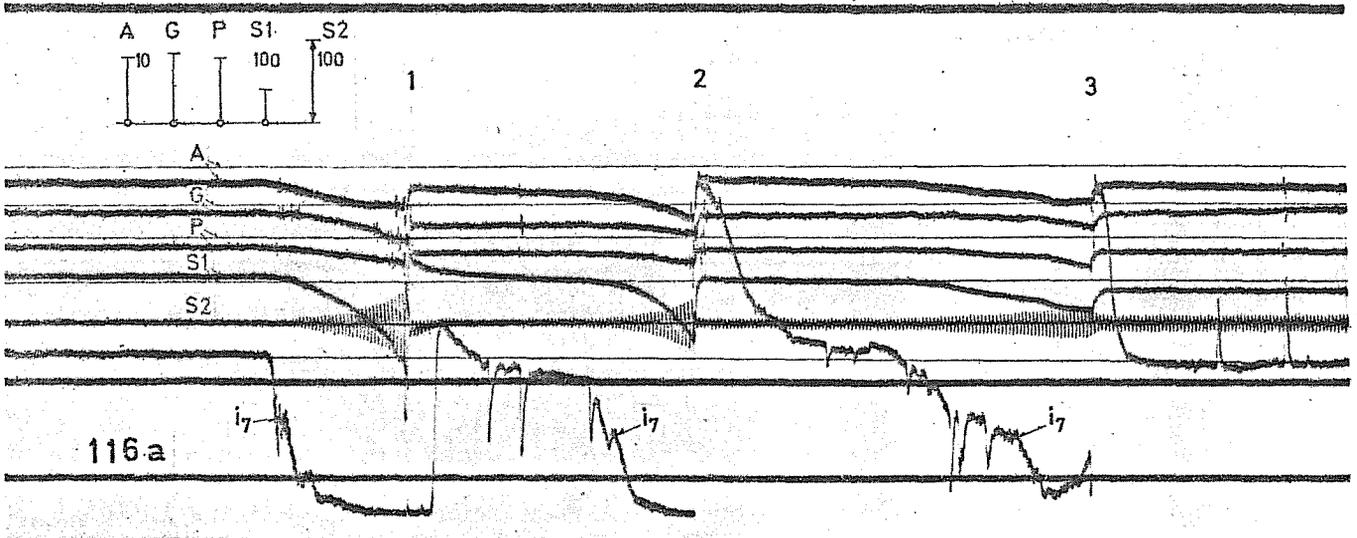
A	Agra	N	Nulldurchgang
G	Gemmo	$i_7$	Vorentladungsstrom, Bereich 7 mA
P	Pugerna	$i_1$	Vorentladungsstrom, Bereich 1 A
S1	San Salvatore (Kirchendach)	Oben: Eichfrequenz 100 Hz	
S2	San Salvatore (Turmflanke)	Frequenz von S2 ca. 1150 Hz	

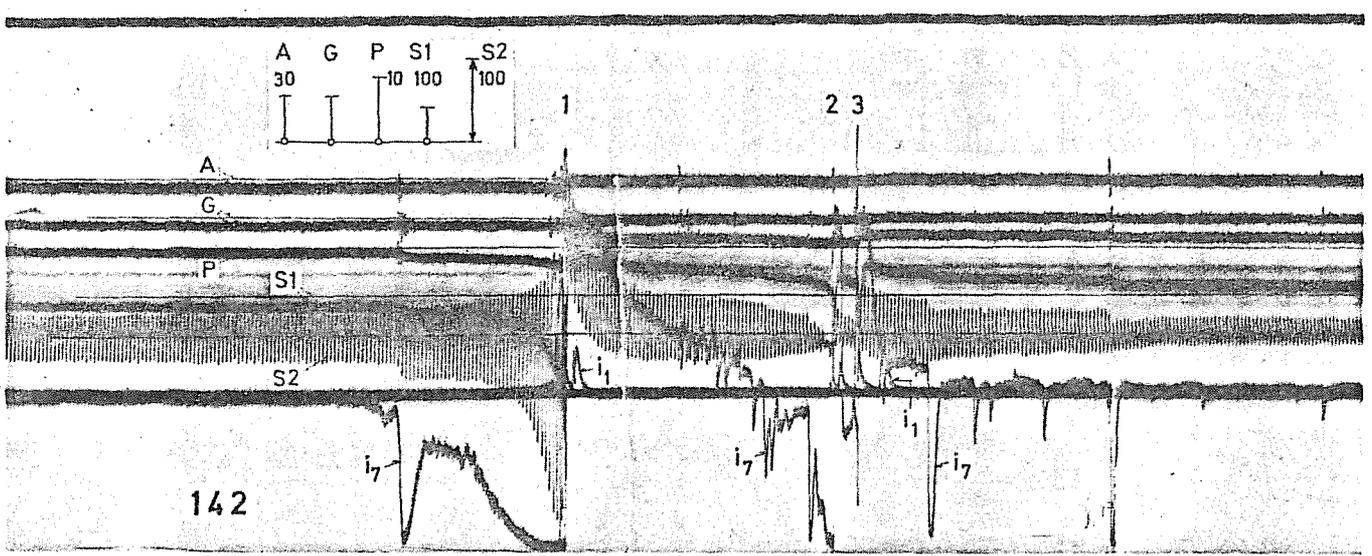
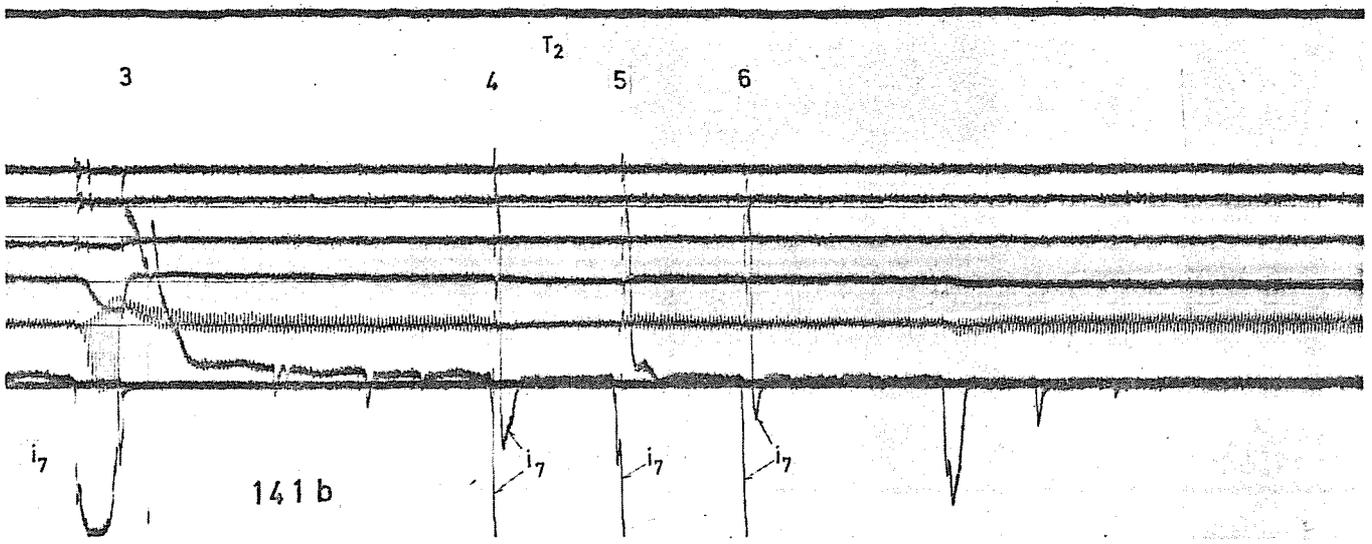
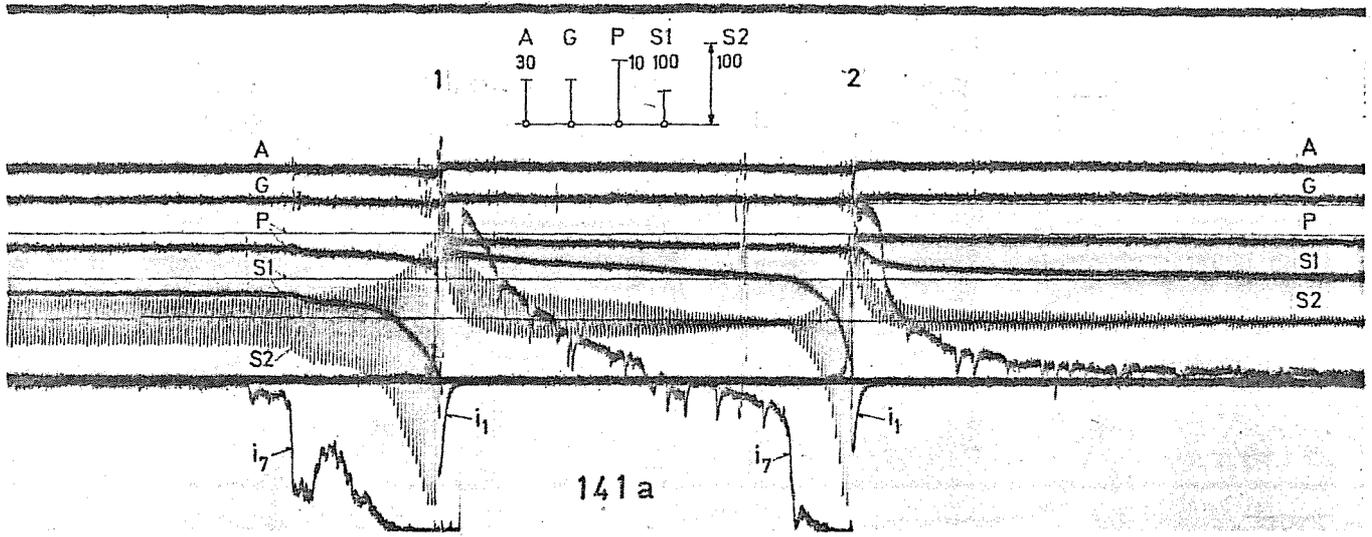
Maßstabstrecken gelten für  $E = 10 / 30 / 100 \text{ kV/m}$

