

KONINKLIJK INSTITUUT VAN INGENIEURS

VAKANTIELEERGANG ELEKTROTECHNIEK 1965 TE EINDHOVEN

HOGE SPANNINGEN

II. ATMOSPHÄRISCHE ENTLADUNGEN

VON

Prof. Dr. K. BERGER



Commissie van Bijstand:
 prof. ir. W. Fontein, ir. H. VerLoren van Themaat,
 prof. ir. W. H. van Zoest

621.315.1

Vakantieleergang Elektrotechnik 1965 te Eindhoven Hoge Spanningen¹⁾

II. Atmosphärische Entladungen

von Prof. Dr. K. Berger, Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH)-Zürich

Summary: Lightning Discharges.

A short description is given of the development of a lightning stroke based on electrical and optical observations during the period 1955 ... 1963 on Mount San Salvatore near Lugano (Switzerland).

The formation of the lightning channel may start within clouds and then progress from clouds towards the earth (downward stroke). But the inverse is also possible (upward stroke). In flat country upward strokes occur only from very tall structures or buildings. Statistical data are presented for current peak, electric charge, steepness and dynamic current impulse ($\int i^2 dt$) of lightning strokes. Excessively high values of dynamic current impulse are reached at the discharge of positively charged clouds (positive lightning currents); however they remain rare exceptions.

Es freut mich ausserordentlich, in Ihrem Kreise einige neue Forschungsergebnisse über atmosphärische Entladungen vorzutragen. Ich werde mich dabei in erster Linie auf die Messungen und Beobachtungen stützen, die von der schweizerischen Forschungskommission für Hochspannungsfragen (FKH) in den letzten 20 Jahren auf dem Monte San Salvatore bei Lugano durchgeführt wurden. Ein ausführlicher Bericht darüber ist im Bull. SEV 1965 Nr. 1 erschienen.

Ich werde mich bemühen, Ihnen in den zur Verfügung stehenden $\frac{3}{4}$ Stunden ein möglichst physikalisches Gesamtbild des Blitzes zu entwerfen. Die Zeit reicht leider nicht, um auf Details einzugehen. Auch die Fragen des Blitzschutzes gehören nicht zum Thema. Wenn Zeit dafür vorhanden ist, wird es mich freuen, darüber zu diskutieren.

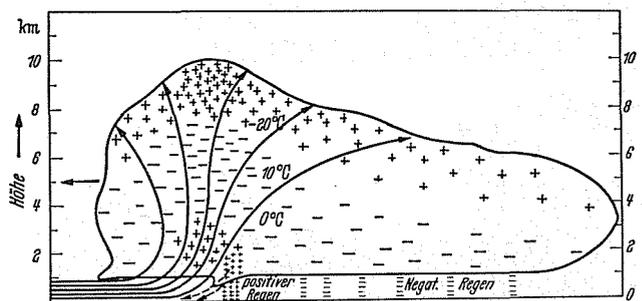
1. Ursprung des Blitzes oder die Frage: Wo beginnt der Blitz?

Für Elektriker, die sich mit hohen Spannungen befassen,

¹⁾ Gehouden voor de Afdeling voor Elektrotechnik van het K.I.v.I. op 10 juni 1965 te Eindhoven. Zie ook *De Ingenieur* 1966, nr. 11 blz. E 37.

besteht kein Zweifel darüber, dass der Blitz als elektrische Entladung nur dort entstehen kann, wo eine gewisse minimale elektrische Feldstärke, d.h. ein minimales elektrisches Spannungsgefälle vorhanden ist. Dieses Spannungsgefälle kann nur dort entstehen, wo elektrische Ladungen getrennt wurden und wo entsprechend Gebiete mit überwiegend positiven und negativen Ladungen vorhanden sind.

Gewitter zeichnen sich dadurch aus, dass sie imstande sind, einerseits die auch bei schönem Wetter vorhandenen Träger elektrischer Ladungen in der Atmosphäre zu vermehren, und sie dann räumlich zu trennen. Beim Wärmegewitter spielt bekanntlich die Kondensation des atmosphärischen Wasserdampfes im Aufwind die grosse Rolle, beim Frontgewitter der Luftwirbel in der Front. Welches im einzelnen die physikalischen Effekte sind, die zur Ladungstrennung in der feuchten Luft führen, steht hier nicht zur Diskussion. Durch viele Messungen mit Ballonsonden und mit Flugzeugen ist bekannt, dass sich in Gewitterwolken Gebiete mit überwiegend positiven Ladungen im grossen ganzen im oberen Teil, und Gebiete mit überwiegend negativen Ladungen im untern Wolkenenteil befinden, siehe Bild 1.



Schema des Temperatur- und Ladungsaufbaues in einem Gewitter (nach den Untersuchungen von SIMPSON, SCRASE u. ROBINSON in Kew).
 Zugrichtung: Von rechts nach links. Die links unten einmündenden und in den Wolken nach oben verlaufenden Linien sollen die „Ernährung“ durch feuchtwarme Luft und den Aufwind darstellen.

Bild 1. Ladungsverteilung in Frontgewitter, nach Simpson & Scrase.

Bei genauer Betrachtung zeigt sich, dass viele sogenannte 'Zellen' mit überwiegend positiven oder negativen Ladungen bestehen. Diese Zellen haben oft Durchmesser einiger 100 m oder weniger km. Wenn das elektrische Feld zwischen den Gebieten mit Ladungen verschiedener Polarität genügend stark wird, kommt es dort zur Blitzbildung. Der Vorgang lässt sich am besten beim Wärmegewitter, d.h. bei Abwesenheit jeder horizontalen Windströmung erkennen. An den sogenannten Temperatur-Inversionen staut sich der Aufwind und so entsteht der bekannte 'Gewitterpilz' oder 'Ambos', siehe Bild 2.

