Oszillographische Messungen des Feldverlaufs in der Nähe des Blitzeinschlags auf dem Monte San Salvatore

Autor(en): **Berger, K.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **64 (1973)**

Heft 3

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915510

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Oszillographische Messungen des Feldverlaufs in der Nähe des Blitzeinschlags auf dem Monte San Salvatore [1])

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 weitern 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][1]). 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.

[1]) Siehe auch Bull. SEV 63(1972)24, S. 1403...1422.

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_7). Bei grösseren Strömen ist der Ausschlag auf ca. 40 mm begrenzt.

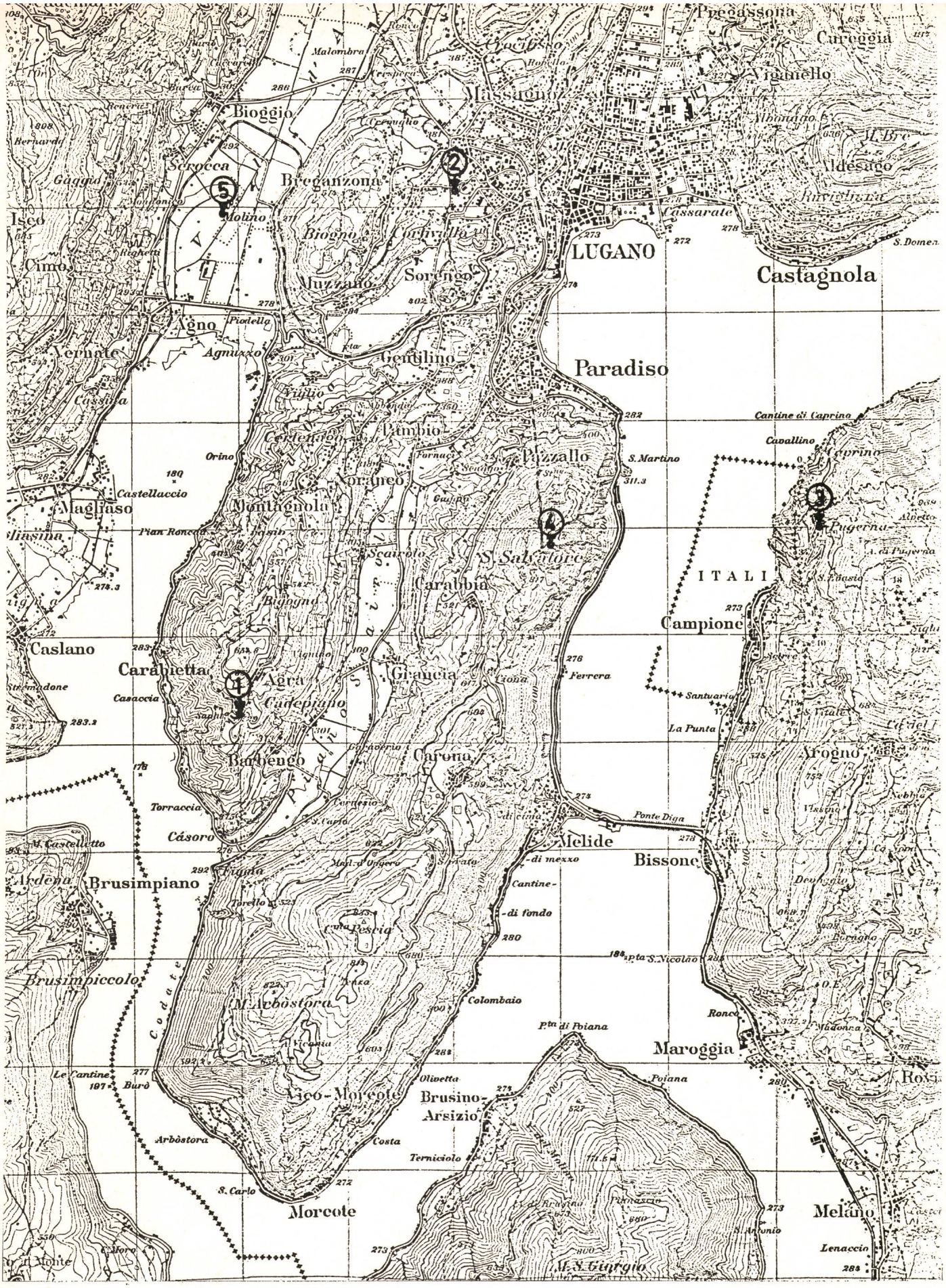
Ein zweiter Messbereich erfasst Ströme von 1 A mit ca. 15 mm im Original linear, grössere Ströme nicht linear mit maximal ca. 27 mm. Der Strom wird durch das Ansprechen der Funkenstrecke auf dem Turm auf ca. 4 A begrenzt. Der grösste Messwert ist 1,3 A. Der Verlauf der Vorstromkurven zeigt, dass es sich 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

[2]) 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 Nullinie in Agra, Maßstabstrecke A zum Teil 10 kV/m, zum Teil 30 kV/m
- G Feldverlauf mit Nullinie für Gemmo, Maßstabstrecke G zum Teil 10 kV/m, zum Teil 30 kV/m
- P Feldverlauf mit Nullinie für Pugerna, Maßstabstrecke P zum Teil 10 kV/m, zum Teil 30 kV/m
- S1 Feldverlauf mit Nullinie für San Salvatore, Aussichtsterrasse auf dem Kirchendach, Maßstabstrecke S1 = 100 kV/m
- S2 Feldverlauf und Nullinie 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 Messtürmen, gemäss Auswertung der Strom-Oszillogramme;

b_1) Stationäre Feldstärke vor dem Beginn der Feldstärkeschwankungen der Blitzvorentladung oder kurz «Feldstärke vor dem Blitz», gemessen in kV/m [3]);

b_2) Bei den Kolonnen «San Salvatore» ausserdem die grösste Feldstärke während des Blitzeinschlages, in kV/m [3]);

b_3) Stationäre Feldstärke nach Beendigung der Feldstärkeschwankungen des Blitzes oder kurz die «Feldstärke nach dem Blitz», in kV/m [3]);

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

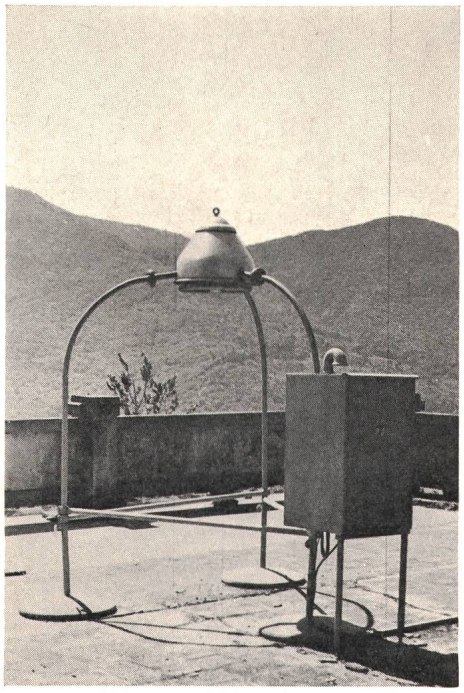


Fig. 2
Einbau der Feldmühle auf dem Dach des Sanatoriums Agra

[3]) Die Zahlenwerte zu a), b), c) sind in der Tabelle I untereinander gesetzt.

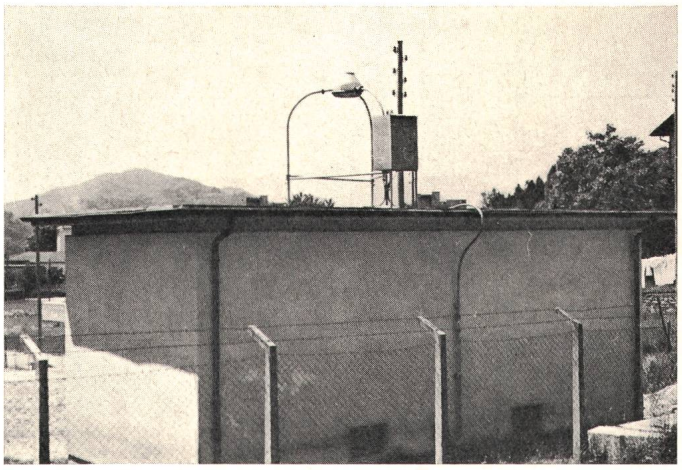


Fig. 3
Einbau der Feldmühle auf dem Dach der Schaltkabine Gemmo des Elektrizitätswerkes Massagno

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 postive 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 Feldstärke 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.