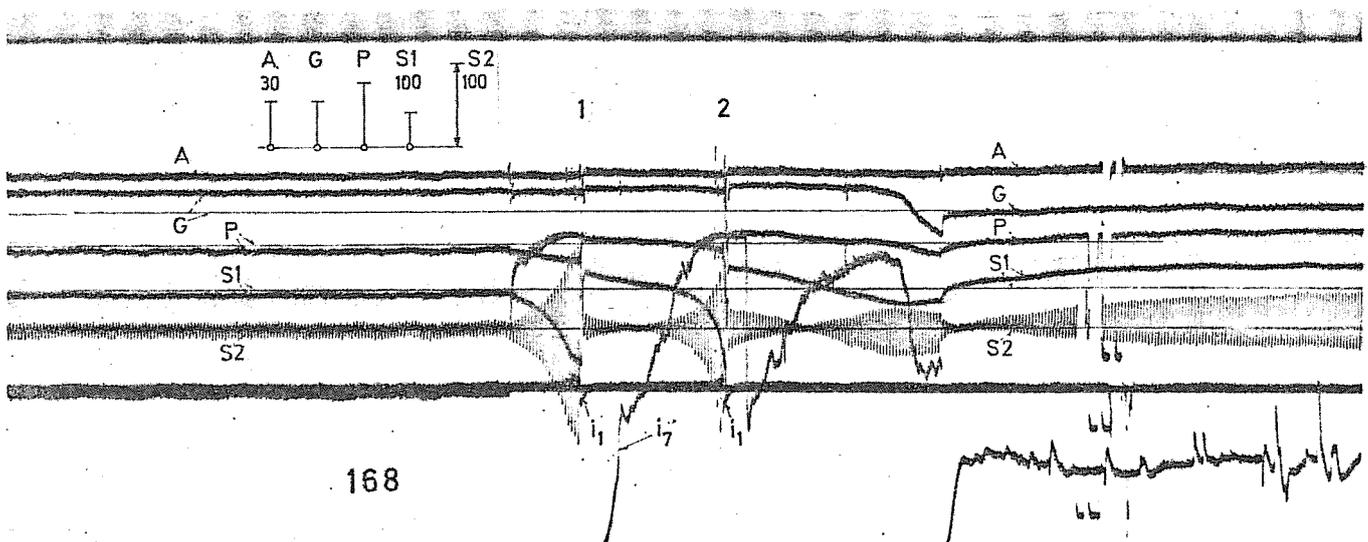
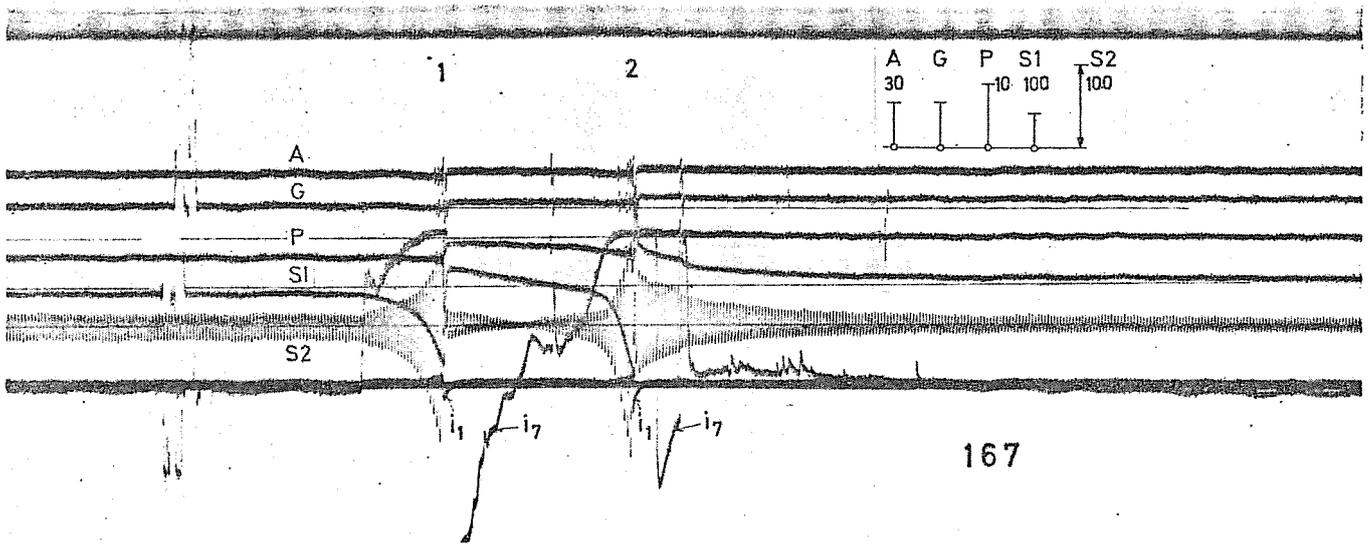
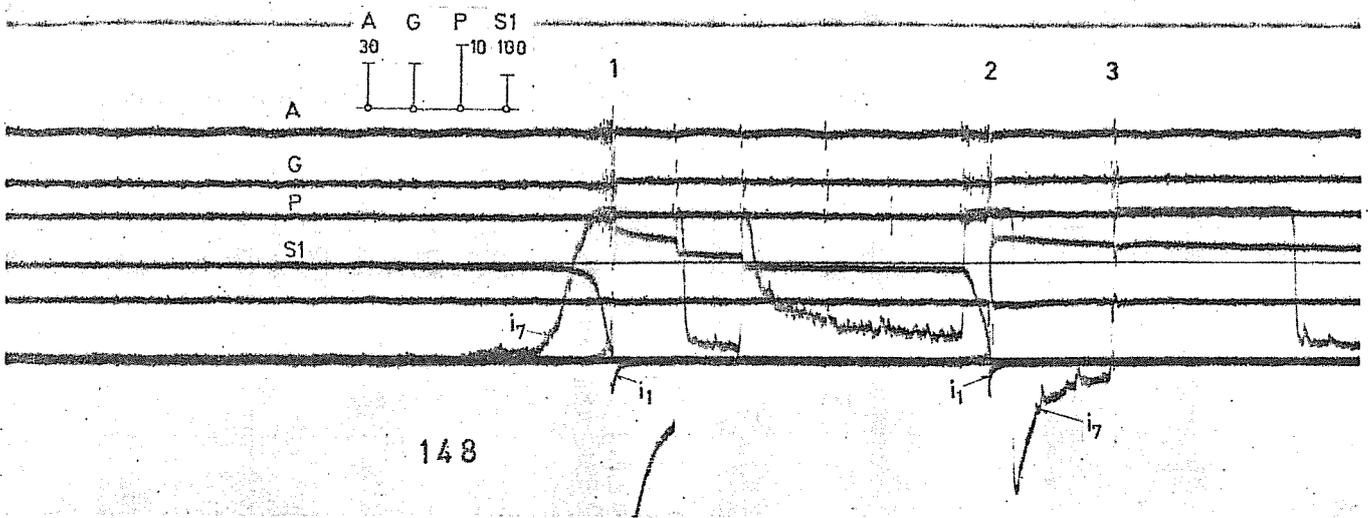
Die beim Strecken-Schema A - G - P - S1 - S2 notierten Zahlen bedeuten die Feldstärke-Maßstäbe für 10, 30 oder 100 kV/m











Feldstärke E und Feldänderung  $\Delta E/\Delta t$  innert 1 ms infolge von Abwärtsblitzen zum Monte San Salvatore