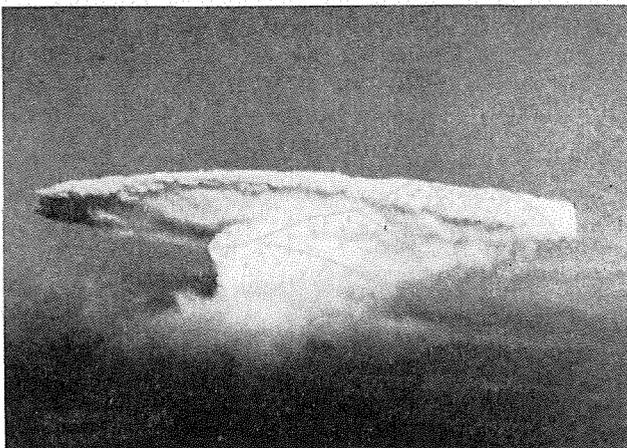


Bild 2. Entstehung eines Gewitterpilzes ('Ambos') eines Wärmegewitters, nach Legler, Bergamo. Die 3 Bilder sind im Zeitabstand einer halben Stunde aufgenommen.

gewitter, d.h. bei Abwesenheit jeder horizontalen Windströmung erkennen. An den sogenannten Temperatur-Inversionen staut sich der Aufwind und so entsteht der bekannte 'Gewitterpilz' oder 'Ambos', siehe Bild 2.

Radarmessungen zeigen, dass Blitze in den Wolken erst dann entstehen, wenn der Aufwind das Gebiet von $0^{\circ} \dots -10^{\circ}\text{C}$ erreicht oder durchstösst und dort starken Niederschlag auslöst. Dieses Temperaturgebiet liegt im Sommer in der Regel in etwa 4 km Höhe, im Winter wesentlich tiefer. Dem entspricht die tiefe Lage der Wintergewitter und ihre grössere Einschlags-Wahrscheinlichkeit. Die Blitze fangen somit stets im Gebiet grösster Feldstärke an, d.h. im üblichen Fall zwischen positiven und negativen Ladungswolken in wenigen km Höhe über dem Erdboden.

Diese Schilderung ist jedoch nicht vollständig und muss noch ergänzt werden. Befindet sich nämlich eine Gewitterwolke über einem sehr hohen und spitzigen Objekt, z.B. einem Wolkenkratzer, oder einem Berg mit einem hohen Turm, so entsteht auch zwischen der untern Wolkenladung und dem spitzen Objekt eine hohe Feldstärke, wie das jedem Hochspannungsfachmann wohl bekannt ist. Dieses Feld bewirkt in erster Linie das sogenannte *Elmsfeuer*, d.h. eine dauernde Glimm- oder Koronaentladung. Bei raschen Feldstärke-Erhöhungen infolge von Wolkenblitzen in der Umgebung kann sich ausserdem eine sogenannte Büschelentladung vom Turm auf der Bergspitze gegen die Wolkenentladung hin entwickeln, d.h. ein sich nach oben ausbildender Blitz, ein 'Aufwärtsblitz'. Wir werden darauf zurückkommen.

2. Betrachten wir nun das Vorwachsen des Blitzes genauer

2.1 Blitzursprung in den Wolken: 'Abwärtsblitze'.

Wo die Feldstärke auf einer gewissen Strecke einen Schwellwert überschreitet, entsteht durch Stossionisierung eine Vervielfachung von Elektronen und Ionen, und damit eine gewisse Leitfähigkeit der Luft. Die Ionisierung wächst nach beiden Seiten in Feldrichtung, wobei der Kanal besser leitend wird.

Dieser Ionisierungskanal zwischen positiven und negativen Ladungswolken ist aber nichts anderes als der entstehende Blitzkanal. Bei vertikal geschichteten Ladungen wächst der Blitz zugleich nach oben und unten vor, wobei die Geschwindigkeit in beiden Richtungen nicht die gleiche sein muss. Nach M. Töpler wird der Blitzkanal im gleichen Mass besser leitend, wie die ihn durchströmende Ladungsmenge wächst.

Der nach unten vorwachsende Blitzkanal kann unter Umständen die Erde erreichen; damit entsteht ein *Erdblitz*, als Gegensatz zum *Wolkenblitz*, der ausschliesslich in den Wolken oder längs diesen verläuft. Dieser *Erdblitz* hat natürlich als Gefahrenquelle für Lebewesen und Sachen die grösste Bedeutung. Das will aber nicht sagen, dass der nach oben wachsende Blitz nicht auch gefährlich werden kann, z.B. für Flugzeuge. Der Vortragende hat selbst beim Flug mit einer Coronado längs der italienischen Adriaküste in 10,5 km Höhe mehrere solcher Einschläge erlebt. Der Anblick des kräftigen gelben Lichtbogens am Flugzeug in dieser Höhe ist unvergesslich. Der beschriebene 'Abwärtsblitz' stammt somit aus den Wol-

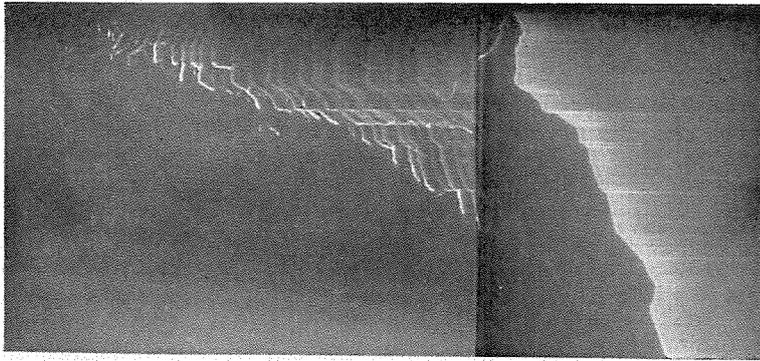


Bild 3. Beispiel eines nach unten wachsenden Blitzes (unveröffentlichte Aufnahme vom Monte San Salvatore, FKH).

ken; sein Ursprung ist unsichtbar. Was wir sehen, ist lediglich der aus den Wolken herabwachsende Blitzteil.

