

Aufwärtsblitze und Abwärtsblitze

(Wiedergabe des vor der ABB-Jahrestagung 1965 in Nürnberg gehaltenen Vortrages

von

Prof.Dr.Dr.-Ing. e.h. K. Berger)

Herr Vorsitzender,

Meine Damen und Herren,

Gerne bin ich der freundlichen Einladung Ihres Herrn Vorsitzenden gefolgt, etwas über Aufwärts- und Abwärtsblitze zu erzählen. Ich denke, Sie alle wissen, daß der Titel meiner Plauderei nicht ein Spaß sein soll, sondern voller Ernst. Es gibt Aufwärts- und Abwärtsblitze, besser gesagt Blitze, die von den Wolken nach unten vorwachsen, und andere, die sich von sehr hohen Objekten, wie Wolkenkratzern, oder Türmen auf hohen Bergen, nach oben hin in die Wolken ausbreiten. Um diese Erscheinung zu verstehen, muß ich wohl kurz auf die Entstehung des Blitzes eingehen, um Ihnen dann einige Beobachtungen und Eigenschaften der beiden Blitzarten zu schildern und diese zu vergleichen.

1. Zunächst die Frage: Wo beginnt der Blitz ?

Für Elektriker, die sich mit hohen Spannungen befassen, 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 Ballon-

sonden 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 Wolken- teil befinden, siehe Bild 1 (Simpson & Scrase).

Bei genauern Feldmessungen mit Hilfe von Flugzeugen 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 zu 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 (Dr. Legler, 3 Fotos, Monte Misma, Bergamo).

Radarmessungen zeigen, daß Blitze erst dann entstehen, wenn der Aufwind das Gebiet von  $0^{\circ}$  ...  $10^{\circ}$  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 Einschlagswahrscheinlichkeit. Die Blitze fangen somit stets im Gebiet größter Feldstärke an, d.h. im geschilderten Fall zwischen + und - 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 Sendeturm, 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 1. Linie das sogenannte Elmsfeuer, d.h. eine dauernde Glimm- oder Koronaentladung. Wenn die Wolkenladung genügend groß ist, oder bei raschen Feldstärke-Erhöhungen infolge von Wolkenblitzen in der Umgebung, kann sich aber außerdem eine sogenannte Büschelentladung von der Bergspitze gegen die Wolkenladung 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.

### a) 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 Richtungen des Feldes, wobei der Kanal immer besser leitend wird.

Dieser Ionisierungskanal ist aber nichts anderes als der entstehende Blitzkanal. Bei vertikal geschichteten Ladungen wächst somit 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, nämlich 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 Wolken; sein Ursprung ist unsichtbar. Was wir sehen, ist lediglich der aus den Wolken herauswachsende Blitzteil.

Mit einem rasch vor dem fotografischen Objektiv vorbei bewegten Film ist es hie und da möglich, das Vorwachsen des Blitzes festzuhalten (Bild 3) (Die Bilder 3 und 6 sind unveröffentlichte Beispiele des Blitzvorwachsens, aufgenommen am San Salvatore. Die übrigen Bilder finden sich im ausführlichen, am Schluß angeführten Bericht 2).

Ich muß aber gleich sagen, daß solche 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 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 Mes-

sungen 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 Durchschlagsfeldstärke erreicht ist. Diese Erscheinung bedingt den sogenannten Schutzraum eines Ableiters. Darauf soll hier nicht eingegangen werden.

In 2. Linie spielen im Fall negativer Blitzkanäle hochragende Spitzen eine gewisse Rolle. In der Hochspannungstechnik ist der Einfluß positiver Spitzen bei der Ausbildung des Durchschlags ja wohl bekannt. Dieser Fall kommt unter negativ geladenen Blitzkanälen vor. 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. Es würde zu weit führen, Oszillogramme vorzuführen.

Bei der Entladung negativer Wolken (negativer Blitze) bricht der Blitzstrom am Erdboden in der Regel ab, um nach hunderstel Sekunden wieder einzusetzen (Folgeblitze). Während beim 1. Teilblitz das Vorwachsen rückstufenartig erfolgt, wachsen die späteren Teilblitze gleichmäßig vor, mit einer ca. 10 x größeren Vorwachsengeschwindigkeit. Elektrisch entspricht diesem Unterschied ein Unterschied in der Steilheit der Front des Stoßstromes. Beim 1. 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 (positive Blitze) entsteht nur ein einziger Teilblitz; besser gesagt, reißt der Blitzstrom am Erdboden nicht ab, bevor die gesamte Wolkenladung zur Erde abgeführt ist. 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.