Tabelle I

Oszillogramm Nr.	$i_{kA}$	Q total As	Agra		Gemmo		Pugerna		San.Salvatore «neu»		San Salvatore «alt»		Dauer			Bemerkungen
			E kV m	$\Delta E/\Delta t$ kV m · ms	E kV m	$\Delta E/\Delta t$ kV m · ms	E kV m	$\Delta E/\Delta t$ kV m · ms	E kV m	$\Delta E/\Delta t$ kV m · ms	E kV m	$\Delta E/\Delta t$ kV m · ms	der Vor- entladung ms	des «leaders» ms	des Gesamt- blitzes ms	
02	- 53	- 13	- 5 + 3,5	4,5/1	- 5 + 1,3	3,6/1	- 2,5 < 1	6/1	- 42 - 230 + 42	320/1	- 17 - 90 + 28	140/1	100	32	690	6)
17	+ 270	+ 65	0 - 30 0	35/1	- 2,3 + 26 + 6,3	31/1	+ 2 + 10-15 + 7	25/1	+ 7 + 335 - 20	520/1	+ 22 + 450 - 73	650/1,5	35	6	410	1)
33 (1) T 2	- 26	- 8,5	0	< 1	- 4,7	5/1	+ 5,5	2/1	- 50 - 320 0	380/1	- 110 - 190 - 45	200/1	670	7,5	790	2)
33 (2)	- 15	+ 7,5	0 0 0	< 1	+ 6 + 5 + 5	2,6/1	+ 17 + 16 + 13	< 1	+ 14 - 62 - 31	85/1	- 53 - 190 - 17	170/1	670 + 125	4		
107 (1)	+ 2	-	- 8	< 3	- 4,7	< 3	- 6,6	< 3	- 63 + 350 + 210	140/1	- 56 + 390 + 325	70/1	380	≈ 0	700	3)
107 (2)	+ 11	+ 72	0 + 16 + 25	< 3	+ 40 + 40 + 14	< 3	+ 23 + 26 + 10	< 3	+ 260 0 + 75	200/1,5	+ 340 - + 87	170/1	380 + 20	-		
115 T 2	- 38	- 12	0 0	< 3	< 3 - 3	12/1	0 0	< 3	- 55 - 170 0	250/1	0 - 190 + 17	220/1	110	30	0 730	4)
116 (1)	- 27	- 4	- 2,5	3/1	- 1	2,3/1	- 1,5	1,5/1	+ 14 - 290 0	375/1	0 - 170 + 17	185/1	38	38	1100	
116 (2)	-	-	- 3 - 8 0	6/1	- 2,5 - 4 - 1,5	2,3/1	- 2,5 - 4 - 4	2,2/1	0 - 190 - 40	190/1	0 - 56 - 10	50/1	38 + 80	29		
139 (1) T 2	± 4?	-	0	6/1	0	3/1	- 1,5	3,3/1	- 28 - 200 0	220/1	- 53 - 280 0	270/1	25	25	850	5)
139 (2)	-	-	0 0 0	4,5/1	+ 3 + 1,5 + 6	< 3	0 0 - 1	2,2/1	0 - 300 + 7	400/1	0 - 335 0	360/1	25 + 84			
140 T 2	- 50	- 6,5	- 3 0	< 3	0 - 23	< 3	- 18 - 15	3/1	- 28 - 280 - 20	390/1	- 56 - 310 - 53	340/1	38	38	610	6)
141 (1) T 1 und T 2	- 55	- 8	- 3 0	6/1	0 + 3	3/1	- 22 - 18	3,6/1	- 42 - 290 0	375/1	- 56 - 350 0	450/1	53	53	610	
T 2 (2)	klein	klein	- 3 0	3/1	+ 3 + 3	3/1	- 18 < 1	2/1	0 - 290 - 28	390/1	0 - 300 - 25	340/1	53 + 113	19		
142 T 2	- 65	?	- 6 - 1,5	6/1	- 1 < 3	3/1	< 1 0	4,5/1	- 28 - 280 < 10	450/1	- 56 - 340 - 17	430/1	56	56	660	
148 (1)	- 2	?	0	< 3	0	< 3	0	< 1	0 - 280 + 70	380/1	-	-	41	41	800	
148 (2)	- 33	- 5,5	0 0 0	< 3	< 1 0 + 4,5	< 3	< 1 0 0	< 1	- 14 - 280 0	350/1	-	-	41 + 102	7,5		
161	- 13	- 0,6	< 1 < 1	< 1	- 1 0	< 1	< 1 + 3,3	< 1	- 14 - 250 - 42	200/1	- 23 - 285 - 50	160/1	41	15	480	6)
165	- 30	- 5	0 < 3	< 3	0 0	6/1	- 1,8 0	1,8/1	- 21 - 265 0	290/1	- 20 - 250 - 11	290/1	106	31	380	5)
166	- 38	- 5,5	0 0	< 3	0 0	< 3	- 1,8 < 1	2,2/1	- 21 - 265 - 28	335/1	- 23 - 250 - 32	290/1	51	51	250	6)
167 (1)	Spur	?	0	< 3	0	< 3	- 3	2,5/1	- 21 - 240 < 10	290/1	- 28 - 225 < 10	260/1	22	22	150	
167 (2)	- 27	?	0 0 0	< 3	+ 3 + 3 + 6	3/1	< 1 - 2,5 0	3,3/1	< 10 - 280 < 10	400/1	0 - 260 < 10	380/1	22 + 51	30		
168 (1)	- 27	?	0	< 3	+ 14	< 3	- 1	3,3/1	- 14 - 225 + 55	280/1	- 17 - 240 - 22	270/1	19	19	500	
168 (2)	-	-	0 0 + 3	< 3	+ 16 + 16 0	< 3	0 0 < 1	2,2/1	0 - 240 - 15	310/1	0 - 200 - 22	240/1	19 + 39	19		

Bemerkungen:

- 1) Defekt des  $\mu$ s-Shutes.
- 2) Negatives-positives Feld, bei + 290 kV/m keine Entladung, dann rasche Feldänderung positiv-negativ mit Entladung.
- 3) Langsamer Anstieg des positiven Feldes führt zu einem positiven Blitz (Fangentladung).
- 4) Spuren von Blitzstrom im Turm 2.
- 5) Vermutlich Blitzschlag zu Turm 2 unterhalb des Shutes.
- 6) Diese Oszillogramme sind in Fig. 6 nicht aufgeführt.

ansteigende Vorentladung als eine Fangentladung (connecting streamer) zu bezeichnen.

Oszillogramm 17 gibt den Feldverlauf beim Einschlag des Blitzes mit der bisher (d. h. seit 1943) grössten gemessenen Stromamplitude von rund + 270 kA wieder. Aus einem schwachen positiven Ruhefeld heraus entsteht zunächst eine rasche Feldumkehr im Punkt N1, nach weiteren 20 ms eine weitere Feldumkehr bei N2. Es folgt ein rascher Anstieg des positiven Feldes mit dem Einschlag in Messturm 1 nach ca. 5 ms. Das Oszillogramm zeigt deutlich, dass bereits mit dem ersten Nulldurchgang ein starker positiver Feldanstieg auch in Gemmo erfolgt, sowie ein negativer Anstieg in Pugerna. Nach dem zweiten Nulldurchgang am San Salvatore erfolgt ein rascher positiver Feldanstieg zugleich in Gemmo und am San Salvatore, der dann zum Blitzeinschlag in Turm 1 führt.

Das Oszillogramm zeigt, dass es sich zunächst um die Entladung eines Wolken-Dipols handelt, die sich zwischen Gemmo und Pugerna als Feldänderung mit umgekehrten Vorzeichen äussert. Erst aus dieser Entladung heraus entsteht der Blitzeinschlag in den San Salvatore.

Leider entstand durch diesen Blitz ein Überschlag am Stromshunt des Turmes 1, der die weitere Messung von Strom und Ladung mit dem KO – glücklicherweise erst nach der Speicherung des Scheitelwertes im Schleifenoszillographen (SO) – unmöglich machte. Die Feldmessung blieb jedoch ungestört. Da die Messeinrichtung bisher für grösste Ströme von 200 kA dimensioniert war, überstiegen die Ausschläge in den Oszillogrammen die Messbereiche zum Teil. Auch ist es in solchen extremen Fällen teilweise schwierig, die Oszillogramm-Kurven sauber auseinander zu halten.

Die besprochenen Oszillogramme 33 und 107 stellen zwei Abwärtsblitze des Jahres 1971 dar, denen eine mehrere Zehntelsekunden lange Vorentladung in den Wolken vorangeht. Typisch für die Vorentladungen ist die Umkehr des Vorzeichens der Feldstärke. Der Blitzschlag kann schliesslich nach 2 Nulldurchgängen bei negativer Feldstärke erfolgen (Oszillogramm 33) oder nach dem ersten Nulldurchgang bei positivem Feld (Oszillogramme 107 und 17). Wie bei früheren Messungen sind auch in der Berichtsperiode 1963 bis 1971 die positiven Blitzschläge (Blitze aus positiv geladenen Wolken) die starken und schlimmen Blitze, was sowohl den Strom-Scheitelwert wie auch den Stromquadrat-Impuls betrifft.

### 8. Feldverlauf am Monte San Salvatore beim Blitzeinschlag

Die Oszillogramme zeigen den zum Einschlag führenden Feldanstieg mit einer Zeitauflösung von ca. 0,5 ms sehr deutlich. Er erfolgt zum Teil exponentiell, zum Teil eher linear. Für eine mittlere Länge des Leaders von 3 km lassen sich folgende mittleren Vorwachs-geschwindigkeiten errechnen:

Bei 5 ms Dauer des Leaders 3000: 5 = 600 m/ms = 2 ‰  
der Lichtgeschwindigkeit

Bei 50 ms Dauer des Leaders 3000:50 = 60 m/ms = 0,2 ‰  
der Lichtgeschwindigkeit

Diese Geschwindigkeiten entsprechen den photographisch bestimmten mittleren Geschwindigkeiten mit 0,2...2 ‰ der Lichtgeschwindigkeit recht gut.