Mit einem rasch vor dem fotografischen Objektiv vorbei bewegten Film ist es hie und da möglich, das Vorwachsen des Blitzes optisch festzuhalten; ein Beispiel ist in Bild 3 reproduziert.²⁾ Ich muss aber gleich sagen, dass solche Vorwachs-Fotos eigentliche Glücksfälle sind, denn nur ein kleiner Teil der Abwärtsblitze enthüllt dieses Bild. Warum, wissen wir nicht. Vermutlich ist die Helligkeit des vorwachsenden Kanals oft zu klein, um auf dem rasch bewegten Film eine Spur zu hinterlassen. Bevor der vorwachsende Kanal den Erdboden erreicht, wird das

dynamische elektrische Feld zwischen Blitzkopf und Erde so stark, dass zwischen diesen beiden ein elektrischer Durchschlag entsteht, wie das zwischen zwei Leitern im Hochspannungslabor der Fall ist. Die mittlere Feldstärke muss dabei nur einige kV/cm betragen. Töpler nahm noch Feldstärken von 5...6 kV/cm an. Nach neuern Messungen mit hohen Gleichspannungen sinkt diese Feldstärke bis auf etwa 3 kV/cm. Der Durchschlag erfolgt zwischen Blitzkopf und irgendeinem geerdeten Leiter, wobei in erster Linie einfach das vom Blitzkopf aus nächste Objekt betroffen wird, wenn einmal die kritische Durchschlagsspannung oder die mittlere Durchschlagfeldstärke erreicht ist. Diese Erscheinung bedingt den sogenannten *Schutzraum* eines Ableiters.

In zweiter Linie spielen im Fall negativer Blitzkanäle hochragende Spitzen am Boden eine gewisse Rolle. In der Hochspannungstechnik ist die Rolle positiver Spitzen bei der Ausbildung des Durchschlags ja wohl bekannt. An

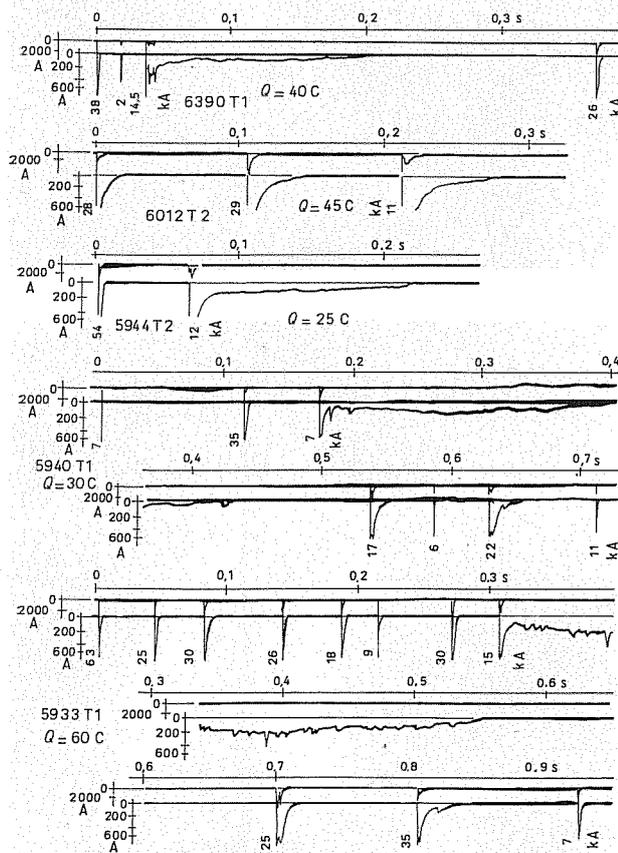


Bild 4. Beispiele des Stromverlaufs in Gesamtblitzen (1. Teilblitz & Folgeblitze) bei negativen Abwärtsblitzen (1. Teilblitz als Stossstrom).

²⁾ Die Bilder 3, 8, 10, 12 und 13 sind unveröffentlichte Beispiele des Blitz-Vorwachens vom Monte San Salvatore. Die übrigen Bilder finden sich im ausführlichen Bericht, siehe Literaturstelle [2].

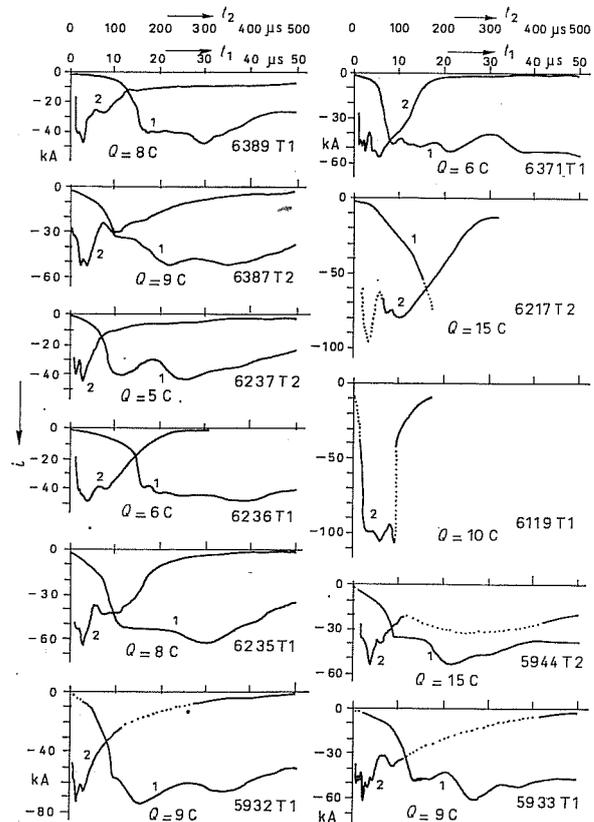


Bild 5. Beispiel der Stromform des 1. Teilblitzes bei negativen Abwärtsblitzen.