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. Das heißt, daß Verzweigungen des Blitzkanals eine Komponente in Richtung des vorwachsenden Kanals haben müssen. Denn in

Richtung der rückwärts gelegenen Raumladungen ist das Feld um den bereits bestehenden Blitzkanal schwächer als am Blitzkopf.

Falls ein Blitz Verzweigungen aufweist, so kann deshalb mit Sicherheit auf die Richtung des Vorwachsens des Blitzkanals geschlossen werden. Abwärtsblitze zeigen stets Verästelungen nach unten, wenn überhaupt Verästelungen sichtbar sind. Dieses Kennzeichen ist natürlich einfacher als jenes mit dem rasch bewegten Film (Boys-Kamera). Beispiele siehe Bild 4.

#### b) Blitzursprung an Turmspitzen, "Aufwärtsblitze"

Auf dem Monte San Salvatore entstehen mindestens  $3/4$  aller Blitze durch Entladungen, die an der Turmspitze beginnen und nach den Wolken vorwachsen. In diesen Fällen ist offenbar die Konzentration des elektrischen Feldes in der Luft über der Turmspitze infolge der Wolkenladung so stark, daß dort eine starke Stoßionisierung auftritt. Bei langsam vorüberziehenden Wolkenladungen über der Turmspitze entstehen derart Elmsfeuer, die oft einige Minuten dauern (statische Elmsfeuer), siehe Bild 5.

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 von Auge 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 herunter, nämlich mit annähernd  $1/1000$  der Lichtgeschwindigkeit unter Bildung von Ruckstufen (Bild 6). Der Ladestrom des Blitzkanals beträgt nur ca. 30 ... 300 A. Dieser Strom dauert aber einige hundertstel bis Zehntel-Sekunden, die gespeicherte Ladung beträgt einige bis einige 10 Cb.

Wenn Verzweigungen vorkommen, so weisen diese wiederum in Richtung des vorwachsenden Blitzkanals, d.h. in diesem Fall nach oben. Bei-

spiele siehe Bilder 7 ... 9.

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.

Vom San Salvatore aus haben wir 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 9), ein 2. am Fahnenmast des nahen Monte Sighignola. 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  $3/4$  aller Blitzeinschläge in die beiden Meßstürme Aufwärtsblitze.

Im Flachland sind somit keine Aufwärtsblitze zu erwarten.

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

### 3. Einige statische Vergleichsdaten von Abwärts- und Aufwärtsblitzen.

In den folgenden Bildern sind stets 2 Kurven dargestellt, nämlich einmal jene, die für Aufwärts- und Abwärtsblitze zusammen gelten (Kurven 1), sodann jene, die nur für Abwärtsblitze und damit für das Flachland gelten (Kurven 2). Die Ordinatendifferenz beider Kurven entspricht somit den Aufwärtsblitzen. Die Kurven sprechen für sich, so daß eine ausführliche Diskussion kaum nötig ist. Außer den Stromscheitelwerten  $I$  sind die Ladungen  $Q$ , sowie des Integral  $\int i^2 dt$  ausgewertet worden, welches letzteres sowohl für die Stromwärme und für die dynamischen Kräftewirkungen maßgebend ist. Schließlich ist die 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.

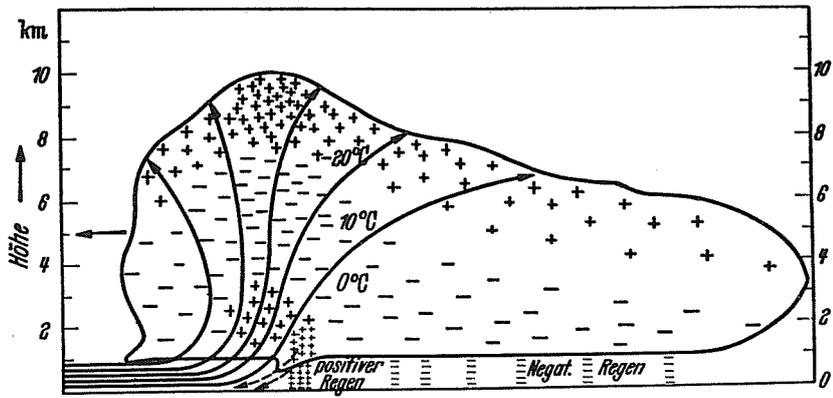
Bilder 10 ... 16

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

Etwa 400 Blitze wurden in den letzten 10 Jahren auf dem San Salvatore oszillografiert, etwa 270 in der ersten Berichtsperiode (1947 ... 1954).<sup>1)</sup> Trotzdem sind das infolge der großen Unterschiede von Blitz zu Blitz noch zu wenig für eine gute Statistik. Mit Geduld und Geld hoffen wir, weitere Daten zu gewinnen und zugleich die physikalischen Kenntnisse vom Blitzvorgang zu erweitern.