Die Feldstärke vor den Feldmühlen des San Salvatore erreichte folgende Höchstwerte:

+ 335... + 350 kV/m	}	auf dem Kirchendach (S1)
- 290... - 320 kV/m		
+ 390... + 450 kV/m	}	an der Turmflanke (S2)
- 300... - 350 kV/m		

Die weitaus meisten Werte finden sich zwischen - 230 und - 290 kV/m.

Der Feldzusammenbruch beim Blitzeinschlag erfolgt in der Regel innert 1 ms. Er kann wegen der begrenzten Zeitauflösung nicht genauer bestimmt werden denn als Mittelwert für 1 ms. Die grössten Werte des Feldsprunges  $\Delta E$  bzw. die mittlere Änderungsgeschwindigkeit in 1 ms betragen:

+ 520 und - 450 kV/m/ms auf dem Kirchendach (S1)  
+ 650 und - 450 kV/m/ms an der Turmflanke (S2)

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den ersten und den folgenden Teilblitzen ist nicht ersichtlich. Leider ist die Anzahl Messungen zu knapp, um eine statistisch gesicherte Auswertung zu ermöglichen.

### 9. Zusammenhang zwischen Blitzstrom bzw. Blitzimpuls-ladung und grösster Feldstärke am Monte San Salvatore

Es fällt auf, dass die Streuung der grössten Feldstärken auf dem San Salvatore beim Einschlag viel kleiner ist als die Streuung der Strom- und Ladungswerte der einzelnen Teilblitze. Dies ist erklärlich, weil auch bei beliebig grossen Strömen und Ladungen die Feldstärke am Turm nicht über den für den Durchschlag zwischen Turm und Leader-Kopf nötigen Wert ansteigen kann. Während die zum Durchschlag einer grösseren Durchschlagsstrecke benötigte mittlere Feldstärke bekanntlich kleiner ist als für kleine Durchschlagsstrecken, dürfte die lokale Feldstärke an der Turmspitze eine solche Abhängigkeit nicht zeigen. Weil die Länge der Durchschlagsstrecke nach der heutigen Auffassung vom Schutzraum eines Blitzableiters direkt mit der Amplitude des Blitzstrom-Impulses zusammenhängt [3; 4], heisst dies auch, dass der gemessene Höchstwert der Feldstärken auf dem San Salvatore weder von der Länge der Fangentladung noch von der Amplitude des Blitzstromes wesentlich abhängig ist. Diese Folgerung wird durch die Messungen bestätigt.

### 10. Vergleich der Feldstärken auf dem Kirchendach und an der Turmflanke auf dem Monte San Salvatore

Für den Idealfall einer unendlich ausgedehnten Ladungswolke mit einer gleichbleibenden Ladungsverteilung (Flächenladung) müsste zwischen der grössten Feldstärke auf dem Kirchendach und an der Turmflanke oder irgendwo daneben ein konstantes Verhältnis bestehen, wenn der Einschlag immer an derselben Stelle erfolgt, z. B. in einen Messturm.

Der Vergleich der beiden genannten Feldstärken ist in Tabelle I in den Kolonnen San Salvatore dargestellt. Es zeigt sich Folgendes:

Bei allen Oszillogrammbeispielen 139...168 der Tabelle I ist das Verhältnis beider Feldstärken ( $S1 : S2$ ) zwischen 0,71 und 1,20 und das Verhältnis beider Feldsprünge ( $S1 : S2$ ) zwischen 0,81 und 1,30. Bei den Oszillogrammen 02 und 116 der Tabelle I beträgt ausnahmsweise das Verhältnis beider Feldstärken beim ersten Teilblitz 2,55 und 3,4, das Verhältnis beider Feldstärkesprünge beim zweiten Teilblitz 2,3 und 3,8. Bei diesen grössten Verhältniszahlen ist somit die Feldstärke auf dem Kirchendach unverhältnismässig grösser als jene an der Turmflanke.

Die Ursache dieser Erscheinung konnte nicht geklärt werden. Es ist möglich, dass bei Oszillogramm 02 und 116 die ungenügende Isolation der alten Feldmühle beim damaligen reg-

Zahlenwerte des Verhältnisses  $\Delta E/\Delta Q$

Tabelle II

Messort	Distanz D vom San Salvatore km	Werte $\Delta E/\Delta Q$ bei einer angenommenen Höhe der Kanalladung über dem San Salvatore von H =			
		0,5 km	1 km	3 km	5 km
Agra	3,30	0,24	0,44	0,61	0,42
Gemmo	3,45	0,21	0,39	0,56	0,40
Pugerna	2,52	0,53	0,90	0,90	0,51

nerischen Wetter die Schuld trägt. Die bei der Vielzahl von Oszillogrammen ersichtlichen kleineren Unterschiede sind erklärlich durch die nicht immer gleiche Lage der Wolkenladung über dem San Salvatore oder über dem Luganersee neben der gemessenen Turmflanke.

### 11. Fernwirkung der Blitzeinschläge in den Monte San Salvatore in der Nahzone (3 km)

In Tabelle I sind für die drei Aussenstationen Agra, Gemmo und Pugerna drei Grössen eingetragen worden, nämlich die beiden Feldstärken  $E$  vor Beginn und nach Vollendung des Blitzschlages, und der Feldstärkesprung  $\Delta E/\Delta t$ , der vom kurzdauernden Blitzstromimpuls (Stoßstrom) innert 1 ms bzw. von der ihm entsprechenden Kanalladung in den Aussenstationen verursacht wird. Der Blitzstrom-Impuls dauert bei den häufigeren negativen Blitzen stets weniger als 1 ms, so dass auch der Feldstärkesprung in der Regel innerhalb 1 ms erfolgt. Die begrenzte Zeitaufösung bei der Übertragung und im Oszillogramm (ca. 1 mm/ms) erlaubt keine genaue Zeitmessung unterhalb 1 ms. Es werden daher in Tabelle II bei allen Änderungen innert 1 ms die Mittelwerte des Feldsprungs innert 1 ms angegeben. So bedeutet die Angabe 31/1 einen Sprung  $\Delta E$  von 31 kV/m innert 1 ms.

Der Zusammenhang einer Änderung der im Leader gespeicherten Wolkenladung  $\Delta Q$  und der von ihr erzeugten Änderung der Feldstärke  $\Delta E$  über einer unendlich ausgedehnten Ebene ist bekanntlich gegeben durch

$$\Delta E = \frac{18 H \cdot \Delta Q}{(D^2 + H^2)^{3/2}}$$

sofern folgende Einheiten benützt werden:

- $\Delta E$  Feldstärkeänderung bzw. Sprung innert 1 ms (kV/m);
- $\Delta Q$  Ausgegliche elektrische Ladung des Blitzstrom-Impulses innert 1 ms (Kanalladung) (As);
- $H$  Mittlere Höhe der Kanalladung über der Ebene (km);
- $D$  Horizontale Entfernung des Messpunktes von der Kanalladung (km)

Für die drei Aussenstationen gelten für das Verhältnis  $\Delta E/\Delta Q$  die Zahlenwerte der Tabelle II.

Mit diesen Zahlenwerten errechnen sich für den genannten Idealfall einer Ladung über einer unendlich ausgedehnten Ebene die Feldstärkesprünge der Tabelle III, in der auch die aus den Oszillogrammen ermittelten Sprungwerte  $\Delta E/\Delta t$  eingetragen sind.

Um die berechneten und gemessenen Feldstärkewerte der Tabelle III zu vergleichen, muss zunächst berücksichtigt werden, dass die berechneten Werte die Feldstärke über einer unendlich ausgedehnten Ebene bedeuten. Die gemessenen Werte dagegen bedeuten die Feldstärke unmittelbar vor den Feldmühlen bzw. deren Meßsektoren. Dieser Messwert muss daher zum Vergleich auf den entsprechenden Wert über einer ausgedehnten Ebene reduziert werden. Diese Reduktion kann durch Vergleichsmessungen in der Natur geschehen, indem z. B. mit radioaktiven Sonden die stationären Schönwetter-Feldstärken in der Umgebung der Feldmühlen gemessen und mit den Feldstärken vor den Feldmühlen verglichen werden. Oder es können Vergleichsmessungen im elektrolytischen Trog durchgeführt werden, welche ebenfalls das Verhältnis beider Feldstärkewerte ergeben. Solche Messungen wurden für Agra und Gemmo sowie für die neue Feldmühle auf dem Kirchendach des San Salvatore durchgeführt. Über diese Untersuchung wurde ein getrennter Bericht von Dipl.-Ing. Hans Berkes verfasst (Bericht

über Untersuchungen an den Feldmühlen des Modells 1969). Diesem Bericht sind die nachstehenden Verhältniswerte entnommen:

$$\begin{aligned} \text{Agra: } E (\text{Feldmühle}): E (\text{Ebene}) &\approx 2,37 \\ \text{Gemmo: } E (\text{Feldmühle}): E (\text{Ebene}) &\approx 3,0 \end{aligned}$$