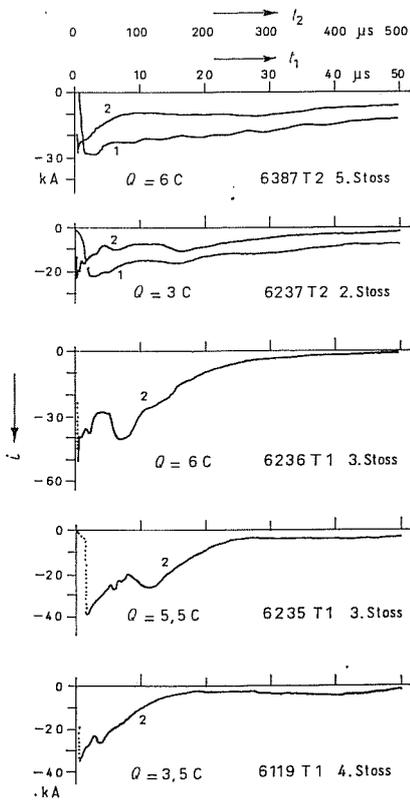


Bild 6. Stromform von Folgeblitzen (2. oder spätere Teilblitze) bei negativen Abwärtsblitzen.

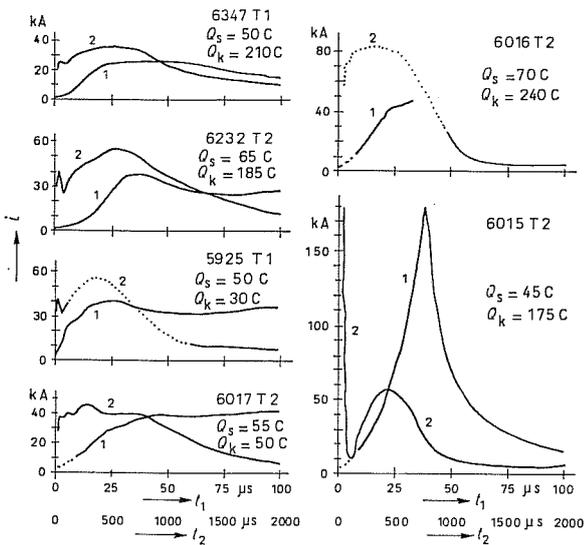


Bild 7. Stromform positiver Abwärtsblitze.

solchen Spitzen können dem Blitzkanal Entladungen entgegenwachsen, die als *Fangentladungen* bezeichnet werden. Nachdem einmal die Verbindung zwischen dem vorwachsenden Blitzkanal und Erde hergestellt ist, entlädt sich der Blitzkanal ähnlich wie ein geladener Leiter stossartig, wobei Ströme von vielen kA mit einer Dauer der Größenordnung $100 \mu s$ bei negativen Blitzen, und bis zu einigen ms bei positiven Blitzen entstehen. Beispiele des Stormverlaufs sind in den Bildern 4 ... 6 gegeben.

Bei der Entladung *negativer* Wolken bricht der Blitzstrom am Erdboden in der Regel ab, um nach hundertstel Sekunden wieder einzusetzen (Folgeblitze). Während beim

ersten Teilblitz das Vorwachsen ruckstufenartig erfolgt, wachsen die späteren Teilblitze gleichmässig vor, mit einer 10-fach grösseren Vorwachsgeschwindigkeit. Elektrisch entspricht diesem Unterschied ein Unterschied in der Frontdauer des Stossstromes; beim ersten Teilblitz steigt der Blitzstrom innert ca. $10 \mu s$ auf seinen vollen Wert an, bei den Folgeblitzen in ca. $1 \mu s$.

Bei der Entladung *positiver* Wolken entsteht nur ein einziger Teilblitz; besser gesagt, reisst der Blitzstrom am Erdboden nicht ab, bevor die gesamte, vom Blitz erfasste Wolkenladung zur Erde abgeführt ist. Beispiele siehe Bild 7.

Damit ist das Bild des aus den Wolken vorwachsenden Blitzes im wesentlichen beschrieben, es bleibt noch die Erklärung für die Entstehung der *Verzweigung* der Blitzbahn.

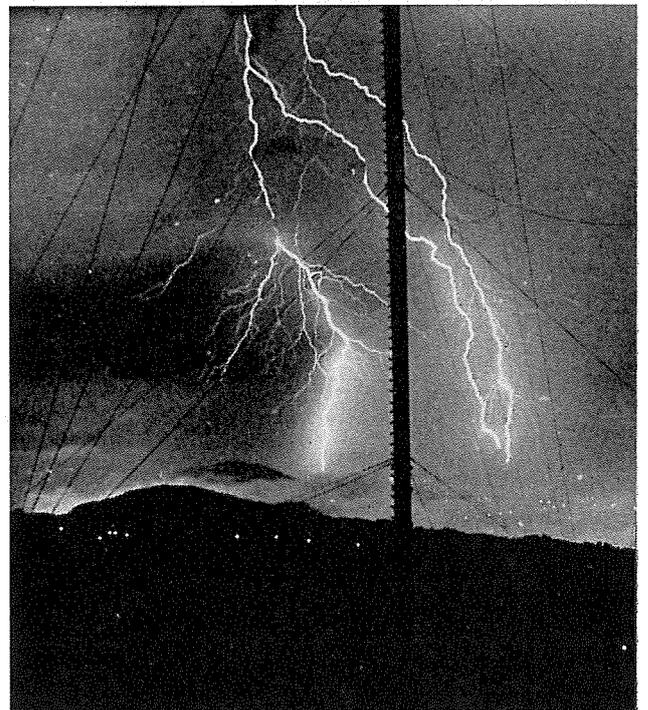
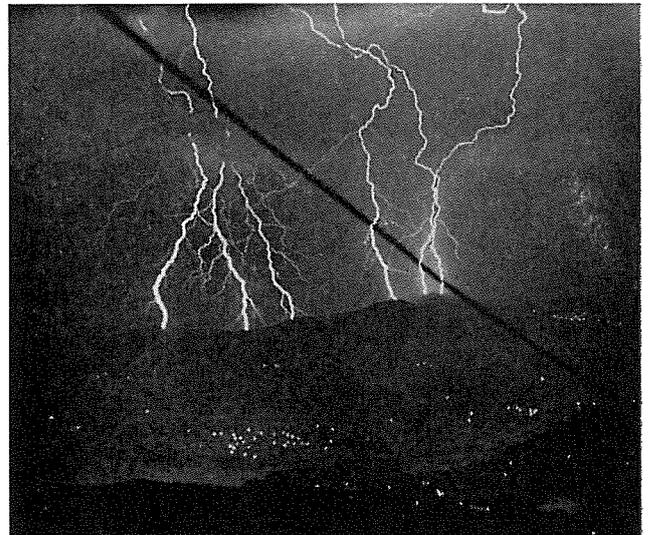


