

Analyse von Blitzphotos

Von Prof. Dr. Karl Berger*,
Professor für Hochspannungstechnik, Eidgen. Technische Hochschule Zürich

Auf dem Monte San Salvatore bei Lugano, Schweiz, wurde 1943 und 1950 je ein 70 m hoher Stahlurm (Bild 1) aufgestellt, in der Hoffnung, dort jedes Jahr recht viele Blitzeinschläge zu bekommen. Diese Hoffnung hat sich erfüllt, indem sich jedes Jahr ungefähr 100 Blitzeinschläge ereignen, aus denen der zeitliche Verlauf des Blitzstromes mit Hilfe von Oszillographen ausgemessen werden kann. Um zu verstehen, warum die festgestellten, sehr verschiedenen Stromformen entstehen, haben wir seit 1950 die Blitze auch photographiert, und zwar auf stehenden und rasch bewegten Filmen. Als Resultat ergaben sich einmal Blitze, die von der Wolke gegen den Erdboden herunterwachsen (Abwärtsblitze), dann aber auch solche, die von hohen und spitzen Objekten am Boden gegen die Wolken hinaufwachsen (Aufwärtsblitze). Dank der großen Blitzhäufigkeit auf dem San Salvatore ließen sich dort im Laufe der Jahre vier mögliche Blitztypen feststellen und auch messen.

Die gewonnenen Ergebnisse haben einesteils unmittelbare praktische Bedeutung, da die genaue Erfassung des Stromverlaufes und die statistische Feststellung der Häufigkeit aller Stromformen und Stromgrößen die Grundlage jedes Blitzschutzes bilden. Andererseits besteht Hoffnung, mit der photographischen Erfassung der Blitzeinleitung am Erdboden, insbesondere der Fangentladungen, mehr Licht in die noch ungeklärte Frage des „Schutzraumes“ von Blitzableitern zu bringen.

* Geb. 1898; Versuchsleiter der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen.

Bild 1: Berggipfel San Salvatore mit Meßturm 1 (PTT), Kirche (Photoraum) und Meß- und Wohngebäude.



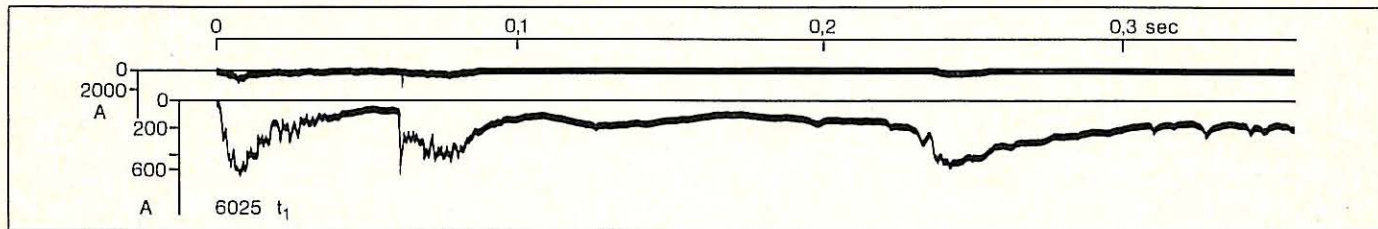


Bild 2: Beispiel eines typischen Blitzstrom-Oszillogramms mit ausschließlich langdauernder Strom-Komponente. Zwei verschiedene Maßstäbe für die Stromstärke.

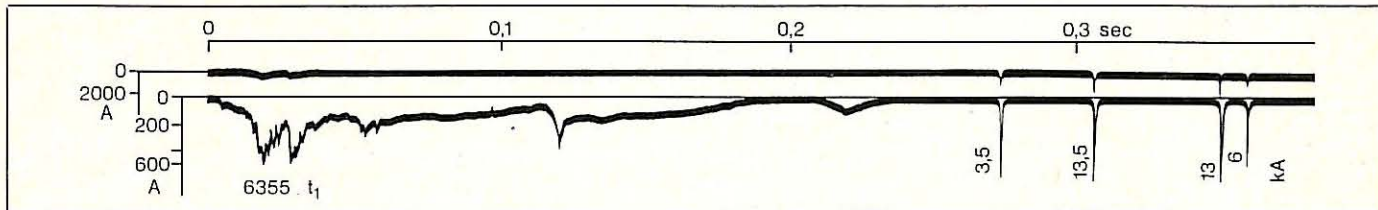


Bild 3: Beispiel eines typischen Blitzstrom-Oszillogramms mit mehreren Teilblitzen, Folgeblitze mit zumeist kurzdauernden Stromimpulsen. Auch hier wieder verschiedene Maßstäbe für die Stromstärke.