Für Pugerna wurden entsprechende Messungen nicht durchgeführt. Die genannten Werte basieren auf beiden genannten Methoden (Messungen in der Natur und im Modell). Die auf Grund dieser Untersuchung auf die Ebene umgerechneten Messwerte der Feldstärken in Agra und Gemmo sind in Tabelle III ebenfalls aufgeführt. Damit können nun die berechneten und gemessenen Werte verglichen werden. Es zeigt sich folgendes:

a) Die direkt vor den Feldmühlen gemessenen Werte liegen in derselben Grössenordnung wie die über einer Ebene berechneten, sofern Ladungshöhen  $H$  von ca. 3 km angenommen werden. Die auf die Ebene reduzierten Messwerte dagegen liegen dann im Mittel ungefähr 3mal tiefer als die gerechneten Werte.

b) Der Unterschied zwischen Messung und Rechnung reduziert sich, wenn als Ladungshöhe  $H$  nur ca. 0,5 km angenommen wird (siehe Tabelle III). Bedenkt man die nach unten vermutlich zunehmende Ladungsdichte im leader bzw. Blitzkanal, so ist diese Annahme insbesondere für kurze negative Blitze nicht von der Hand zu weisen. Sie würde bei linearer, nach unten zunehmender Ladungsverteilung einem Ladungsschwerpunkt in  $1/3$  der Blitzlänge entsprechen. Verästelungen des Blitzkanals, die beim ersten Teilblitz ebenfalls zur Entladung kommen, können die Schwerpunkthöhe  $H$  nach oben oder unten verschieben. Der grosse Unterschied der Stromkurven des ersten gegenüber allen Folgeblitzen weist auf die Bedeutung dieser Verästelungen hin, da diese bei den Folgeblitzen nicht mehr in Erscheinung treten, was offensichtlich die grosse Einfachheit und Regelmässigkeit der Stromkurven der Folgeblitze erklärt.

c) Ein weiterer Beitrag zur Erklärung der gegenüber der Berechnung zu kleinen Messwerte des Feldstärkesprungs liegt darin, dass alle Feldmühlen der Aussenstationen rund 500 m tiefer liegen als die Bergkuppe. Dies bewirkt eine teilweise Abschirmung durch den Berg.

d) Abweichungen gegenüber der Rechnung müssen auch dadurch entstehen, dass der Blitzkanal nicht genau vertikal verläuft, so dass sich der Schwerpunkt der Kanalladung nicht genau über dem Einschlagspunkt auf dem San Salvatore befindet.

Neben den besprochenen Feldsprüngen als Folge der stossartigen Entladung des Blitzkanals kommen in den Oszillogrammen der Aussenstationen wesentlich grössere, aber relativ langsame Feldänderungen vor, die auf die bekannten, langdauernden Blitzstromkomponenten mit ihrer um eine Grössenordnung grösseren Ladungen zurückzuführen sind, aber auch auf Ladungsverschiebungen innerhalb naher Ladungswolken. Diese Effekte sind für die günstigste Bemessung vom Blitzzählern von Bedeutung.

### 12. Fernwirkungen der Blitzeinschläge in grossen Entfernungen, Sferics

Es muss auffallen, dass der Frequenzbereich des Blitzstromes recht tief liegt, und dass sehr hohe Frequenzen (MHz) nur in kleinen Amplituden vorkommen [2]. Demgegenüber sind bekanntlich in den entfernten «Sferics» Frequenzen der Grössenordnung MHz noch stark vertreten. Die Ursache dieses scheinbaren Widerspruchs ist zunächst im Ausbreitungsgesetz begründet, wonach die Feldstärke  $E$  jeder Dipolstörung sich aus drei Gliedern zusammensetzt (statische, elektromagnetische und Strahlungsfeldstärke):

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = M \frac{1}{c D^3} + \frac{dM}{dt} \cdot \frac{1}{c^2 D^2} + \frac{d^2 M}{dt^2} \cdot \frac{1}{c^3 D}$$

Beim Blitzschlag in die Erde bedeutet  $M$  infolge der Spiegelung des Feldes am Erdboden das Doppelte des elektrischen Dipolmoments ( $QH$ ) der Ladung  $Q$  in der Höhe  $H$  über Erde.

In der Nahzone des Blitzes kommen die ersten zwei Glieder in Betracht, in grossen Entfernungen die zwei letzten; d.h. in grosser Entfernung  $D$  erscheinen die raschen Änderungen relativ stärker.

Ein zweiter Grund für diese Sferics-Erscheinung wird aus den Oszillogrammen des Feldverlaufs und speziell der Feldänderungen offenbar. Aus den Kurven des Stromes  $i_T$  (7-mA-Bereich) ist eine Menge relativ rascher Feldänderungen ( $dE/dt$ ) ersichtlich, die sich in den Hochstrombereichen nicht zeigen, ebensowenig in den bereits beschriebenen Feldstärke-Oszillogrammen, da die Schwankungen  $\Delta E$  gegenüber den grossen  $E$ -Werten klein sind.

Die gleichzeitige Registrierung der Feldstärke  $E$  und des im wesentlichen als Verschiebungsstrom zu bezeichnenden Stromes  $i_T \approx dE/dt$  weisen darauf hin, dass für die Sferics in grossen Entfernungen vom Blitz weniger der Blitzstromverlauf an der Erdoberfläche, als die raschen Feldstärkeschwankungen  $dE/dt$  verantwortlich sind, die von vielen lokalen, relativ schwachen, aber sehr kurzzeitigen Entladungen im Innern der geladenen Wolke verursacht sind. Beispiele dazu die Oszillogramme 141, 142, 116, 33. Diese Beobachtung steht im Einklang mit Feldmessungen, die von D. Müller-Hillebrand in der Umgebung des Monte San Salvatore durchgeführt wurden [5], ferner mit Messungen im GHz-Gebiet von Luis L. Oh. [6].

Sofern der Zusammenhang der Sferics mit dem verursachenden Blitzstrom untersucht werden sollte, ist zu empfehlen, nicht nur den Verlauf von Blitzstrom und Bodenfeldstärke, sondern auch die raschen Schwankungen  $dE/dt$  aufzuzeichnen, was durch oszillographische Messung des Verschiebungsstromes an der Blitzantenne einfach möglich ist (Strom  $i_T$  mit Messbereichen zwischen ca. 1 mA und 1 A mit genügend empfindlichem Zeitmassstab).

### 13. Blitzvorgang beim Abwärtsblitz auf Grund der Feld- und Strommessungen

Die Registrierungen des Feldverlaufes in der unmittelbaren Nähe des Blitzeinschlages erlauben nun zusammen mit der Aufzeichnung des Blitzstromes vor und während des Blitzeinschlages eine genauere Vorstellung von der Entstehung des

Blitzes. So kommen bei Abwärtsblitzen zwei Entstehungsarten zum Vorschein:

Erstens der während eines am Boden oft nur schwachen Feldes plötzlich einsetzende Blitz aus der negativen Wolkenladung zur Erde. Bildungszeit ist in diesem Fall die Dauer des Leaders, die in der Regel zwischen 5 und 50 ms liegt.

Zweitens der im Verlauf von Vorentladungen in der Wolke entstehende Blitz zur Erde. Diese Vorentladungen können wenige Hundertstelsekunden bis zu annähernd 1 Sekunde dauern. Auch bei diesen Blitzen ist der Leader deutlich ersichtlich durch den in der Nähe des Einschlags meist exponentiell, seltener linear verlaufenden Feldanstieg. Die Vorentladungen setzen oft sehr plötzlich ein; ihr Einsatz lässt sich durch die Messung des Verschiebungsstromes der Blitzstromantenne in einem empfindlichen Strombereich (mA) ohne Verstärker sehr deutlich nachweisen. Im Verlauf der Vorentladungen treten oft Polaritätswechsel des Feldes auf. Die Vorentladungen dauern in den stromlosen Pausen des an der Erdoberfläche gemessenen Blitzstromes weiter. Sie bestehen auch nach dem Aufhören des am Erdboden registrierten Blitzstromes weiter, und zwar oft während vieler Zehntelsekunden («Nachentladungen»).

Die aus den Vorentladungen und Nachentladungen des Blitzes innerhalb der Ladungswolken bestimmte wahre «Blitzdauer» ist wesentlich grösser als die auf Grund der Blitzstrommessungen am Erdboden definierte Blitzdauer; sie liegt in der Regel zwischen 0,3 und 1 Sekunde.

Die gemessenen Feldstärken von ca. 300...400 kV/m Scheitelwert an den Feldmühlen auf dem Monte San Salvatore erklären die Entstehung von Fangentladungen und Büschelentladungen an Drähten oder anderen spitzen Objekten vor dem Einsetzen des «return-strokes».

Die Fernwirkung des Blitzeinschlages in den San Salvatore in ca. 3 km Entfernung ist nur dadurch mit der Berechnung einigermaßen in Übereinstimmung zu bringen, dass der Schwerpunkt der im ersten Teilblitz zum Ausgleich kommenden Kanalladung in relativ niedriger Höhe  $H$  über dem Berg angenommen wird, z.B. in 0,5 km.