Bild 8 a und b. Fotobeispiele von Abwärtsblitzen.

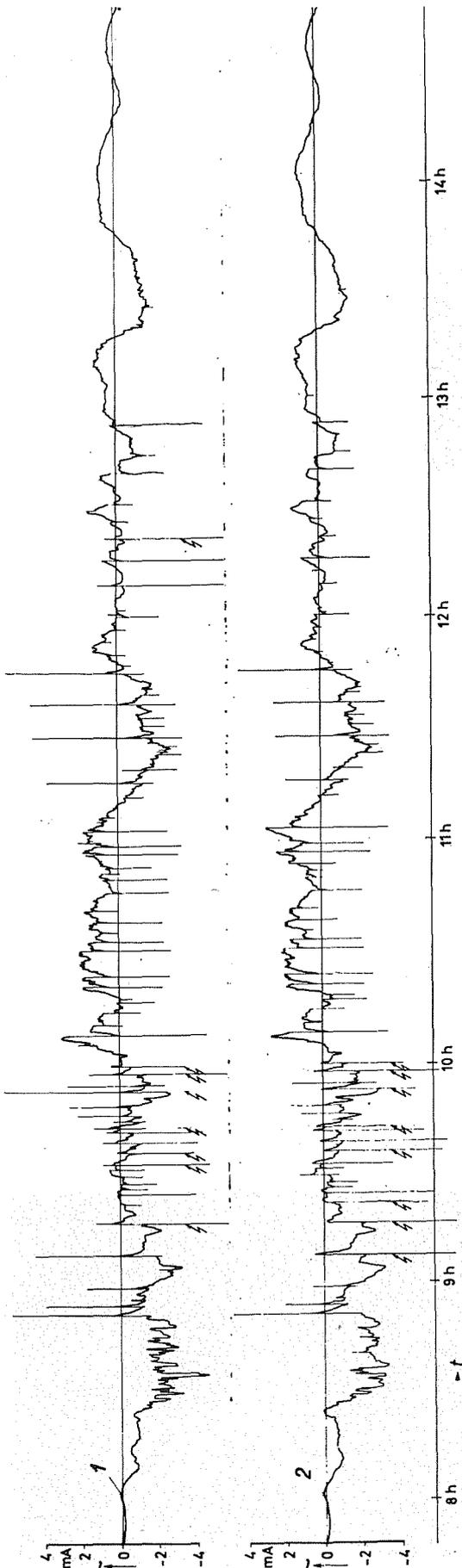


Bild 9. Elmsfeuer an den Turmspitzen.

Da sich der Blitzkanal im wesentlichen in der Richtung der grössten Feldstärke, d.h. des grössten Spannungsgefälles ausbildet, ist es einleuchtend, dass beim Vorwachsen des Blitzkanals eine dynamische Feldstärke zwischen dem Kanalkopf und benachbarten seitlichen Wolkenladungen entstehen kann, welche die Bildung ionisierter Seitenkanäle ermöglicht. Dass heisst, dass Verzweigungen des Blitzkanals eine Komponente in Richtung vorwachsenden Kanals haben müssen.

Falls ein Blitz Verzweigungen aufweist, so kann daraus mit Sicherheit auf die Richtung des Vorwachsenden des Blitzkanals geschlossen werden. Abwärtsblitze zeigen starke Verästelungen nach unten, wenn überhaupt Verästelungen sichtbar sind. Dieses Kennzeichen ist natürlich viel einfacher als jenes mit dem rasch bewegten Film (Boys-Kamera). Beispiele von Abwärtsblitzen sind in Bild 8 gegeben.

2.2 Blitzursprung an Turmspitzen: Aufwärtsblitze

Auf dem Monte San Salvatore entstehen mindestens $\frac{3}{4}$ aller Blitze durch Entladungen, die an der Turmspitze beginnen und nach den Wolken vorwachsen. In diesen Fällen ist die Konzentration des elektrischen Feldes in der Luft über der Turmspitze infolge der Wolkenladung so stark, dass dort Ionisierung auftritt. Bei langsam vorüberziehenden Wolkenladungen über der Turmspitze entstehen derart Elmsfeuer, die oft einige Minuten dauern (*statische Elmsfeuer*), siehe Beispiel Bild 9.