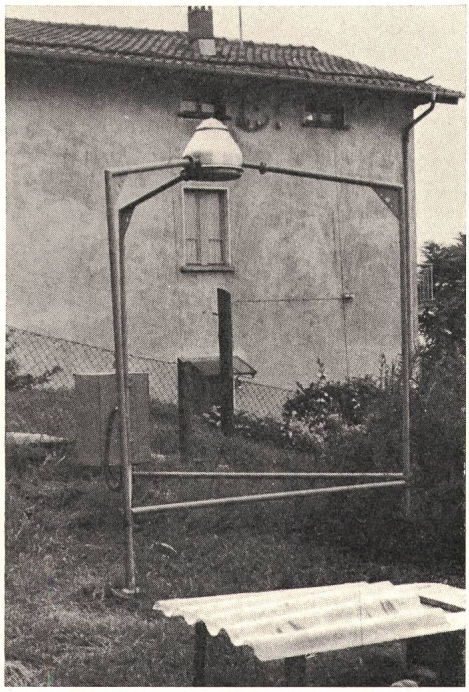


Fig. 4
Einbau der Feldmühle im Garten des Zollhauses Pugerna

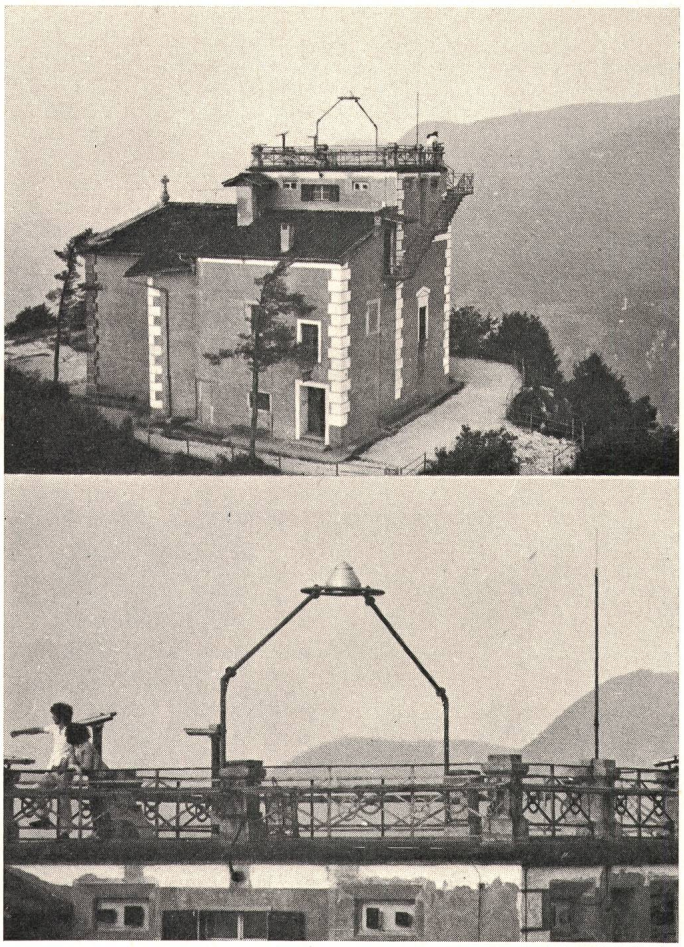


Fig. 5
Einbau der Feldmühle auf der Aussichtsterrasse auf dem San Salvatore
Blickrichtung nach Osten

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 Oszillogrammes 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 errreicht 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 Zehntelssekunde den Wert von ca. + 350 kV/m vor der Feldmühle auf dem Kirchendach (Kurve S1) und ca. + 390 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 A und springt dann plötzlich auf einen Impuls von + 11 kA an (Punkt 2). Dem kurzen Impuls folgt ein positiver Nachstrom von ca. 2 kA, der in 0,13 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 kA während ca. 1 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

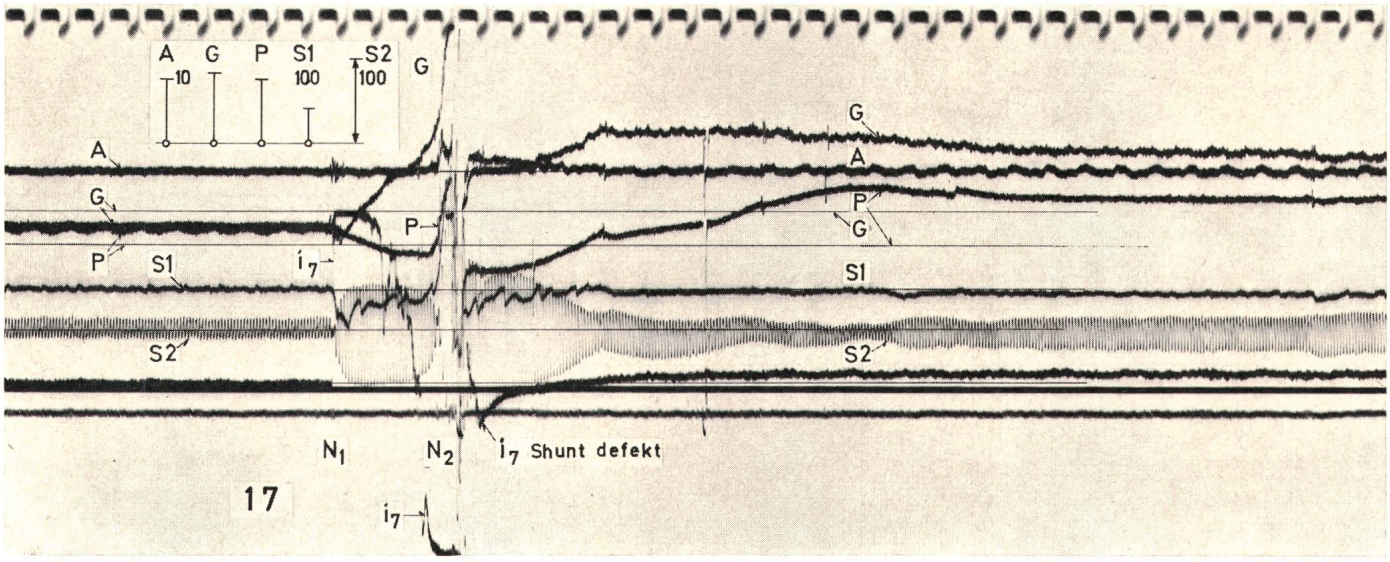
Fig. 6
Oszillogramm-Beispiele des Feldverlaufs bei Blitzeinschlägen am Monte San Salvatore

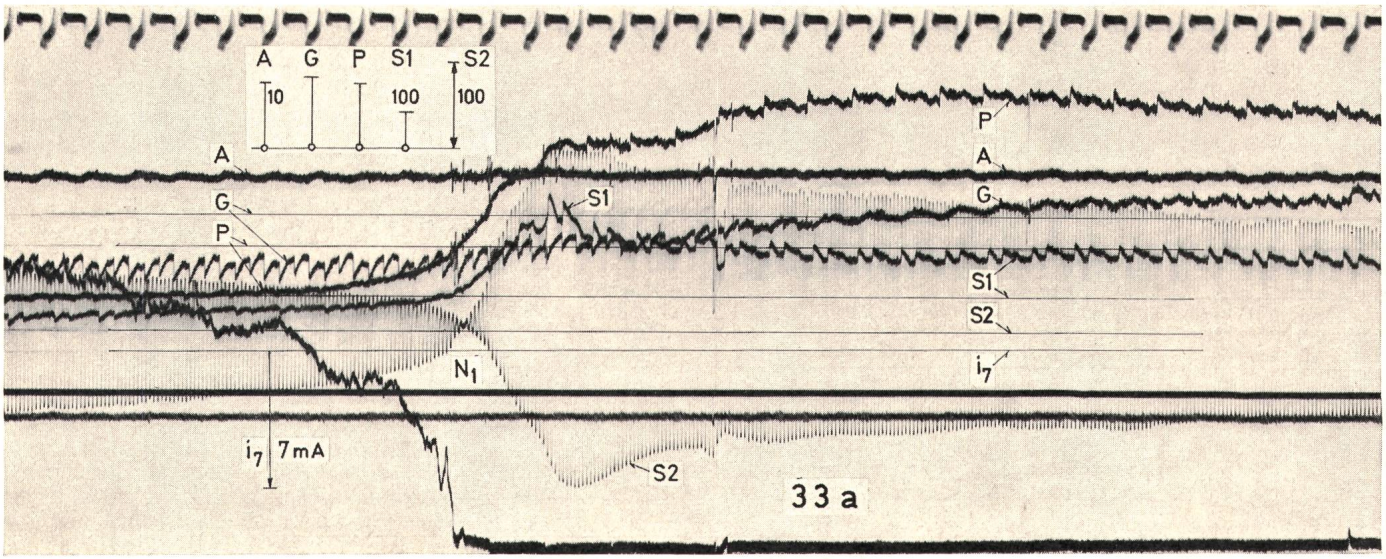
Bezeichnungen:

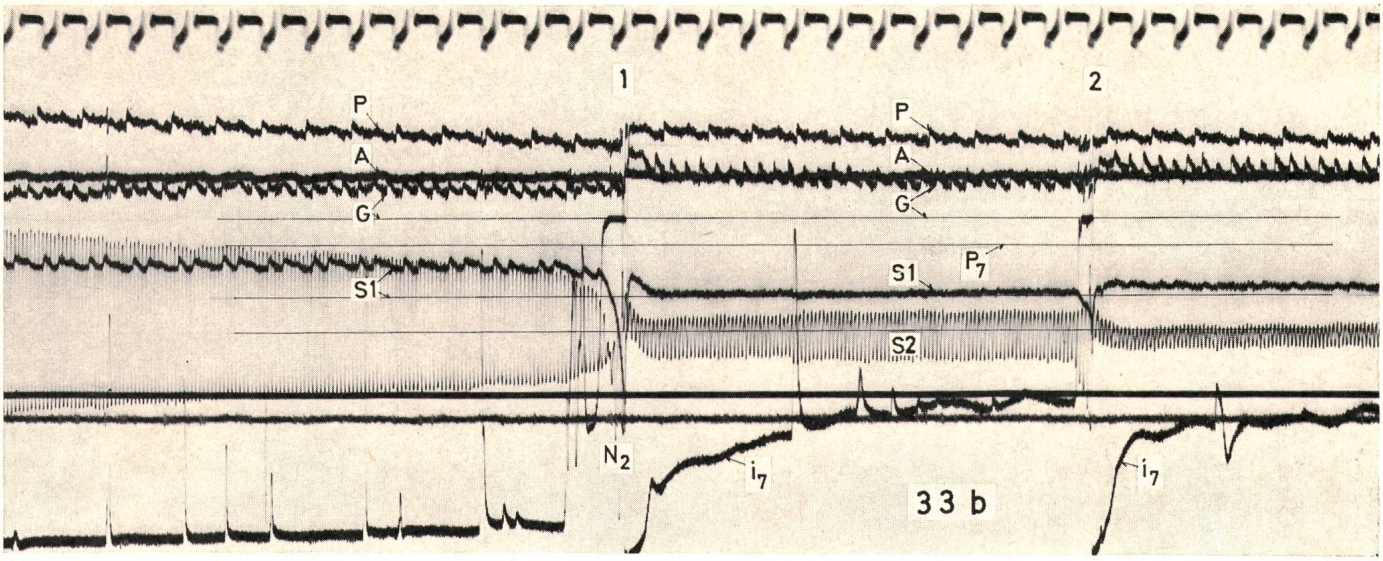
A	Agra	*N*	Nulldurchgang
G	Gemmo	i_7	Vorentladungsstrom, Bereich 7 mA
P	Pugerna	i_1	Vorentladungsstrom, Bereich 1 A
S1	San Salvatore (Kirchendach)	*Oben:*	Eichfrequenz 100 Hz
S2	San Salvatore (Turmflanke)		Frequenz von S2 ca. 1150 Hz

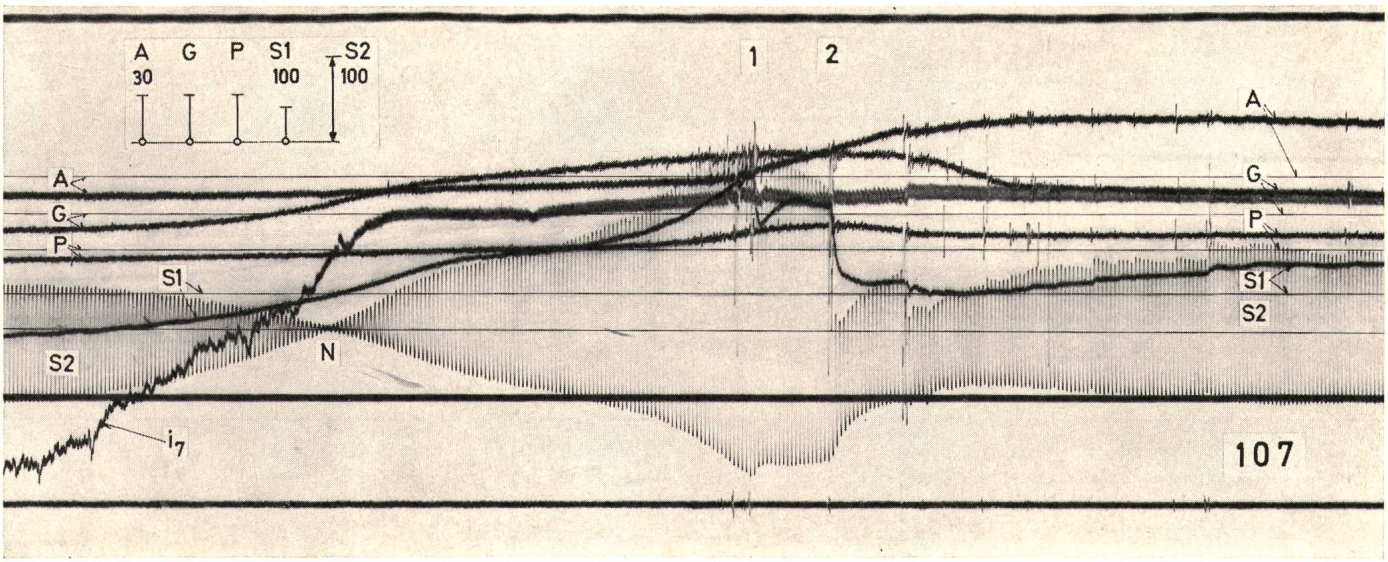
Maßstabstrecken gelten für E = 10 / 30 / 100 kV/m

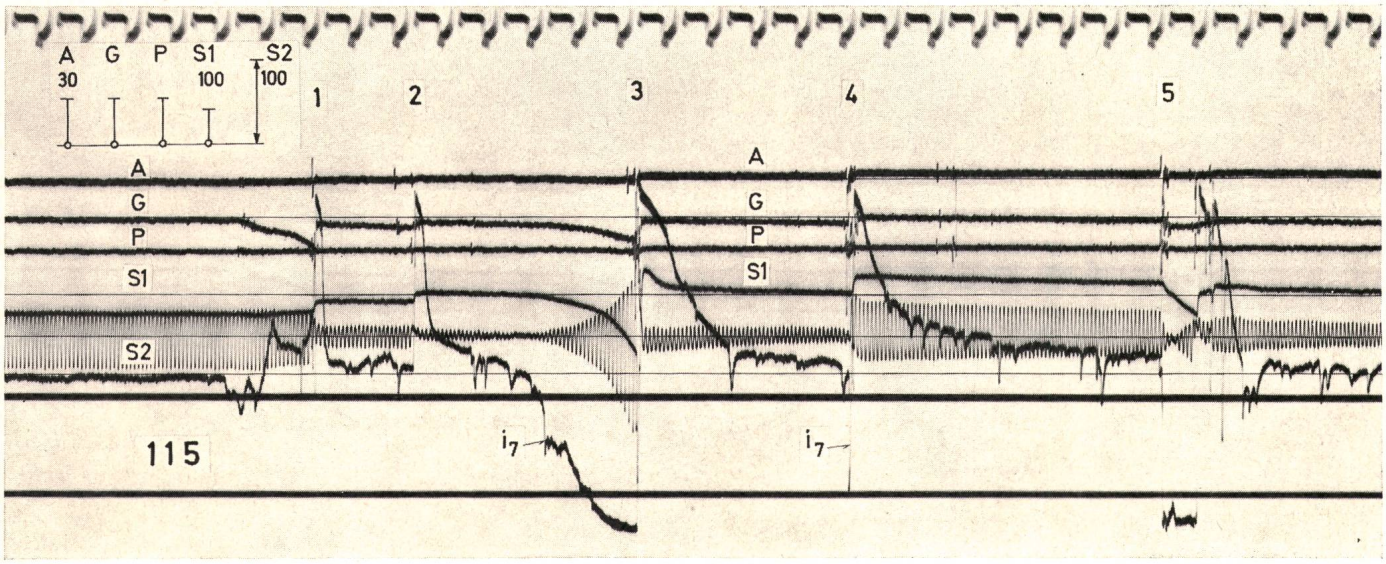
Die beim Strecken-Schema A – G – P – S1 – S2 notierten Zahlen bedeuten die Feldstärke-Maßstäbe für 10, 30 oder 100 kV/m