Die Erklärung des grossen Unterschiedes in der Form der Stromkurven des ersten und folgender Teilblitze ist in den Ver-

Feldstärkesprünge  $\Delta E$  in den Aussenstationen innert 1 ms infolge von 12 Blitzstrom-Impulsen in den Monte San Salvatore

Tabelle III

Oszillogramm Nr.	$i$ kA	$\Delta Q$ Impuls As	Approximative Rechenwerte über Ebene												Messwerte an den Feldmühlen			Reduzierte Messwerte auf Ebene		
			Agra				Gemmo				Pugerna				Agra	Gemmo	Pugerna	Agra	Gemmo	Pugerna
			kV/m bei $H = \text{km}$				kV/m bei $H = \text{km}$				kV/m bei $H = \text{km}$				kV/m	kV/m	kV/m	kV/m	kV/m	kV/m
			0,5	1	3	5	0,5	1	3	5	0,5	1	3	5						
02	- 53	- 13	3,1	5,7	8,0	5,5	2,7	5,1	7,3	5,2	6,8	12	12	6,6	4,5	3,6	6	1,9	1,2	-
17	+ 270	? <sup>1)</sup>	?	-	-	-	?	-	-	-	?	-	-	-	35	31	25	14,8	10	-
33(1)	- 26	- 7,5	1,8	3,3	4,6	3,2	1,6	2,9	4,2	3,0	4,0	6,8	6,8	3,8	< 1	5	2	< 0,5	1,7	-
33(2)	- 15	- 3	0,72	1,3	1,8	1,25	0,63	1,2	1,7	1,2	1,6	2,7	2,7	1,5	< 1	2,6	< 1	< 0,5	0,9	-
107	+ 11	+ 2,5	0,60	1,1	1,5	1,05	0,53	1,0	1,4	1,0	1,3	2,25	2,25	1,25	< 3	< 3	< 3	< 1,3	< 1	-
115	- 38	- 12	2,9	5,3	7,3	5,0	2,5	4,7	6,7	4,8	6,4	11	11	6,1	< 3	12	< 3	< 1,3	4	-
116	- 27	- 4	0,96	1,75	2,5	1,7	0,84	1,55	2,2	1,6	2,1	3,6	3,6	2,05	3	2,3	1,5	1,3	0,8	-
140	- 50	- 6,5	1,6	2,9	4,0	2,7	1,4	2,5	3,7	2,6	3,5	6	6	3,3	< 3	< 3	3	< 1,3	< 1	-
141	- 55	- 8	1,9	3,5	5,0	3,3	1,7	3,1	4,5	3,2	4,3	7,2	7,2	4,1	6	3	3,6	2,5	1	-
142	- 65														6	3	4,5	2,5	1	-
148	- 33	- 5,5	1,3	2,4	3,4	2,3	1,15	2,1	3,1	2,2	2,9	5	5	2,8	< 3	< 3	< 1	< 1,3	< 1	-
165	- 30	- 5	1,2	2,2	3,0	2,1	1,05	1,9	2,8	2,0	2,65	4,5	4,5	2,6	< 3	6	2	< 1,3	2	-

<sup>1)</sup> nicht auswertbar, Shunt defekt.

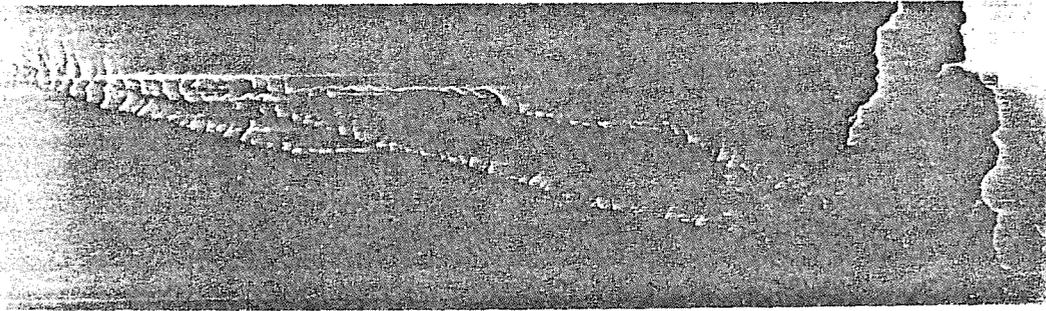


Fig. 7  
 Beispiel für das Vorwachsen eines Abwärtsblitzes aus einer negativen Ladungswolke  
 Dargestelltes Zeitintervall ca. 3 ms

ästelungen des Blitzes zu suchen. Beim ersten Teilblitz werden mit der Entladung des Blitzkanals auch sämtliche Verästelungen mitentladen. Bei den Folgeblitzen entlädt sich nur der Hauptkanal zur Wolke, was durch die photographischen Aufnahmen bestätigt wird. Daher sind die Stromkurven der Folgeblitze immer sehr einfach und ähnlich einer  $RC$ -Entladung.

Die vor dem Einsetzen eines Blitzes in den San Salvatore gemessenen Bodenfeldstärken sind in der Regel negativ und auffallend niedrig. Sie sind viel kleiner als die aus Wolkenladungen von 100 As berechneten Werte. Die Bodenfeldstärke springt bei nahen Blitzen hoch und endet oft mit höheren Werten als vor dem Einschlag. Dies erklärt auch die akustischen Wirkungen des leichten Knalls und des anschließenden Zischens über dem Messturm. Es muss angenommen werden, dass sich über dem Boden unter der Wolkenladung eine Schicht positiver Raumladungen befindet, die das statische Wolkenfeld teilweise abschirmen. Sie entsteht offenbar dadurch, dass infolge der negativen unteren Wolkenladungen die Bodenfeldstärke zur Ionisation der Luft über Baumspitzen und anderen spitzen Objekten ausreicht, so dass automatisch eine Begrenzung der Bodenfeldstärke erfolgt. Eine formal ähnliche Erscheinung besteht bekanntlich beim Schönwetterfeld, wo der ständige Ionenstrom positiver Träger zur Erde sich über dem Boden als Raumladung äussert [7].

Noch unklar ist die Entstehung einzelner rascher Feldsprünge zwischen den Teilblitzen in den San Salvatore, z. B. in den Oszillogrammen 115, 116, 148. Sie folgen sich in wenigen Hundertstelssekunden und sind weniger hoch als die beim Einschlag in den Berg entstehenden Sprünge der Tabelle I. Es ist denkbar, dass sie von Einschlägen in entfernte Punkte herrüh-

ren. Dann muss aber ihre relativ rasche Folge auffallen. Oder dann handelt es sich um Ausgleichsvorgänge zwischen vorher getrennten Blitzkanälen. Diese müssten durch die Feldveränderung infolge des oder der Teilblitze zum San Salvatore in den Wolken ausgelöst werden und zwar derart, dass sie von einer noch unberührten Wolkenladung ausgehend gegen den schon bestehenden Blitzkanal hinwachsen und sich in diesen stossartig entladen, indem sie diesen gewissermassen als Fangentladung benutzen. Diese Hypothese wurde bereits von *Schonland* aufgestellt, aber später wieder bezweifelt. Es ist noch nicht gelungen, diese Frage zu entscheiden. Sie bildet ohne Zweifel ein Hauptproblem beim Bau von Blitzzählern, die ausschliesslich Erdblitze zählen sollten.

Der Blitzschlag zur Erde muss als Teilstück einer grösseren Entladung betrachtet werden, die wohl nur durch Feldmessungen unter der Wolke und in ihrer Umgebung und durch oszillographische Aufnahmen der Wolkenhelligkeit erfasst werden kann. Die vorliegenden Messungen liefern den Feldverlauf sicher bis zur ms, den Stromverlauf sicher bis zur  $\mu s$ . Sie erlauben die Beurteilung des Verhaltens von Blitzzählern und jeglicher Art von Gewitter-Warngeräten.

In theoretischer Hinsicht wäre es reizvoll, die Entladung des geladenen Leaders im «return stroke» als wanderwellenartige Entladung einer mit Verlusten spezieller Art behafteten Leitung rechnerisch zu betrachten. Diese Verluste sind begründet in den Glimmentladungen radial zum Kanal, sowie im Spannungsabfall des lichtbogenartigen Kanals.