Es gibt aber auch eine zweite Art, die als *dynamische Elmsfeuer* zu bezeichnen wären. Im Moment, wo in der Umgebung der Turmspitze Wolkenblitze auftreten, ändert sich nämlich über der Turmspitze das Feld sehr rasch, d.h. innerhalb einer Sekunde. Man hört in diesem Moment ein Geräusch über der Turmspitze gleich einem mehr oder weniger scharfen Peitschenknall. Diese akustische Erscheinung ist sehr oft wahrzunehmen, ohne dass an der Turmspitze Entladungen sichtbar werden. Es ist zu vermuten, dass besonders in solchen Momenten die Feldstärke über dem Turm vorübergehend so stark wird, dass dadurch nicht nur verstärkte Elmsfeuer, sondern ein sogenanntes 'Büschel' entsteht, d.h. eine Entladung, die von der Turmspitze gegen die Wolken hinauf vorwächst. Damit entsteht ein Aufwärtsblitz. Das Vorwachsen erfolgt in ähnlichem Tempo wie beim Blitz aus den Wolken hinunter, nämlich mit annähernd $\frac{1}{1000}$ der Lichtgeschwindigkeit, Bild 10. Der Ladestrom des Blitzkanals beträgt nur ca. 30 ... 300 A. Dieser Strom dauert aber einige hundertstel bis Zehntel-Sekunden, die gespeicherte Ladung somit einige bis einige 10 Cb, Bild 11.

Wenn Verzweigungen vorkommen, so weisen diese wiederum in Richtung des vorwachsenden Blitzkanals, d.h. in diesem Fall nach oben. Beispiele siehe Bild 12 und 13.

Früher waren solche Bilder sehr selten: In einer englischen Sammlung finden sich hunderte von Blitzen mit Verzweigungen nach unten, aber nur ein einziger mit Verzweigungen nach oben. Dieser entstand über der Mastspitze eines Meerschiffes. Am Monte San Salvatore entstehen $\frac{3}{4}$ aller Blitze von den Turmspitzen aus nach oben. Dagegen haben wir vom San Salvatore aus nur ganz wenige Blitze mit Verzweigungen nach oben in der Umgebung des Berges feststellen können. Einer davon entstand über dem Sendeturm des Monte Ceneri, Bild 13, ein zweiter am Fahnenmast des nahen Monte Sighignola.

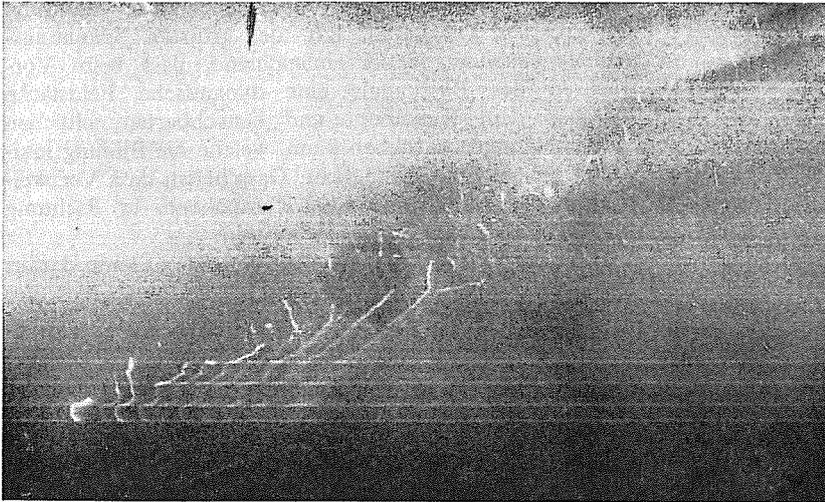


Bild 10. Beispiel eines nach oben wachsenden Blitzes (Unveröffentlichte Aufnahme vom Monte San Salvatore, FKH).

An den vielen Bergrücken und Berggräten der Umgebung dagegen lassen sich bisher Aufwärtsblitze nicht mit Sicherheit feststellen. Offenbar sind diese an Masten und Türme auf Bergspitzen gebunden, sowie an mehrere 100 m hohe Wolkenkratzer, wie das aus den Untersuchungen von Mc Eachron & Hagenguth am Empire State Building in New York hervorgeht. Im letztern Fall wurden nur Aufwärtsblitze festgestellt. Auf dem Monte San Salvatore sind, wie bereits gesagt, etwa $\frac{3}{4}$ aller Blitzeinschläge in die beiden Messtürme Aufwärtsblitze. *Im Flachland sind somit keine Aufwärtsblitze zu erwarten.*



Bild 12 a und b. Fotobeispiele von Aufwärtsblitzen.

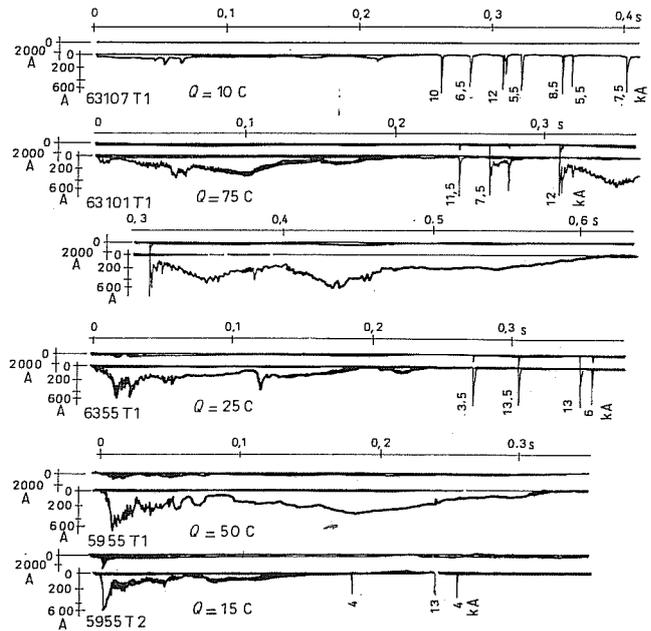
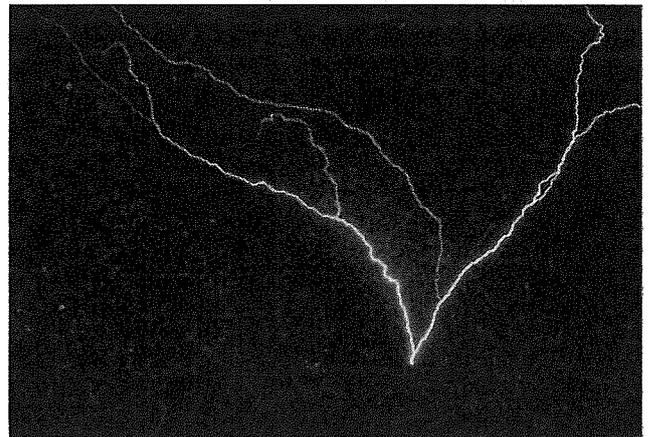