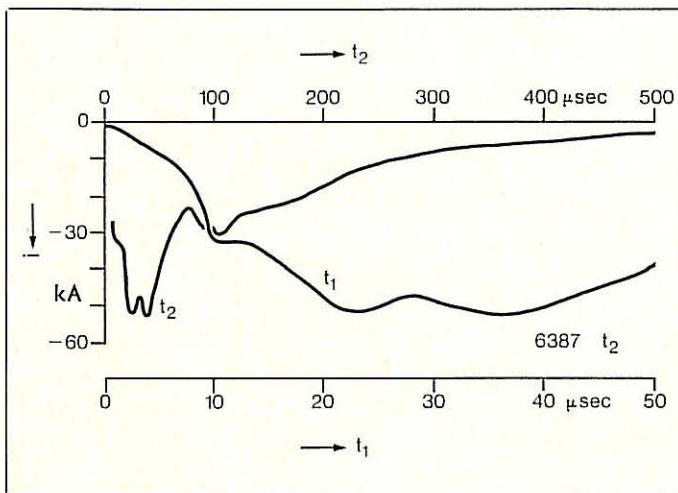
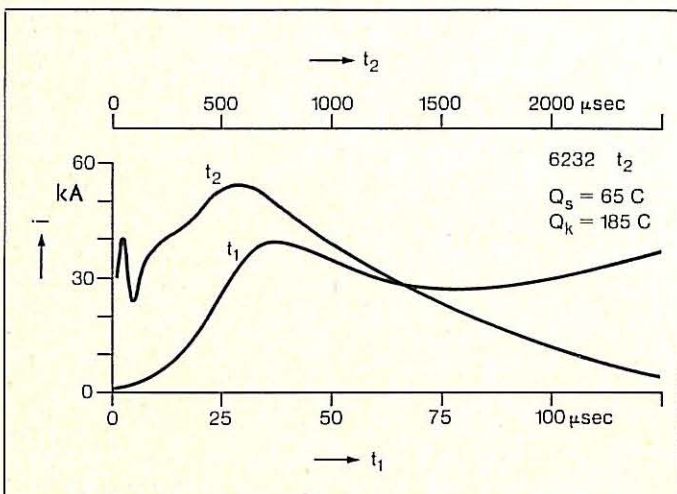


Bild 4: Typische Form des Stromimpulses aus negativen Wolken. Zwei verschiedene Zeitskalen.

Bild 5: Typische Form des Stromimpulses aus positiven Wolken. Zwei verschiedene Zeitskalen, die nicht mit Bild 4 übereinstimmen.



Zweck und Möglichkeiten der Blitzforschung

Mit optischen und elektrischen Methoden ist seit langem versucht worden, von fern den Blitzeinschlag messend zu erfassen. Für alle Probleme des Blitzschutzes ist die genaue Kenntnis des Stromverlaufes während der oft sehr kurzen Dauer eines Stromstoßes nötig. Denn es ist nicht die elektrische Spannung zwischen Wolken und Erde, die wir Erdenbürger schlimmstenfalls zu spüren bekommen, sondern der Strom, der vom Blitz mit Gewalt allen Objekten aufgedrückt wird, die in seinen Weg geraten. Leider ist es bisher nicht gelungen, den Stromverlauf im Blitz von fern zu messen. Es bleibt nichts anderes übrig als die Strommessung beim Blitzeinschlag selbst. Somit müssen für die Blitzforschung Orte gesucht werden, wo der Blitz häufig einschlägt.