Die Messung des Spannungsabfalls in Funken beliebig kurzer Dauer mit beliebig kleiner Ladung, sowie in einer dem Leader-Vorwachsen entsprechenden Entladung bildet sodann

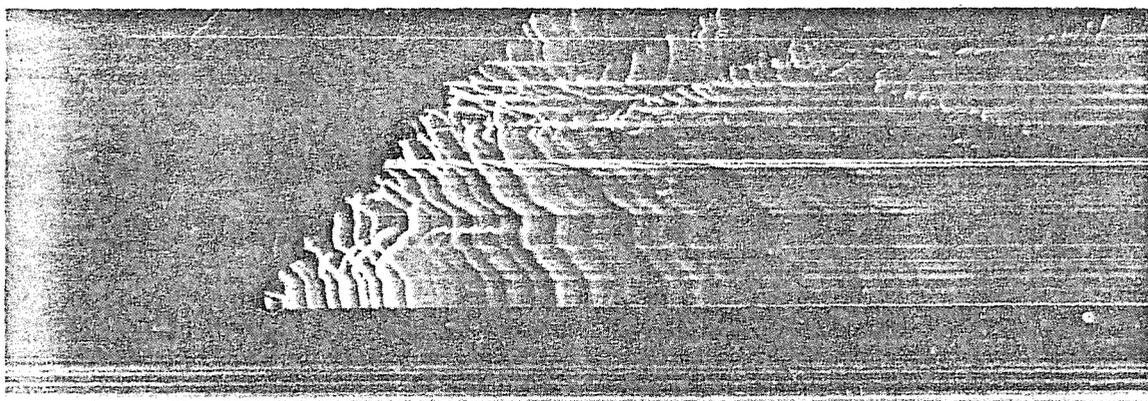
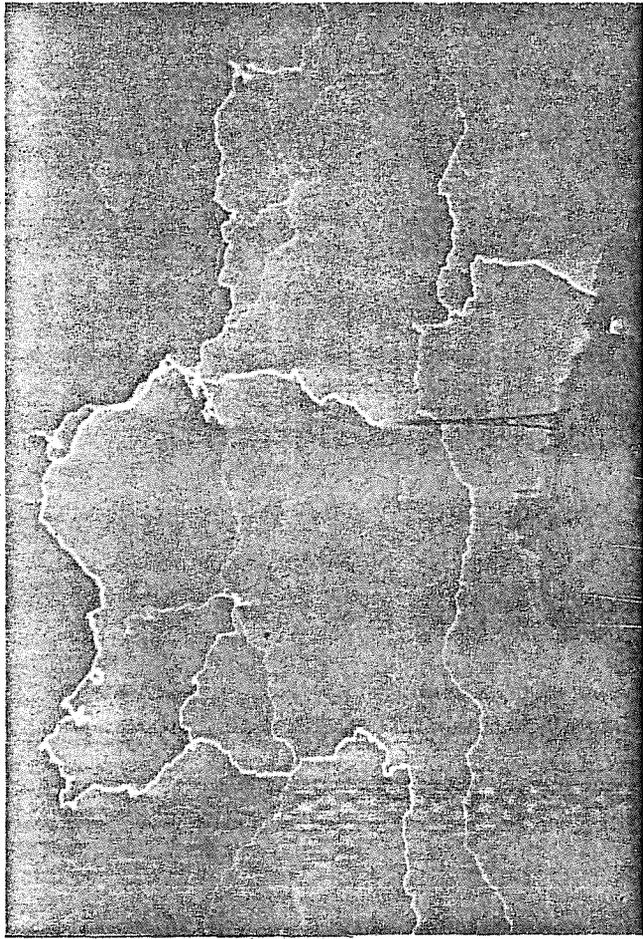
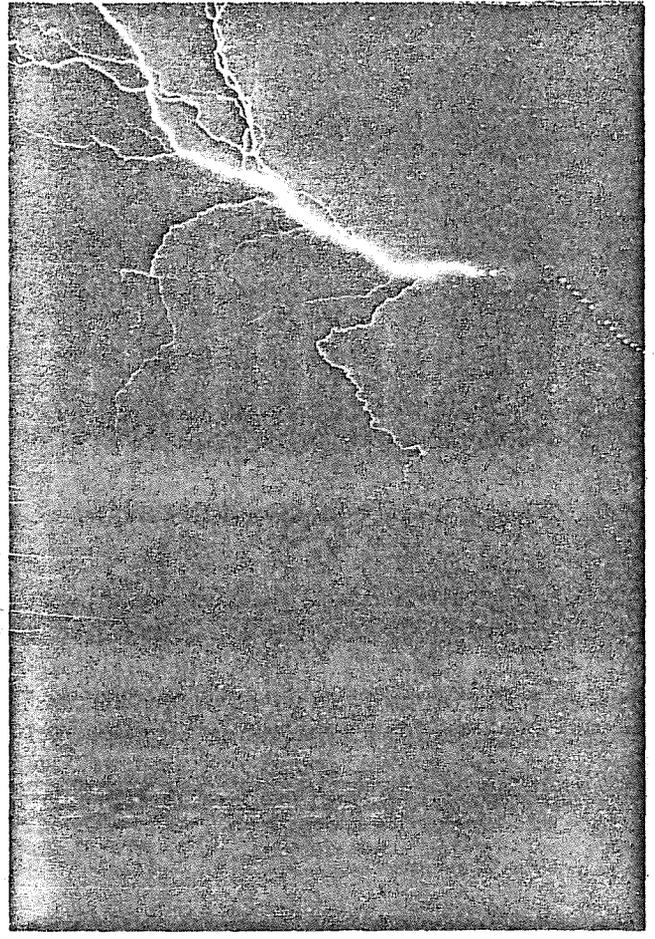


Fig. 8  
 Beispiel für das Vorwachsen eines Blitzes aus der Turmspitze nach einer positiven Ladungswolke  
 Dargestelltes Zeitintervall ca. 2 ms