Bild 11. Beispiele des Stromverlaufs im Gesamtblitz bei negativen Aufwärtsblitzen (1. Teilblitz mit kleinem Strom).



Die Feldkonzentration an den üblichen Bauten, Bäumen usw. ist zu klein dazu. Dagegen sind *Fangentladungen* an hohen, spitzen Objekten in der Ebene wahrscheinlich. Der Unterschied der beiden Erscheinungen liegt darin, dass



Bild 13. Foto eines Blitzeinschlages in den Sendemast des Monte Ceneri (unveröffentlichte Aufnahme vom San Salvatore, FKH).

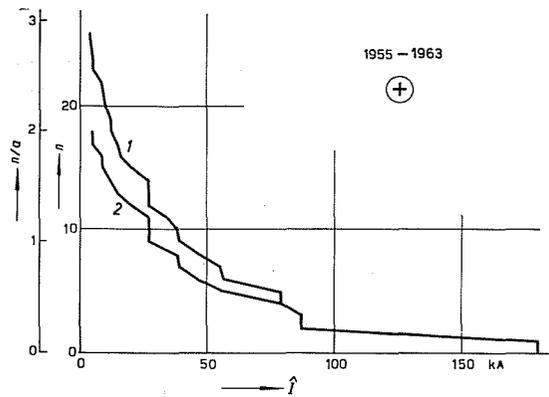


Bild 14. Summenhäufigkeit der positiven Scheitelwerte des Blitzstromes.

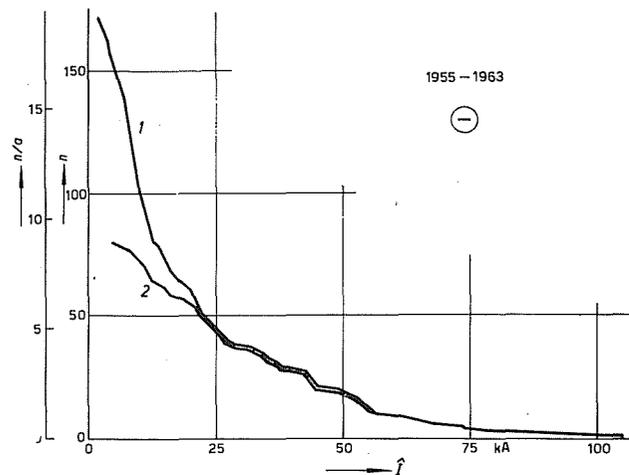


Bild 15. Summenhäufigkeit der negativen Scheitelwerte des Blitzstromes.

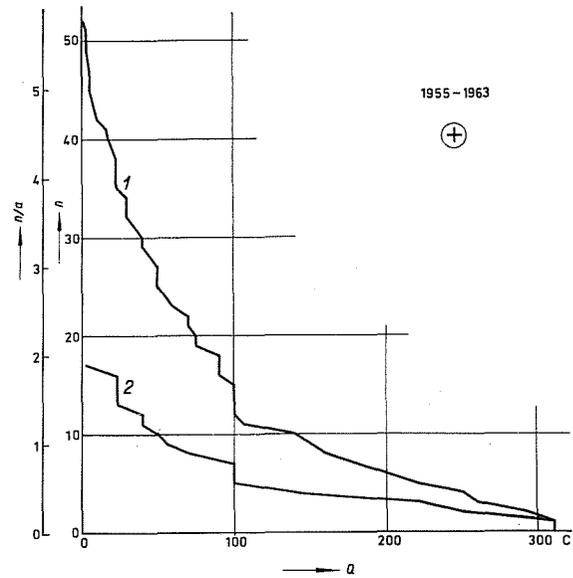


Bild 16. Summenhäufigkeit der positiven Ladungen des Blitzstromes.

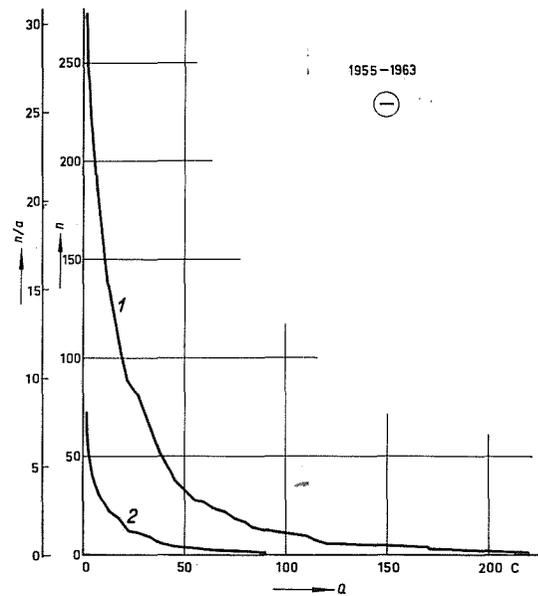


Bild 17. Summenhäufigkeit der negativen Ladungen des Blitzstromes.