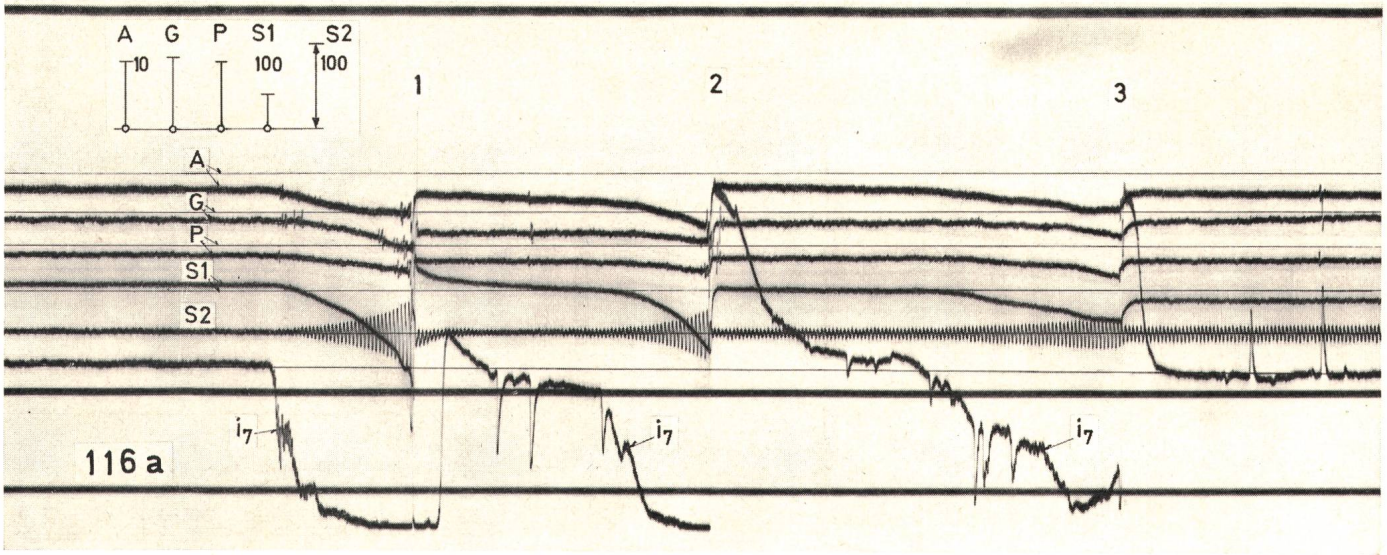


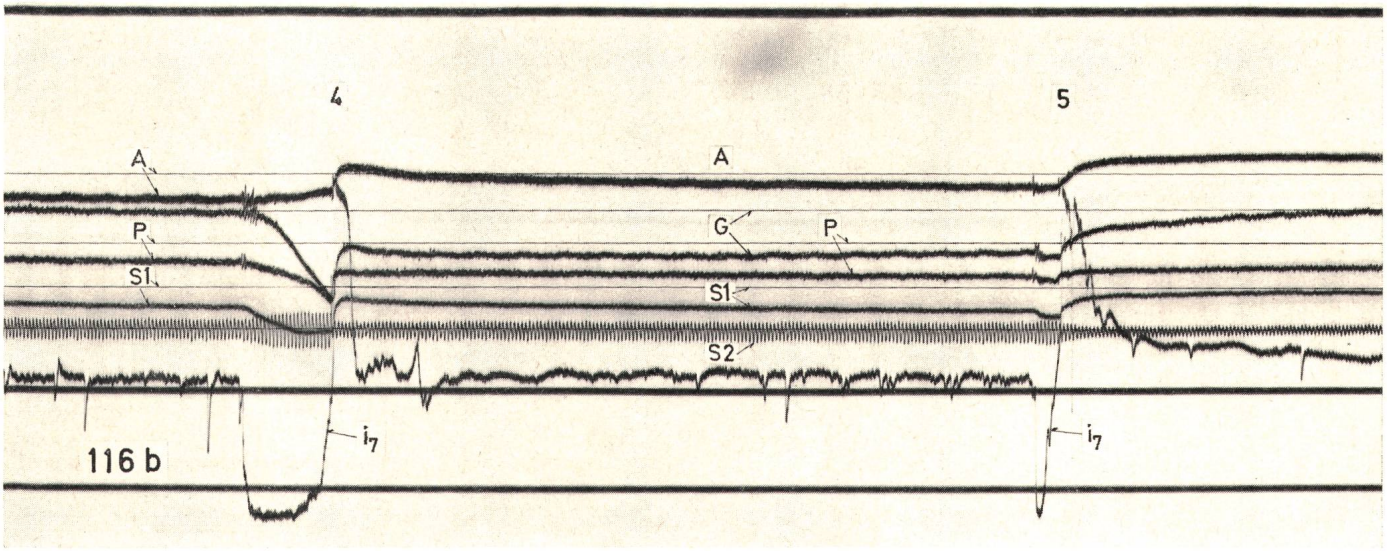


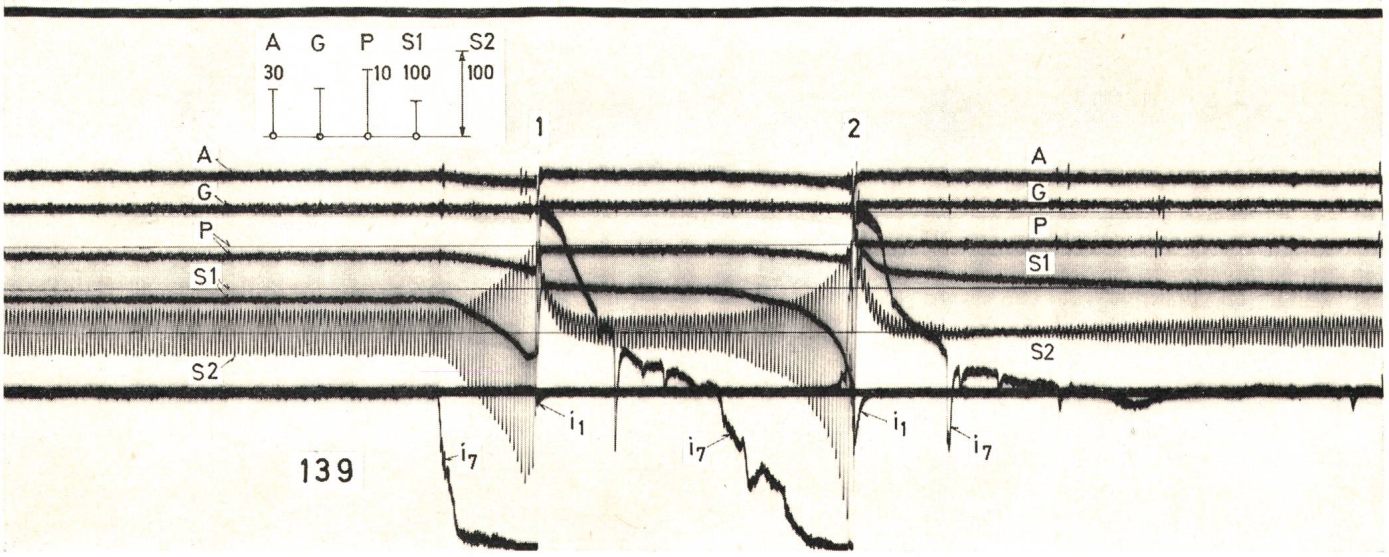

1
2
P
A
G
S1
P7
S2
N2
i7
33 b

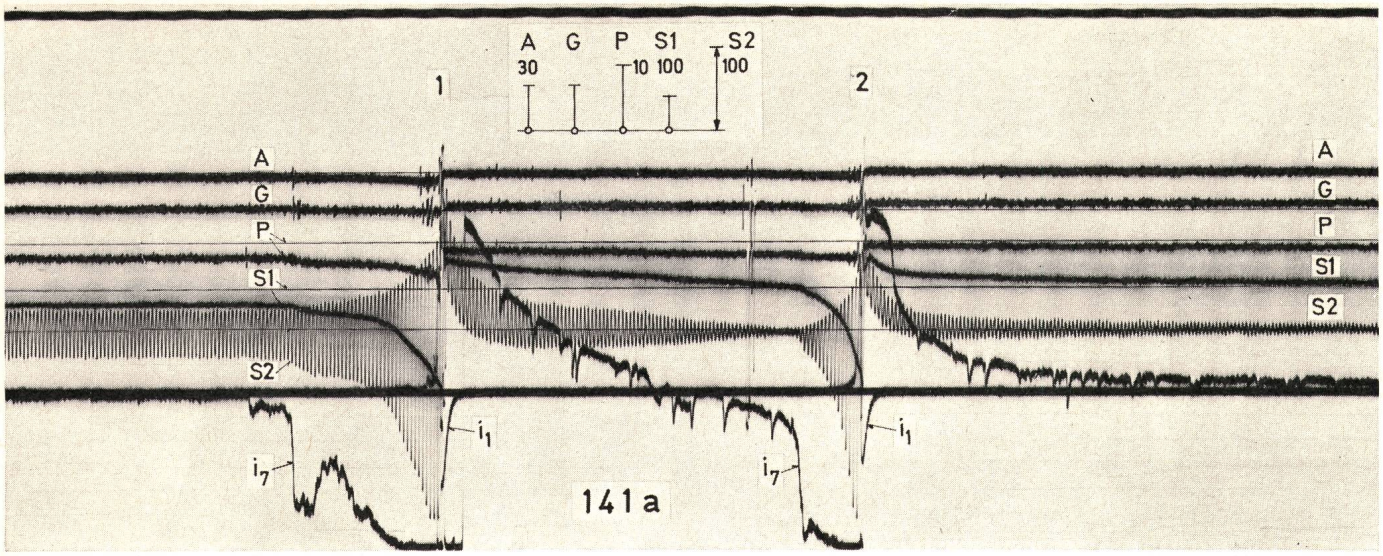

A G P S1 S2
30
100
100
1
2
A
G
P
S1
S2
N
i7
107


A G P S1 S2
30
100
100
1
2
3
4
5
A
G
P
S1
S2
i7
115

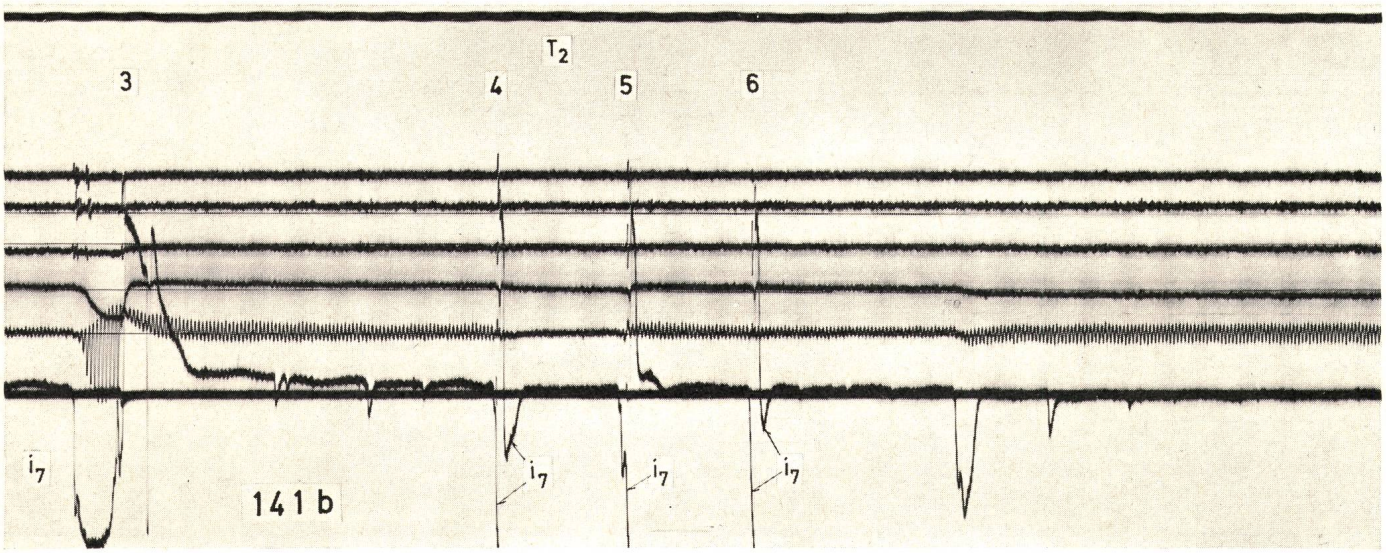

A G P S1 S2
10 100 100
1
2
3
A
G
P
S1
S2
i7
i7
i7
116 a


4
5
A
P
S1
A
G
P
S1
S2
i7
i7
116 b

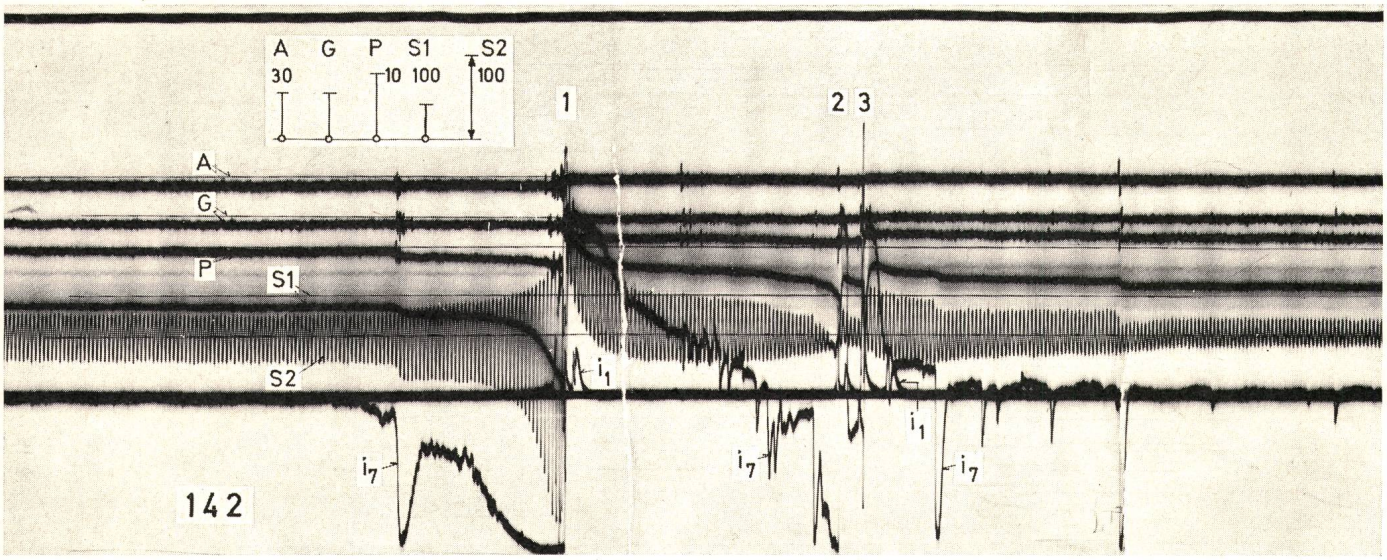

A G P S1 S2
30 10 100 100
1
2
A
G
P
S1
S2
A
G
P
S1
S2
i1
i1
i7
i7
i7
139



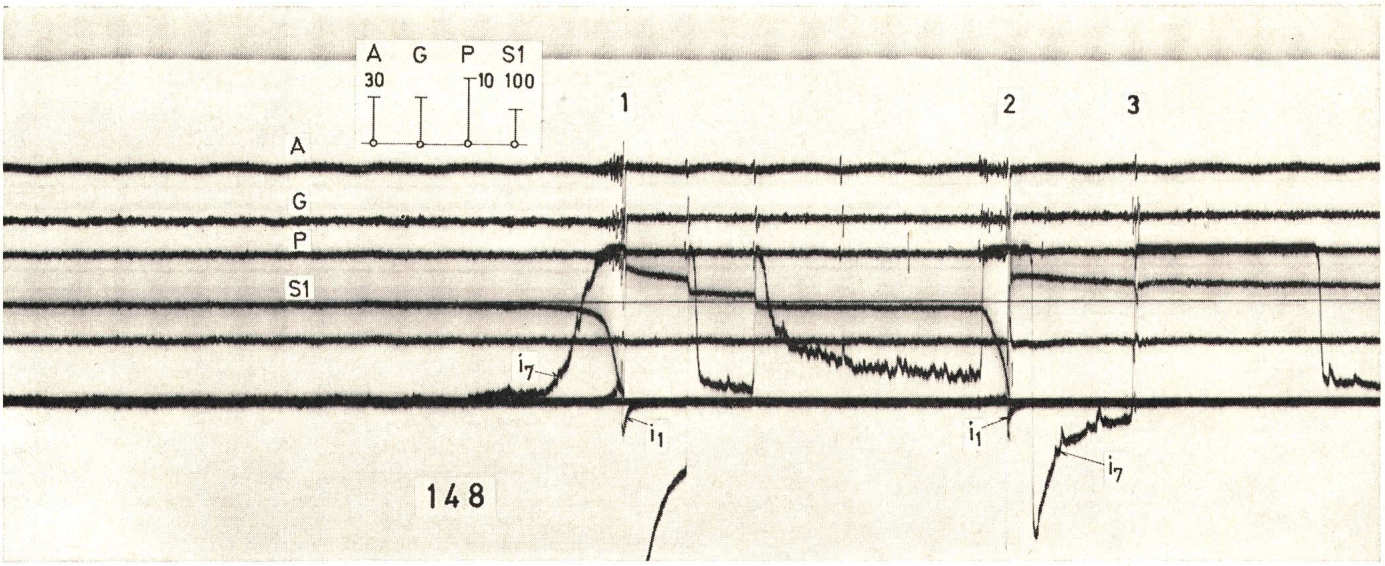
141 a

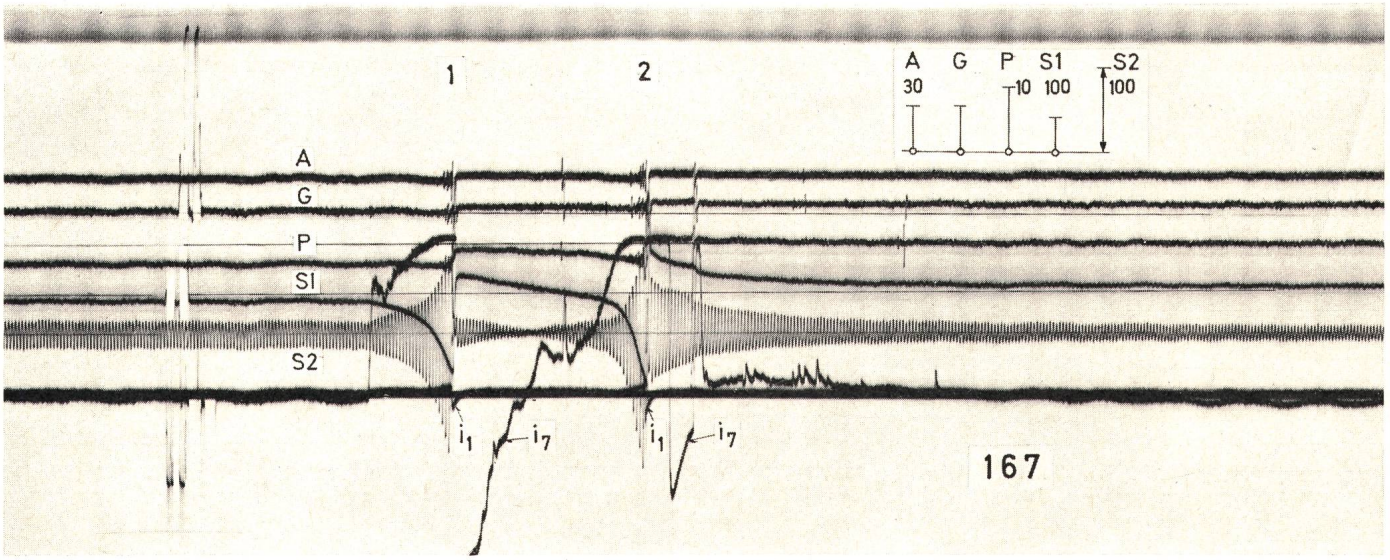


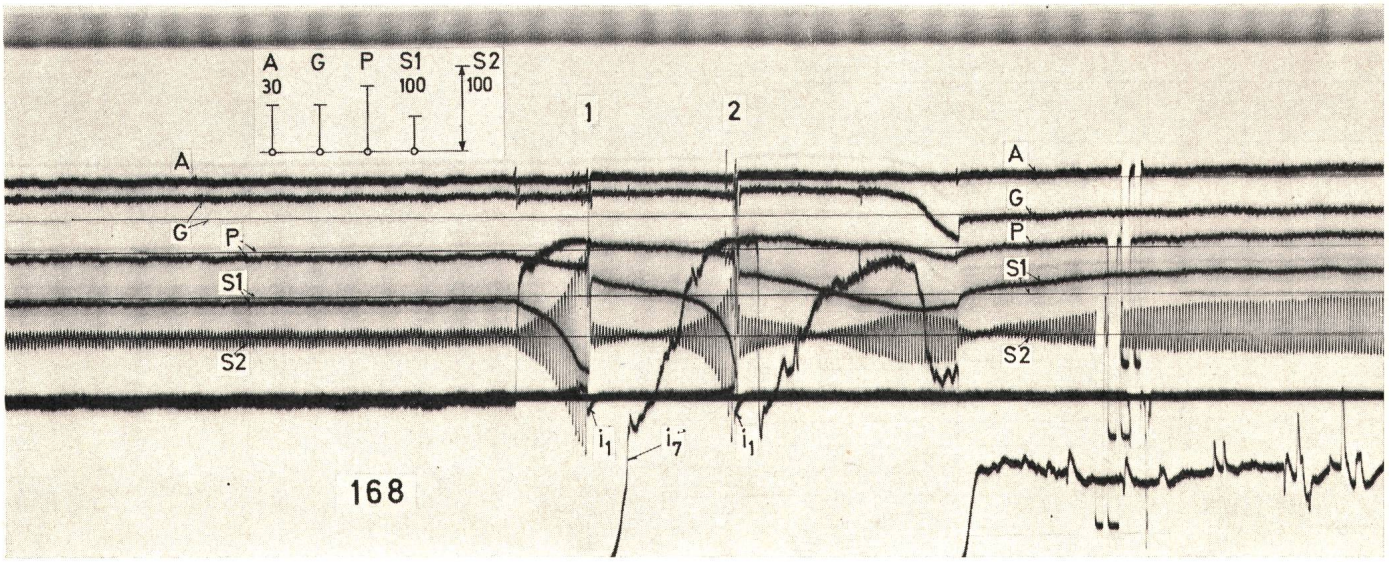
141 b



142


A G P S1
30
10 100
1
2
3
A
G
P
S1
i_7
i_1
i_1
i_7
148


1
2
A G P S1 S2
30
10 100
100
A
G
P
S1
S2
i_1
i_7
i_1
i_7
167


A G P S1 S2
30
100
100
1
2
A
G
P
S1
S2
A
G
P
S1
S2
i_1
i_7
i_1
168

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 E kV/m	Agra $\Delta E/\Delta t$ kV/m · ms	Gemmo E kV/m	Gemmo $\Delta E/\Delta t$ kV/m · ms	Pugerna E kV/m	Pugerna $\Delta E/\Delta t$ kV/m · ms	San Salvatore «neu» E kV/m	San Salvatore «neu» $\Delta E/\Delta t$ kV/m · ms	San Salvatore «alt» E kV/m	San Salvatore «alt» $\Delta E/\Delta t$ kV/m · ms	Dauer der Vorentladung ms	Dauer des «leaders» ms	Dauer des Gesamtblitzes ms	Bemerkungen
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 33 (2)	− 26 − 15	− 8,5 + 7,5	0 0 0 0	< 1 < 1	− 4,7 + 6 + 5 + 5	5/1 2,6/1	+ 5,5 + 17 + 16 + 13	2/1 < 1	− 50 − 320 0 + 14 − 62 − 31	380/1 85/1	− 110 − 190 − 45 − 53 − 190 − 17	200/1 170/1	670 670 + 125	7,5 4	790	2)
107 (1) 107 (2)	+ 2 Fangentladung zu (2) + 11	− + 72	− 8 0 + 16 + 25	< 3 < 3	− 4,7 + 40 + 40 + 14	< 3 < 3	− 6,6 + 23 + 26 + 10	< 3 < 3	− 63 + 350 + 210 + 260 0 + 75	140/1 200/1,5	− 56 + 390 + 325 + 340 − + 87	70/1 170/1	380 380 + 20	≈ 0 −	700	3)
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) 116 (2)	− 27 −	− 4 −	− 2,5 − 3 − 8 0	3/1 6/1	− 1 − 2,5 − 4 − 1,5	2,3/1 2,3/1	− 1,5 − 2,5 − 4 − 4	1,5/1 2,2/1	+ 14 − 290 0 0 − 190 − 40	375/1 190/1	0 − 170 + 17 0 − 56 − 10	185/1 50/1	38 38 + 80	38 29	1100	