Aus Vergleichsmessungen auf verschiedenen Berggipfeln in der Schweiz hat sich der Monte San Salvatore als ein solcher Punkt ergeben. 1943 wurde dort ein erster, 1950 ein zweiter 70 m hoher Meßturm gebaut, in denen der Blitzstrom bei jedem Einschlag oszillographisch gemessen werden kann (Tabelle, S. 463). Seit 1950 wurden sodann photographische Beobachtungen begonnen mit dem doppelten Zweck, einmal die genaue Lage einer großen Anzahl Blitzeinschlagstellen festzuhalten, und andererseits über die Entstehung des Blitzkanals Genaueres zu erfahren. Einige solche Messungen wurden bereits kurz vor dem Krieg am Empire State Building in New York durchgeführt. Was aber am S. Salvatore erstmals mit Erfolg versucht wurde, ist die gleichzeitige oszillographische Strommessung und die Photographie der Entstehung der Blitzbahn beim Einschlag. Bild 1 zeigt den Meßturm 1 auf dem Berggipfel, 915 m ü. d. M. oder 640 m über dem Luganersee.

Bedeutung des Blitzstromes für den Blitzschutz

Für die elektrischen Kenngrößen des Blitzstromes interessieren sich vor allem die Betriebsleiter der großen Elektrizitätswerke, die sich um eine möglichst ununterbrochene Stromversorgung kümmern. Der Blitzeinschlag in Freileitungen führt dort zu Kurzschlüssen, die eine vorübergehende Unterbrechung des Stromkreises bedin-

gen. Andererseits können Blitzeinschläge in Holzstangenleitungen und in die daran angeschlossenen Werke und Unterwerke wertvolle Apparate und Einrichtungen zerstören, wenn keine Schutzmaßnahmen getroffen werden. Die wirtschaftliche Bedeutung dieser Blitzschäden und Betriebsunterbrechungen rechtfertigt die Mittel, die von Werkseite für die Blitzforschung zur Verfügung gestellt werden. Andererseits ist die Industrie daran interessiert, möglichst wirksame und einfache Schutzapparate gegen diese Störwirkungen des Blitzes zu bauen, wozu genaue Kenntnisse vom Blitzstrom-Verlauf nötig sind. Solche Kenntnisse sind von Bedeutung für jegliche Art von Blitzschutz, sei es der Schutz von Personen und Tieren, von Gebäuden aller Art, eingeschlossen Pulverfabriken, von Flugzeugen und Schiffen, ja sogar für die Verhinderung von Sprengunglücken beim Bau von Stollen viele 100 m unter Tage.

Resultate der Blitzstrom-Messung

Was sind nun zunächst die Resultate der Blitzstrom-Messung? Was bereits im ersten Beobachtungsjahr auffiel, ist die enorme Mannigfaltigkeit der Stromkurven. Bei der Entladung negativer Wolken gegen Erde setzt sich der Strom sehr oft aus mehreren sogenannten Teilblitzen zusammen, die durch Strompausen getrennt sind. Die Entladung von Wolken mit positiver Ladung dagegen besteht fast ohne Ausnahme aus einem einzigen Teilblitz.

Bild 2 gibt Beispiele, bei denen der Blitzstrom aus einem einzigen langdauernden Teilblitz mit der Dauer einiger Zehntelsekunden bis ca. 0,5 sec besteht. Bild 3 zeigt Beispiele mit mehreren Teilblitzen. Der erste weist eine lange Dauer ähnlich Bild 2 auf, die folgenden Blitze dagegen bestehen nur aus sehr kurzen Stromimpulsen, die sich in einem Bild lediglich als vertikale Striche äußern. Ihre wirkliche Höhe übersteigt den in Bild 3 gewählten Meßbereich. Es ist nötig, diese kurzen Stromimpulse in einem viel feineren Zeitmaßstab und einem größeren Strommaßstab abzubilden.

Bild 4 gibt ein typisches Beispiel solcher kurzen Stromimpulse, die nur mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen ausgemessen werden können. Und zwar sind dies Formen des 1. Teilblitzes negativer Wolkenentladungen. Folgeblitze zeigen einfachere Impulsformen mit