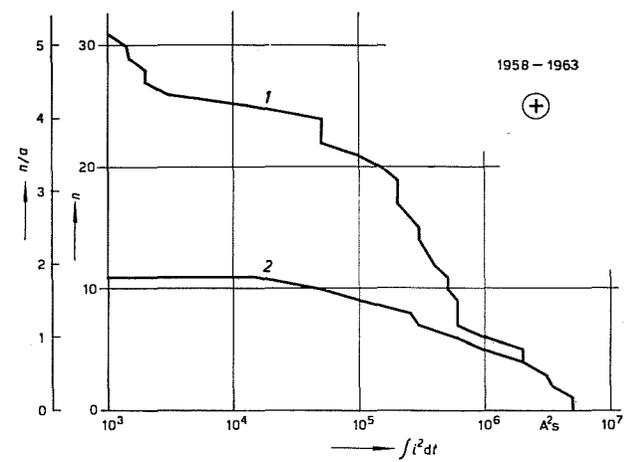


Bild 18. Summenhäufigkeit der positiven Werte $\int i^2 dt$ des Blitzstromes.

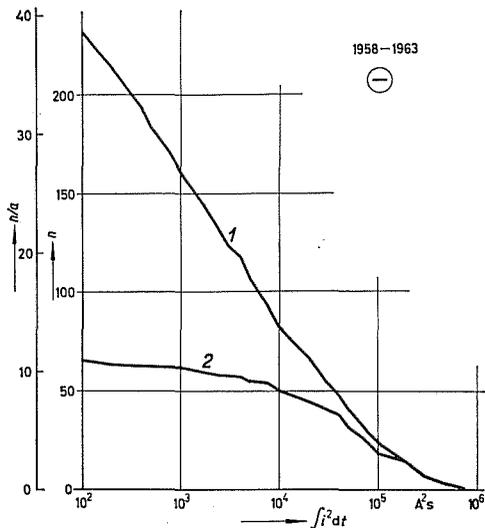


Bild 19. Summenhäufigkeit der negativen Werte $\int i^2 dt$ des Blitzstromes.

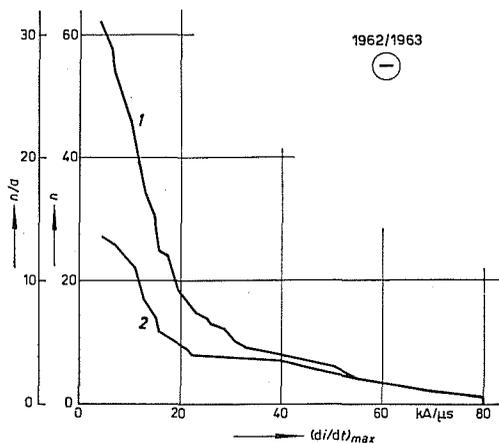


Bild 20. Summenhäufigkeit der grössten Steilheit des Blitzstromes.

Fangentladungen nur bei Abwärtsblitzen vorkommen, von denen sie lediglich die letzte Stufe darstellen.

Wären wir in der Lage, den Blitzstrom am Ursprung des Abwärtsblitzes in den Wolken zu messen, so würden wir wahrscheinlich dort ungefähr den gleichen langdauernden Stromverlauf messen, wie wir ihn bei den Aufwärtsblitzen an den Messtürmen feststellen. Die Kanalaufladung erfolgt relativ langsam mit mässigem Strom (Grössenordnung 100 A). Die im Kanal gespeicherte Ladung ist nicht viel grösser als die im Stossstrom des Blitzes zum Vorschein kommende (bis ca. 20 °C).

3. Einige statistische Vergleichsdaten von Abwärts- und Aufwärts-Blitzen

In den folgenden Bildern 14 ... 20 sind stets zwei Kurven dargestellt:

Einmal jene, die für Aufwärts- und Abwärtsblitze zusammen gelten (Kurven 1), sodann die Kurven 2, die nur für Abwärtsblitze gelten. Die Ordinatendifferenz beider Kurven entspricht somit den Aufwärtsblitzen. Die Kurven sprechen für sich, sodass eine ausführliche Diskussion

kaum nötig ist. Ausser den Stromscheitelwerten I sind die Ladungen Q , sowie das Integral $\int i^2 dt$ ausgewertet worden, welches letzteres sowohl für die Stromwärme und für die dynamischen Kraftwirkungen massgebend ist. Schliesslich ist die grösste Steilheit $(di/dt)_{max}$ negativer Blitze angeführt, sowohl für den 1. Teilblitz, als auch für die Folgeblitze. Diese Stromsteilheit ist bekanntlich massgebend für die enormen Induktionswirkungen des Blitzes, Bilder 14 ... 20.

Die Zahlenwerte der statistischen Summenhäufigkeitskurven können, wenn sie in genügender Menge vorliegen, als theoretische Basis für den Blitzschutz jeder Art gelten.

Das Glück war uns jedenfalls wohl gesinnt, indem es uns auf dem San Salvatore alle Arten von Blitzen bezüglich Polarität und Vorwachsrichtung zur Messung vorführt, und uns mit Hilfe der fotografischen Beobachtung auch das Vorkommen von Aufwärts- & Abwärtsblitzen in der weitem Umgebung zu erfassen erlaubt.

Etwa 400 Blitze wurden in den letzten 10 Jahren 1955 ... 1964 auf dem San Salvatore oszillografiert. Trotzdem sind das infolge der grossen Unterschiede von Blitz zu Blitz noch zu wenig für eine gute Statistik. Wir hoffen daher, die elektrischen und optischen Messungen über weitere Jahre ausdehnen zu können.

Literatur:

- [1] K. BERGER: Messeinrichtungen und Resultate der Blitzmessungen der Jahre 1947 ... 1954 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 46(1955) Nr. 5 & 9.
- [2] K. BERGER & E. VOGELSSANGER: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955 ... 1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56 (1965), Nr. 1.