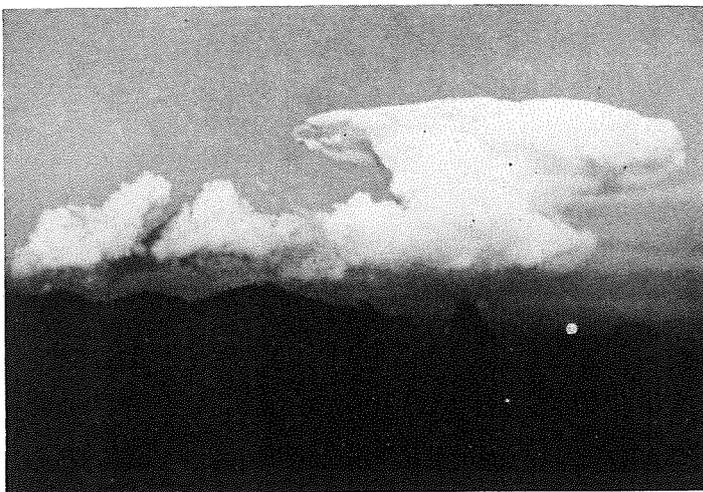
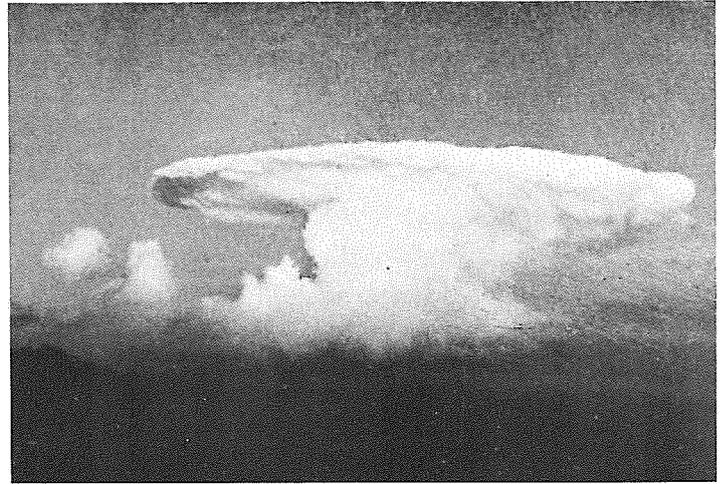
1) K. Berger: Messungen und Resultate der Blitzforschung  
1947 ... 1954 auf dem Monte San Salvatore  
Bull. SEV 46 (1955) Nr. 5 u. 9.

2) K. Berger und  
E. Vogelsanger: Messungen und Resultate der Blitzforschung  
der Jahre 1955 ... 1963 auf dem Monte San  
Salvatore.  
Bull. SEV 56 (1965) Nr.1, S. 2 ... 22



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



Gewitterpilz

Aufn.