139 (1) T 2 139 (2)	± − 4? −	− −	0 0 0 0	6/1 4,5/1	0 + 3 + 1,5 + 6	3/1 < 3	− 1,5 0 0 − 1	3,3/1 2,2/1	− 28 − 200 0 0 − 300 + 7	220/1 400/1	− 53 − 280 0 0 − 335 0	270/1 360/1	25 25 + 84	25	850	5)
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 T 2 (2)	− 55 klein	− 8 klein	− 3 0 − 3 0	6/1 3/1	0 + 3 + 3 + 3	3/1 3/1	− 22 − 18 − 18 < 1	3,6/1 2/1	− 42 − 290 0 0 − 290 − 28	375/1 390/1	− 56 − 350 0 0 − 300 − 25	450/1 340/1	53 53 + 113	53 19	610	
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) 148 (2)	− 2 − 33	? − 5,5	0 0 0 0	< 3 < 3	0 < 1 0 + 4,5	< 3 < 3	0 < 1 0 0	< 1 < 1	0 − 280 + 70 − 14 − 280 0	380/1 350/1	− −	− −	41 41 + 102	41 7,5	800	
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	6)
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) 167 (2)	Spur − 27	? ?	0 0 0 0	< 3 < 3	0 + 3 + 3 + 6	< 3 3/1	− 3 < 1 − 2,5 0	2,5/1 3,3/1	− 21 − 240 < 10 0 − 280 < 10	290/1 400/1	− 28 − 225 < 10 0 − 260 < 10	260/1 380/1	22 22 + 51	22 30	150	
168 (1) 168 (2)	− 27 −	? −	0 0 0 + 3	< 3 < 3	+ 14 + 16 + 16 0	< 3 < 3	− 1 0 0 < 1	3,3/1 2,2/1	− 14 − 225 + 55 0 − 240 − 15	280/1 310/1	− 17 − 240 − 22 0 − 200 − 22	270/1 240/1	19 19 + 39	19 19	500	