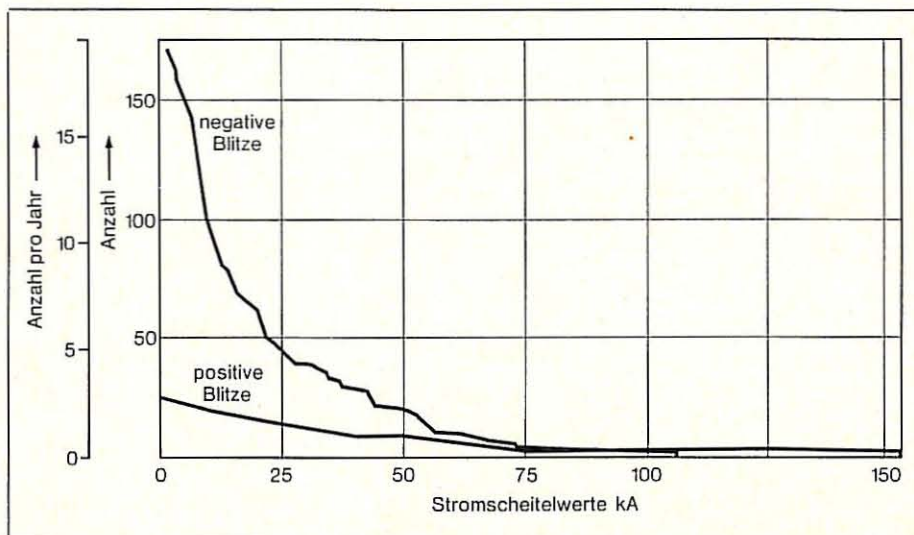
kürzeren Anstiegszeiten, die weniger als 1 Millionstel Sekunde ($1 \mu\text{sec}$) betragen können. Bild 5 zeigt eine typische Form der Entladung positiver Wolken, die einen sehr hohen Stromscheitelwert von ca. 180 kA erreichen können.

„Zündende“ und „kalte“ Blitzschläge

Die Einteilung in langdauernde Ströme kleiner Höhen (50 bis 300 A) und in kurze Stromimpulse großer Höhen (2000 bis 200 000 A) mit einer Dauer der Größenordnung $100 \mu\text{sec}$ hat nicht nur theoretisches Interesse. Die beiden Stromformen entsprechen nämlich ungefähr dem, was im Volksmund „zündende“ und „kalte“ Blitze genannt wird. Der zündende Blitz weist rund 1000mal längere Dauer auf als der kalte, dagegen relativ kleinen Strom. Damit ist er fähig, als Brandstifter zu wirken, beispielsweise Heu oder andere brennbare Stoffe, insbesondere wenn sie fein verteilt sind, anzuzünden.

Der kalte Blitz kann dies infolge seiner kurzen Dauer weniger, trotz der enormen Temperatur im Blitzfunken. Nach amerikanischen Messungen, die zum Teil am Mte. S. Salvatore durchgeführt wurden, beträgt die Temperatur während der ersten Mikrosekunden 30 000 bis 40 000 °C. Die plötzliche Ausdehnung der Luft im Blitzkanal wirkt wie eine Explosion, durch die kurzdauernd eine sehr starke Druckwelle ausgelöst wird. Wenn diese in einer Spalte eines Baumstammes entsteht, wird der Baum zersplittert. Für das Eindringen des Blitzes genügen auch sehr dünne Spalten von 1 mm oder noch weniger. Der Durchmesser des leitenden Kerns eines Blitzkanals ist in den ersten Mikrosekunden wahrscheinlich von der Größenordnung eines mm. Er wächst mit der Zeit rasch an und dürfte im Blitzkanal ungefähr 1 cm betragen. Diese Größe kann aus den Photographien des Blitzkanals wegen der starken Überstrahlung nicht gemessen werden. Der Durchmesser des leitenden Kerns ist auch nicht zu verwechseln mit dem Durchmesser der elektrischen Glimmhülle, die mehrere m betragen dürfte. Man versteht somit, daß nur Bäume mit rissigem Gefüge oder rissiger Rinde vom Blitz gesprengt oder angesplittert werden können. Bäume mit glatter Rinde (Buchen usw.) dagegen lassen den Blitz nicht ins Innere eintreten; der Funke verläuft als äußerer Überschlag in Luft, ohne merkbare Spuren zu hinterlassen. Dies wirft ein Licht auf

Bild 6: Häufigkeitskurven der Stromscheitelwerte positiver und negativer Blitzströme.