Dr. Legler

Bild 2

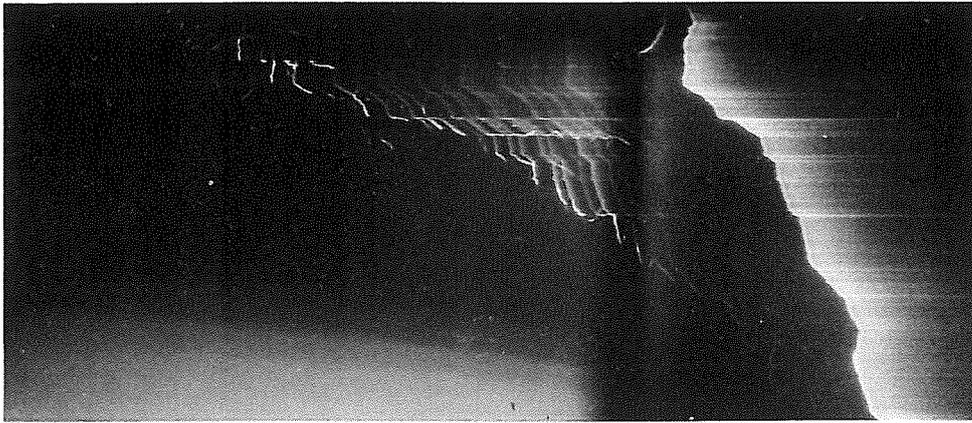


Bild 3

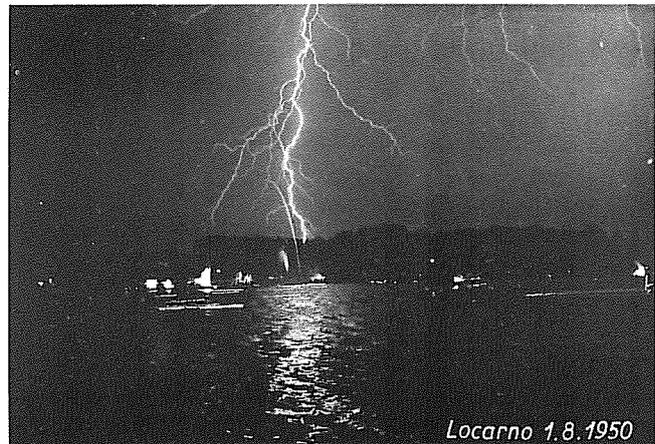


Bild 4

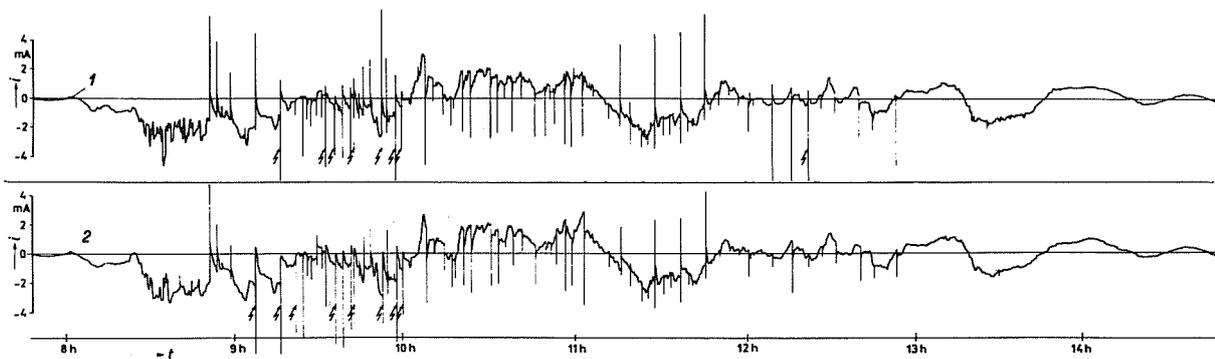


Bild 5

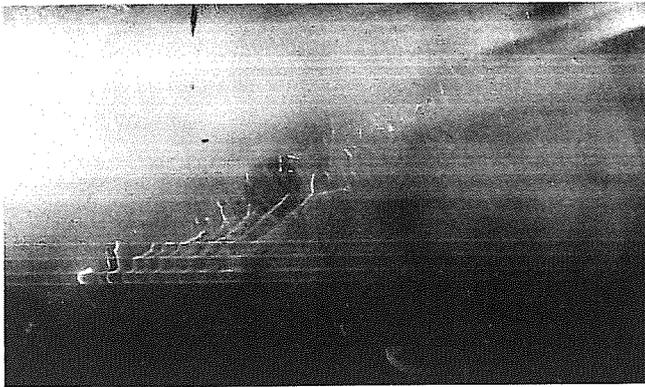


Bild 6

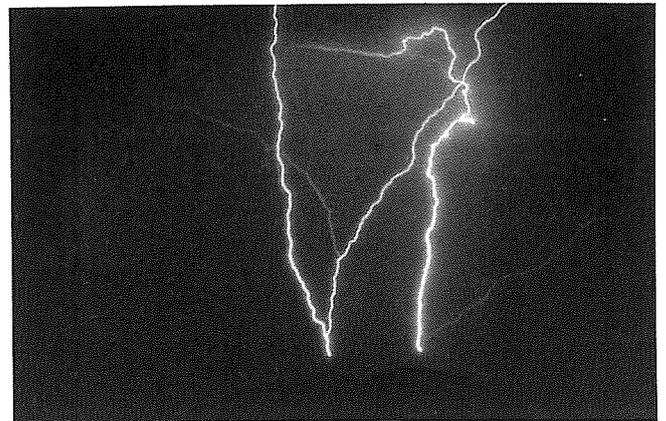