Bemerkungen:

1) Defekt des µs-Shuntes.
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 Shuntes.
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 Zehntelssekunden 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 Vorwachsgeschwindigkeiten 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
− 290... − 320 kV/m } auf dem Kirchendach (S1)

+ 390... + 450 kV/m
− 300... − 350 kV/m } an der Turmflanke (S2)

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 ΔE 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. Blitzimpulsladung 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	Werte $\Delta E/\Delta Q$ bei einer angenommenen Höhe der Kanalladung über dem San Salvatore von H =			
	km	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 Blitzes stets weniger als 1 ms, so dass auch der Feldstärkesprung in der Regel innerhalb 1 ms erfolgt. Die begrenzte Zeitauflösung 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 ΔE von 31 kV/m innert 1 ms.

Der Zusammenhang einer Änderung der im Leader gespeicherten Wolkenladung ΔQ und der von ihr erzeugten Änderung der Feldstärke ΔE 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:

- ΔE Feldstärkeänderung bzw. Sprung innert 1 ms (kV/m);
- ΔQ Ausgeglichene 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 ΔE: ΔQ 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:

Agra: E (Feldmühle): E (Ebene) $\approx$ 2,37
Gemmo: E (Feldmühle): E (Ebene) $\approx$ 3,0

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):

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

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_7 (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 ΔE gegenüber den grossen E-Werten klein sind.

Die gleichzeitige Registrierung der Feldstärke E und des im wesentlichen als Verschiebungsstrom zu bezeichnenden Stromes $i_7 \approx dE/dt$ 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_7 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 Zehntelssekunden («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 Teilbitz 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 ΔE in den Aussenstationen innert 1 ms infolge von 12 Blitzstrom-Impulsen in den Monte San Salvatore

Tabelle III

Oszillogramm Nr.	$\hat{i}$ kA	ΔQ 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 = km				kV/m bei H = km				kV/m bei H = 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	?[1])	?	−	−	−	?	−	−	−	?	−	−	−	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	−	unbestimmt
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	−	

[1]) nicht auswertbar, Shunt defekt.

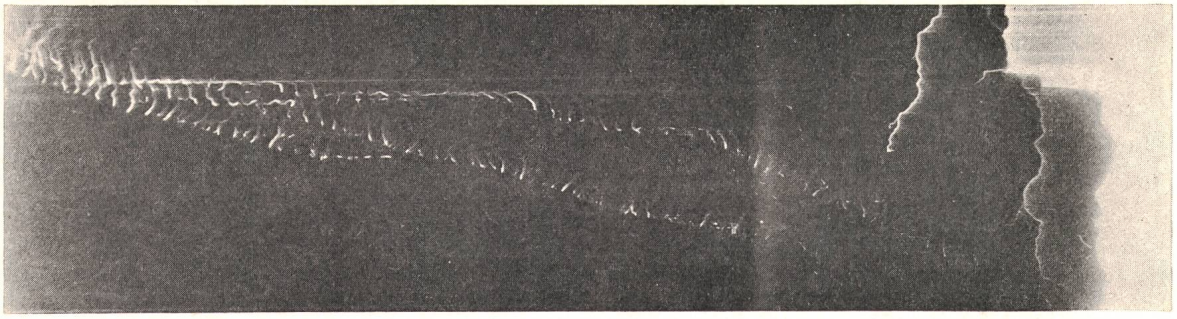


Fig. 7
Beispiel für das Vorwachsen eines Abwärtsblitzes aus einer negativen Ladungswolke
Dargestelltes Zeitintervall ca. 3 ms

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 photographischn 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 herrühren. 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 µs. 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

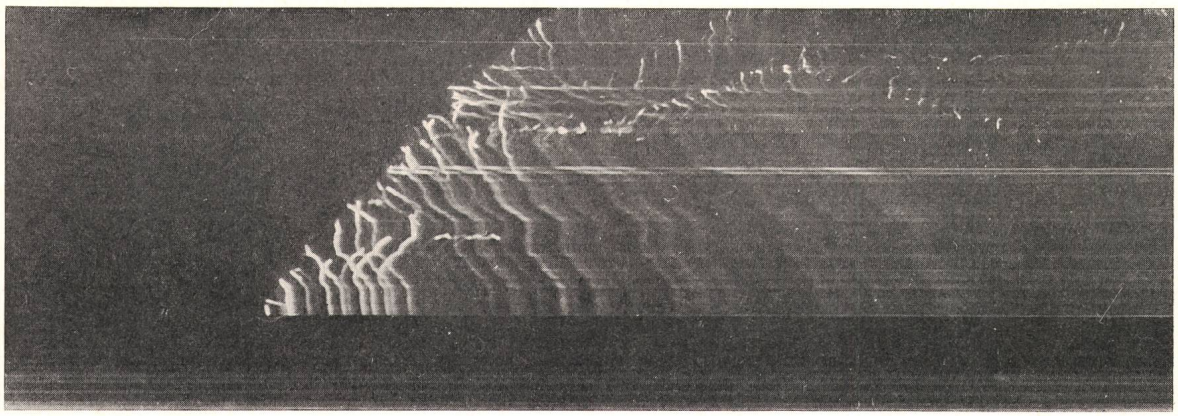


Fig. 8
Beispiel für das Vorwachsen eines Blitzes aus der Turmspitze nach einer positiven Ladungswolke
Dargestelltes Zeitintervall ca. 2 ms