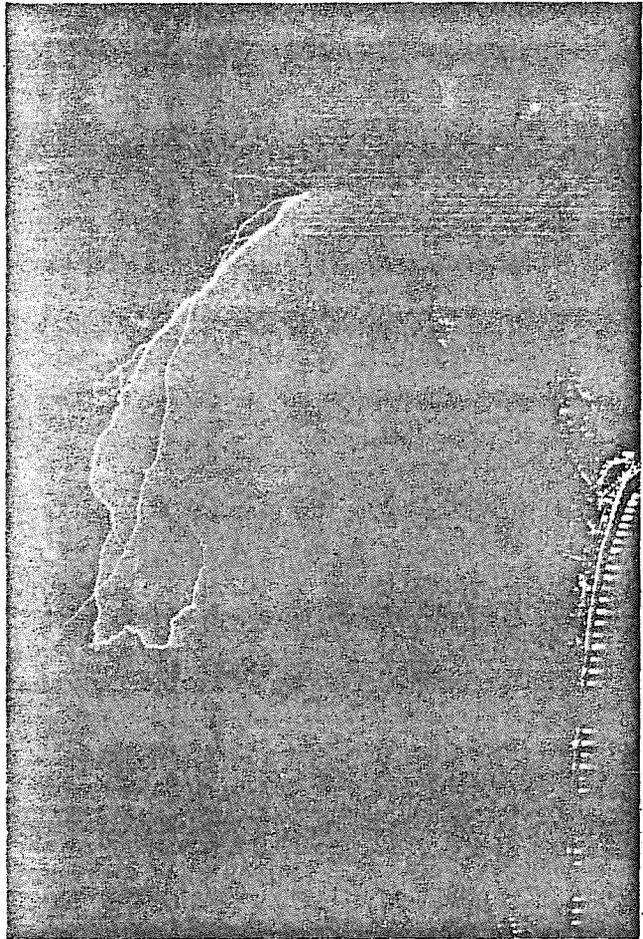
Aufwärtsblitz

Fig. 10



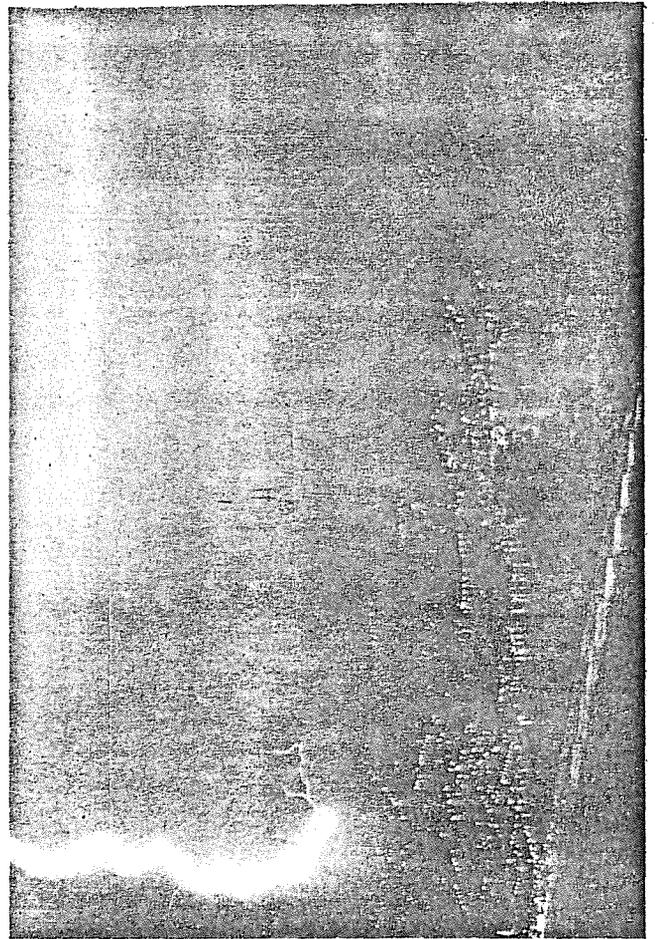
Aufwärtsblitz

Fig. 12



Aufwärtsblitz

Fig. 9



Aufwärtsblitz

Fig. 11

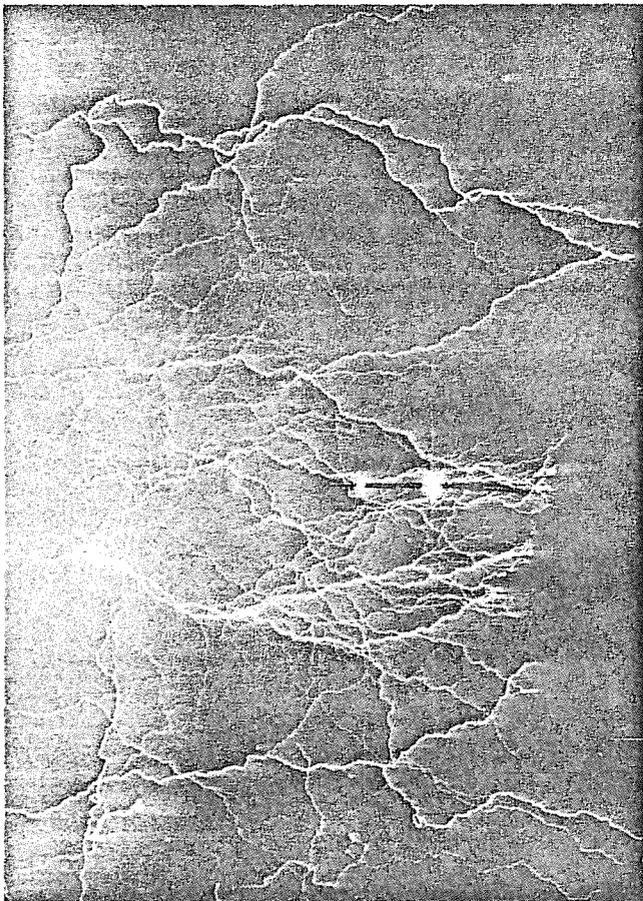


Fig. 13  
Abwärtsblitze



Fig. 14  
Abwärtsblitze

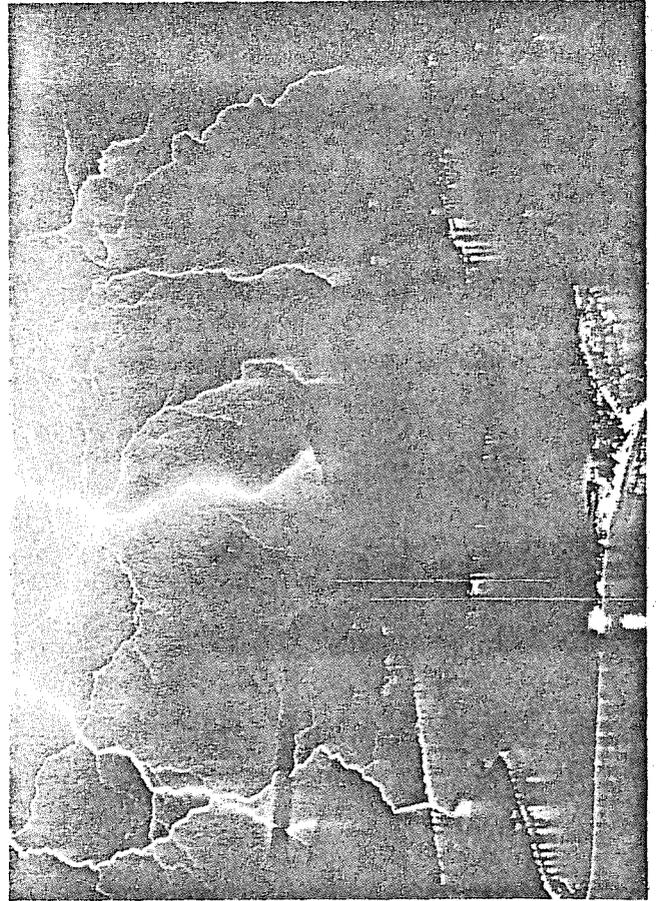


Fig. 15  
Abwärtsblitze

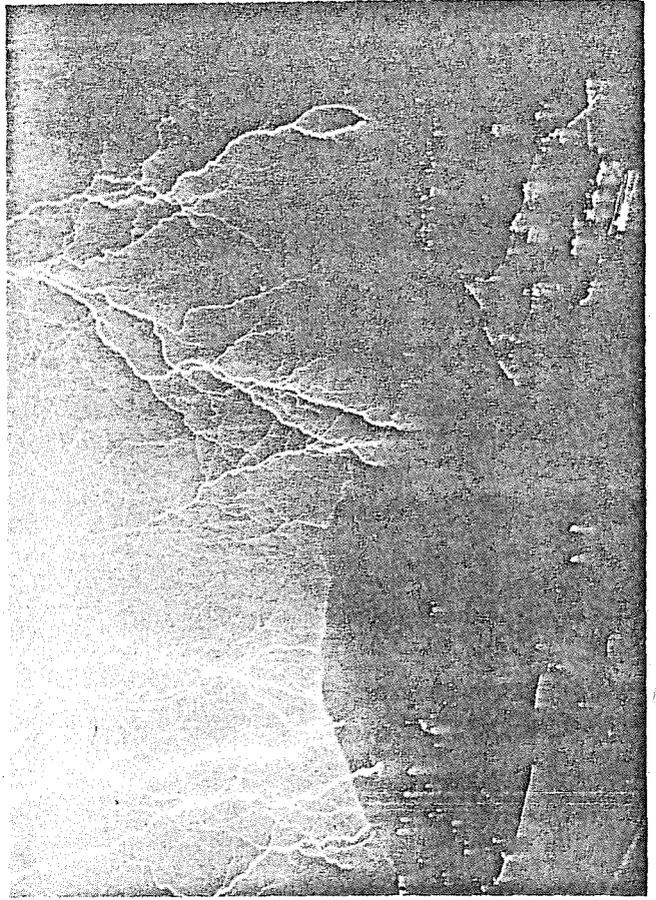


Fig. 16  
Abwärtsblitze

ein weiteres noch ungelöstes, theoretisch und experimentell reizvolles Problem.

#### 14. Blitzphotographie

In der Berichtsperiode wurden insgesamt ca. 3000 Blitze während der Nachtzeit vom Monte San Salvatore aus mit der üblichen Kamera auf ruhendem Film photographiert. Ausserdem gelangen einige Aufnahmen auf rasch bewegtem Film, die das Vorwachsen des Blitzkanals zeigen. Die Figuren 7 und 8 geben dafür zwei Beispiele. In negativ geladenen Kanälen wurden die ausgeprägten Stufen bestätigt. Es ist hier aus Platzgründen nicht möglich, auf Einzelheiten einzugehen. Dagegen kann erwähnt werden, dass sich unter allen Blitzphotos keine einzige findet, die auf eine sekunden- oder minutenlange, mehr oder weniger punkt- oder kugelförmige oder sonstwie rätselhafte Lichterscheinung hinweisen würde («Kugelblitz»). Dagegen lässt sich der sog. «Perlschnurblitz» beim Löschen des Lichtbogens kräftiger, langdauernder Blitze durch Kino-Aufnahmen einwandfrei nachweisen. Zum Abschluss sollen einige schöne Blitzphotos reproduziert werden, die einem besondern Album von Blitzbildern entnommen wurden (Fig. 9...17).

Die Blitzphotographie hat für das Verständnis des Blitzvorganges wesentlich beigetragen. Die Verästelungen des Blitzkanals sind das beste Mittel, die Lage von Raumladungen festzustellen, wenigstens unterhalb der Wolkenschicht. Schön wäre es, diese feinen Verästelungen auch innerhalb der undurchsichtigen Wolke zu erfassen! Wenn das Blitzproblem für die Beurteilung von Blitzschutzfragen wohl als genügend gelöst

bezeichnet werden darf, so bleiben doch immer noch physikalische Detailprobleme, die den Blitzforscher fesseln können.

Die beschriebene Blitzforschung wurde in erster Linie durch die finanzielle Unterstützung des Schweiz. National-Fonds für wissenschaftliche Forschung ermöglicht sowie durch Zuschüsse der FKH und der Schweiz. Stiftung zur Förderung Schweiz. Volkswirtschaft. Die Durchführung der Messungen und die Blitzphotographie auf dem Monte San Salvatore oblag *H. und H. Binz*, bei der Auswertung halfen überdies die Assistenten des Hochspannungs-Laboratoriums der ETH und der FKH, sowie Dipl.-Ing. *H. Kröniger* aus Pretoria und Dipl.-Ing. *H. Berkes*.

#### Literatur

- [1] *K. Berger et E. Vogelsanger*: Nouveaux résultats d'observation de la foudre. Rapport Cigré N° 33-03, 1968.
- [2] *K. Berger*: Methoden und Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano in den Jahren 1963—1971. Bull. SEV 63(1972) 24, S. 1403...1422.
- [3] *R. H. Golde*: Theoretische Betrachtungen über den Schutz von Blitzableitern. ETZ-A 82(1961)9, S. 273...277.
- [4] *F. Schwab*: Berechnung der Schutzwirkung von Blitzableitern und Türmen. Bull. SEV 56(1965)17, S. 678...683.
- [5] *D. Müller-Hillebrand*: Zur Physik der Blitzentladung. ETZ-A 82(1961)8, S. 232...249.
- [6] *L. L. Oh*: Measured and calculated spectral amplitude distribution of lightning sferics. Trans. IEEE EMC 11(1969)4, p. 125...130.
- [7] *R. Mühleisen und H.-J. Fischer*: Das lufterlektrische Feld in der bodennahen Schicht. Tübingen, Astronomisches Institut der Universität Tübingen, 1967.

Adresse des Autors:

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