Bild 8

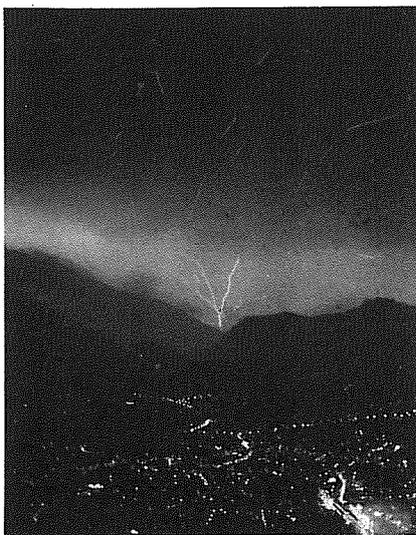


Bild 7

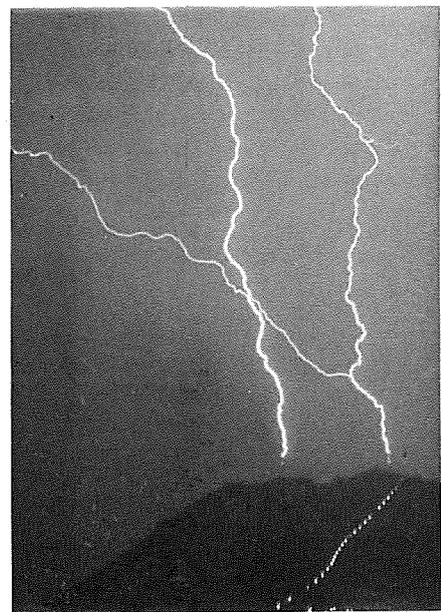


Bild 9

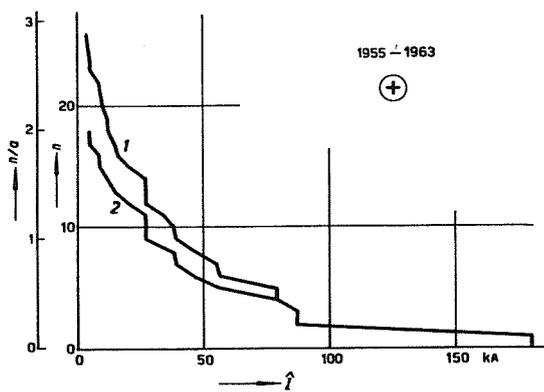


Bild 10

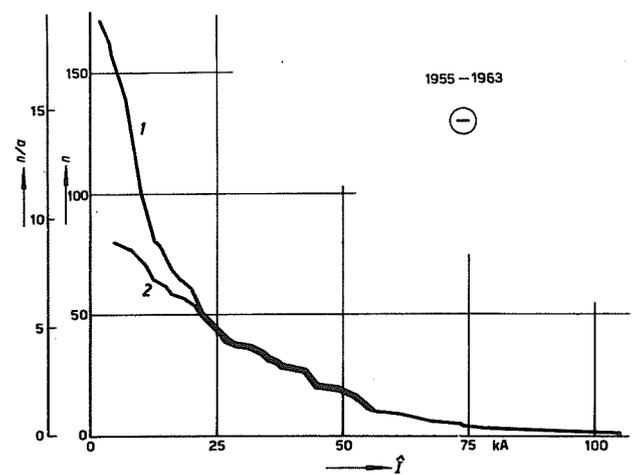


Bild 11