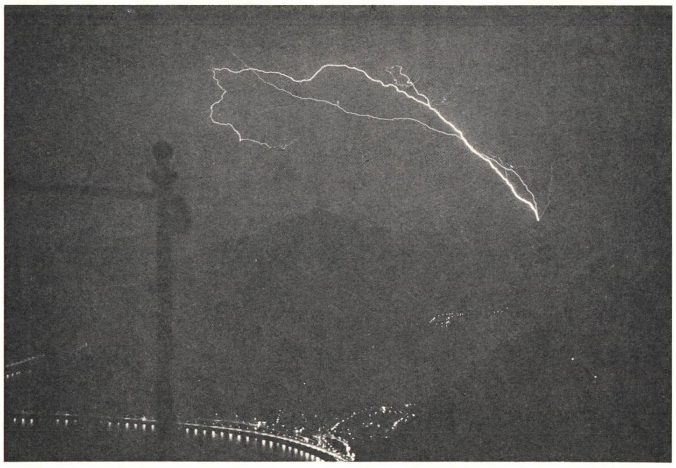


Fig. 9 **Aufwärtsblitz**

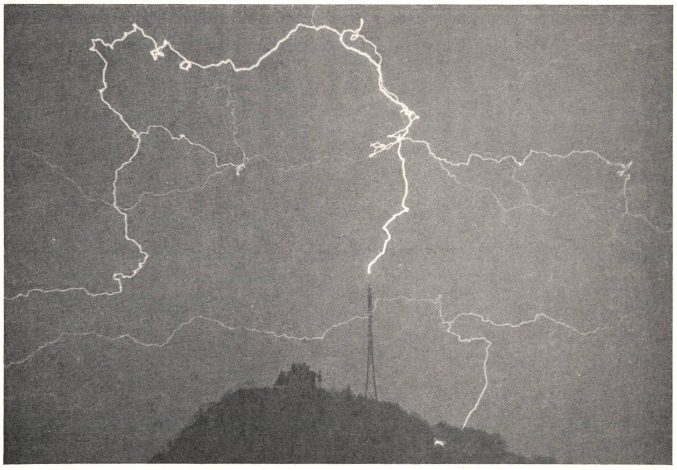


Fig. 10 **Aufwärtsblitz**

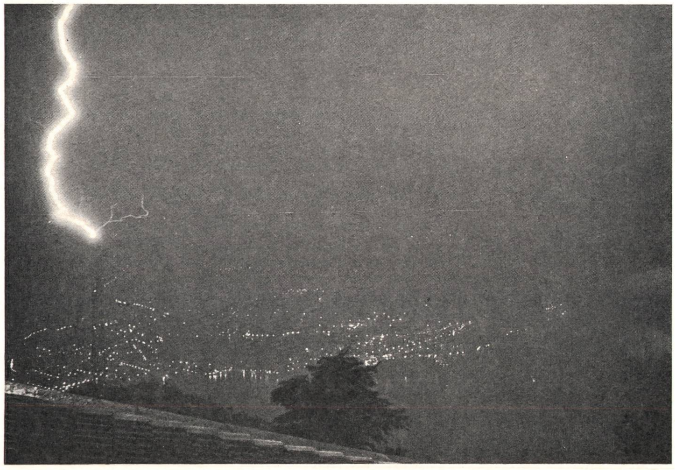


Fig. 11 **Aufwärtsblitz**

Fig. 12 **Aufwärtsblitz**

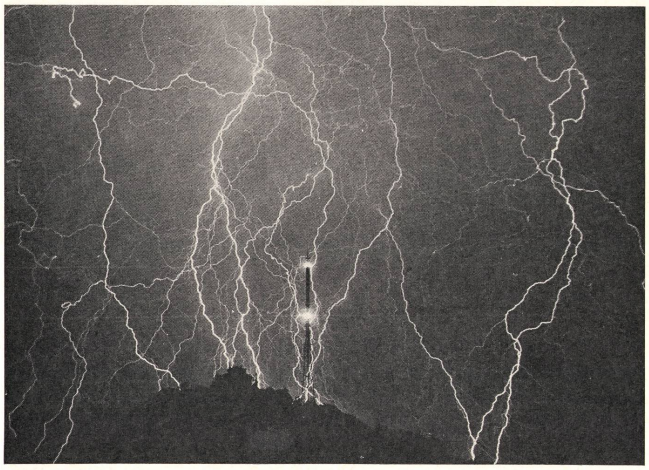


Fig. 13 **Abwärtsblitze**

Fig. 14 **Abwärtsblitze**

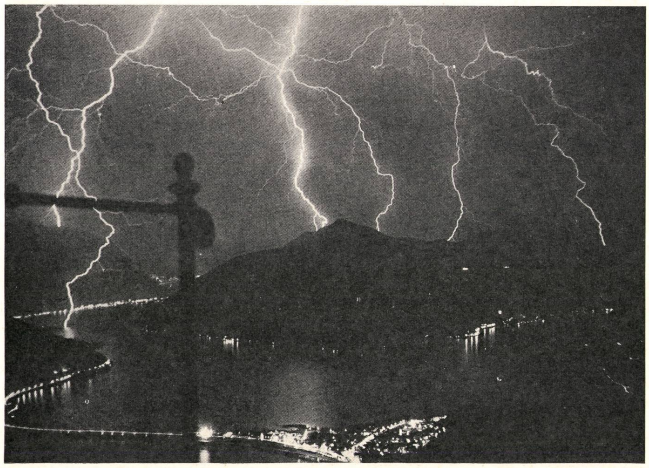


Fig. 15 **Abwärtsblitze**

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 mögich, 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 oblagen *H.* und *H. Binz,* bei der Auswertung halfen überdies die Assistenten des Hochspannungs-Laboratoriums der ETH und der FKH, sowie Dipl.-Ing. *H. Kröninger* aus Pretoria und Dipl.-Ing. *H. Berkes.*

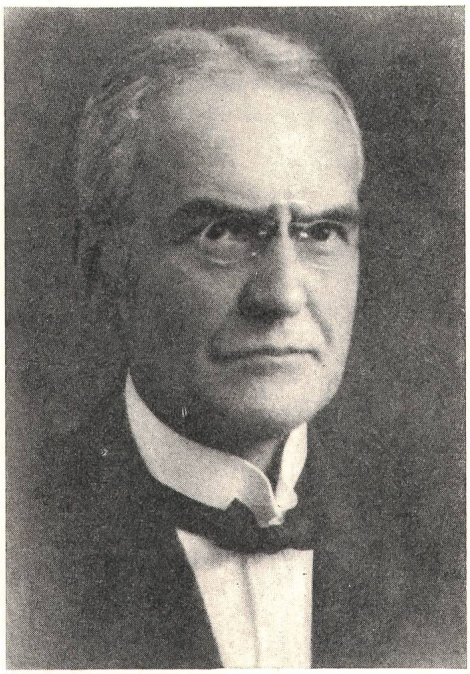
Literatur

[1] *K. Berger* et *E. Vogelsanger:* Nouveaux résutats 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 luftelektrische Feld in der bodennahen Schicht. Tübingen, Astronomisches Institut der Universität Tübingen, 1967.

Adresse des Autors:
Prof. Dr. *K. Berger,* Gstadstrasse 31, 8702 Zollikon.

JACQUES FISCHER-HINNEN

1869–1922



Der vor 50 Jahren verstorbene J. Fischer-Hinnen machte sich in dreifacher Hinsicht um die Elektrotechnik verdient: als begabter Konstrukteur von Maschinen, als Verfasser zahlreicher fachtechnischer Aufsätze und zweier Lehrbücher und schliesslich als begnadeter Lehrer am Technikum Winterthur.

Geboren in Zürich am 7. Mai 1869, absolvierte er nach dem Besuch des Gymnasiums eine Lehre und anschliessend das Technikum Winterthur. Als Neunzehnjähriger trat er bei der Maschinenfabrik Oerlikon (MFO) als Elektrotechniker ein. Neben der Arbeit vervollkommnete er sein mathematisches Wissen durch intensives Selbststudium.

Längere Zeit war er für die MFO in Spanien tätig, später schickte man ihn auf eine Studienreise nach den USA. 1895–1905 traf man ihn in Paris, Prag und Wien. Zur MFO zurückgekehrt, übernahm er den durch den Weggang Arnolds verwaisten Posten des Chefkonstrukteurs und Oberingenieurs der Kleinmotorenabteilung. 1914 erhielt er eine Berufung als Hauptlehrer für Elektrotechnik ans Technikum Winterthur. Diesen Posten hatte er inne, bis ihn am 13. Januar 1922 ein Schlaganfall dahinraffte.

Fischer-Hinnen war der Verfasser zweier anerkannter Lehrbücher, nämlich «Die Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion elektrischer Gleichstrom-Maschinen» (1891) und des einen Tag vor seinem Tod vollendeten «Theoretischen und praktischen Lehrbuches der Elektrotechnik». Ende der neunziger Jahre führte er bei Gleichstrommaschinen Wendepole und Kompensationswicklungen ein. Darüber hinaus schrieb er über 50 Abhandlungen über Gleich- und Wechselstromtechnik sowie über mathematische und theoretische Probleme.

Den vielen Schülern am Technikum war er nicht nur ein hervorragender Lehrer, sondern ein Freund und Berater, mit dem sie weit über die Studienzeit hinaus gerne in Kontakt blieben.

Fischer-Hinnen war nicht einseitig Techniker, sondern interessierte sich lebhaft für Kunst, Musik, Geschichte, Sprachwissenschaft und Philosophie. Kein Wunder, dass der frohe Mann ein guter Gesellschafter war.

Aus seiner Ehe mit Maria Eva Hinnen aus Reiden entsprangen 5 Mädchen und 2 Söhne. Von diesen letzteren widmete sich Karl der Elektrotechnik und gründete später die Firma XAMAX, während Franz die musische Anlage erbte und Bildhauer wurde.

H. Wüger