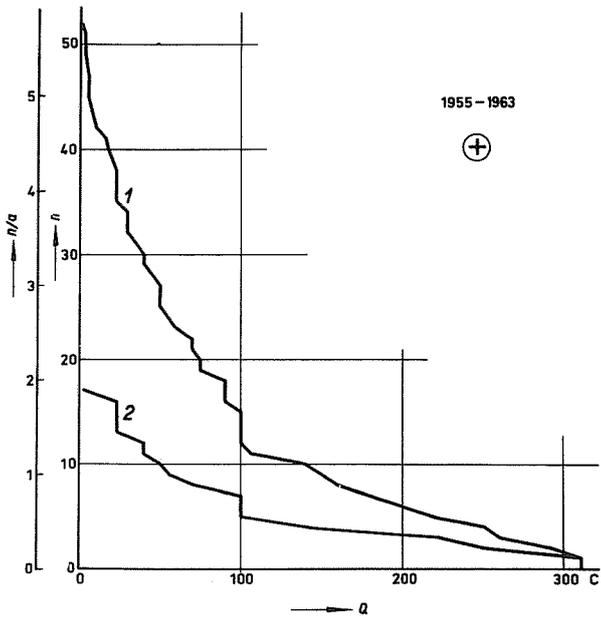


Bild 12

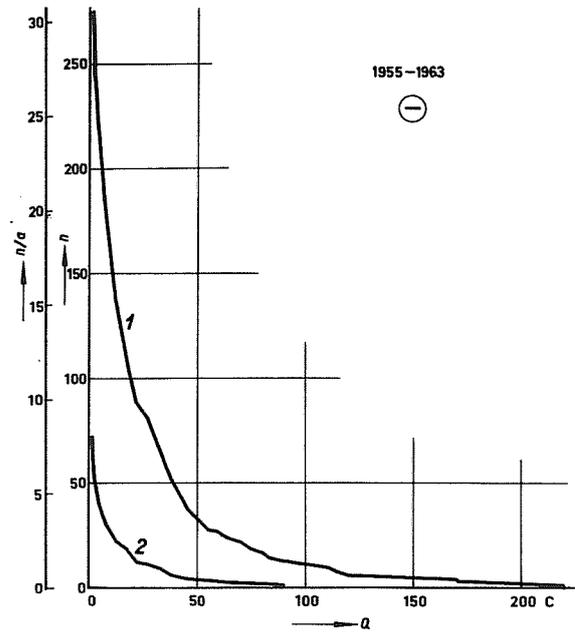


Bild 13

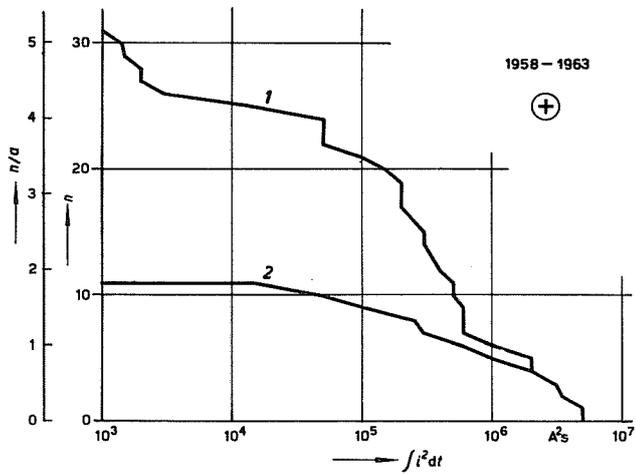


Bild 14

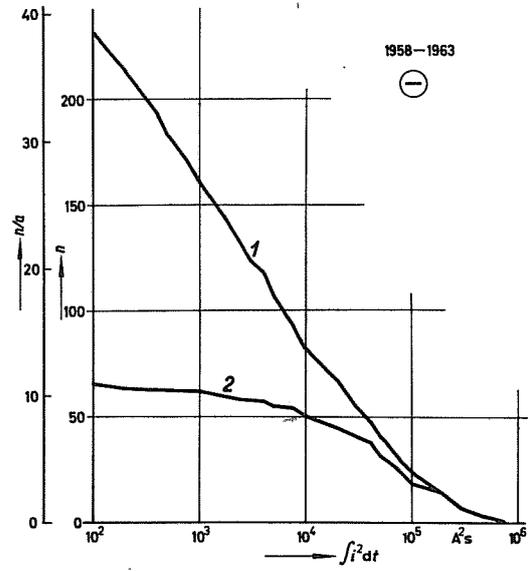


Bild 15

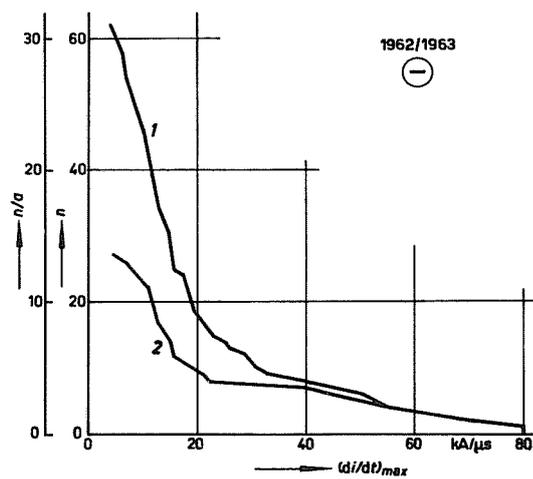


Bild 16