gen. Andererseits können Blitzeinschläge in Holzstangenleitungen und in die daran angeschlossenen Werke und Unterwerke wertvolle Apparate und Einrichtungen zerstören, wenn keine Schutzmaßnahmen getroffen werden. Die wirtschaftliche Bedeutung dieser Blitzschäden und Betriebsunterbrechungen rechtfertigt die Mittel, die von Werkseite für die Blitzforschung zur Verfügung gestellt werden. Andererseits ist die Industrie daran interessiert, möglichst wirksame und einfache Schutzapparate gegen diese Störwirkungen des Blitzes zu bauen, wozu genaue Kenntnisse vom Blitzstrom-Verlauf nötig sind. Solche Kenntnisse sind von Bedeutung für jegliche Art von Blitzschutz, sei es der Schutz von Personen und Tieren, von Gebäuden aller Art, eingeschlossen Pulverfabriken, von Flugzeugen und Schiffen, ja sogar für die Verhinderung von Sprengungslücken beim Bau von Stollen viele 100 m unter Tage.

Resultate der Blitzstrom-Messung

Was sind nun zunächst die Resultate der Blitzstrom-Messung? Was bereits im ersten Beobachtungsjahr auffiel, ist die enorme Mannigfaltigkeit der Stromkurven. Bei der Entladung negativer Wolken gegen Erde setzt sich der Strom sehr oft aus mehreren sogenannten Teilblitzen zusammen, die durch Strompausen getrennt sind. Die Entladung von Wolken mit positiver Ladung dagegen besteht fast ohne Ausnahme aus einem einzigen Teilblitz.

Bild 2 gibt Beispiele, bei denen der Blitzstrom aus einem einzigen langdauernden Teilblitz mit der Dauer einiger Zehntelsekunden bis ca. 0,5 sec besteht. Bild 3 zeigt Beispiele mit mehreren Teilblitzen. Der erste weist eine lange Dauer ähnlich Bild 2 auf, die folgenden Blitze dagegen bestehen nur aus sehr kurzen Stromimpulsen, die sich in einem Bild lediglich als vertikale Striche äußern. Ihre wirkliche Höhe übersteigt den in Bild 3 gewählten Meßbereich. Es ist nötig, diese kurzen Stromimpulse in einem viel feineren Zeitmaßstab und einem größeren Strommaßstab abzubilden.

Bild 4 gibt ein typisches Beispiel solcher kurzen Stromimpulse, die nur mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen ausgemessen werden können. Und zwar sind dies Formen des 1. Teilblitzes negativer Wolkenentladungen. Folgeblitze zeigen einfachere Impulsformen mit

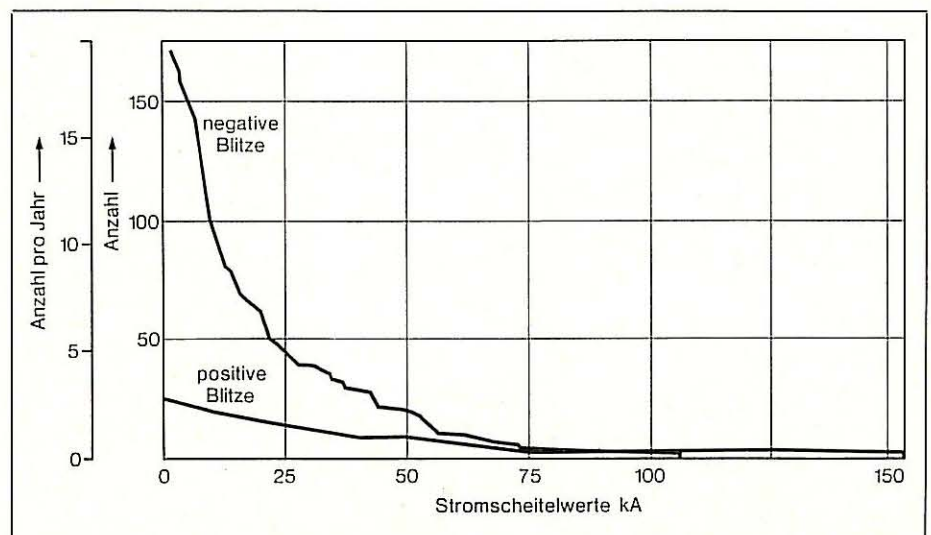
kürzeren Anstiegszeiten, die weniger als 1 Millionstel Sekunde ($1 \mu\text{sec}$) betragen können. Bild 5 zeigt eine typische Form der Entladung positiver Wolken, die einen sehr hohen Stromscheitelwert von ca. 180 kA erreichen können.

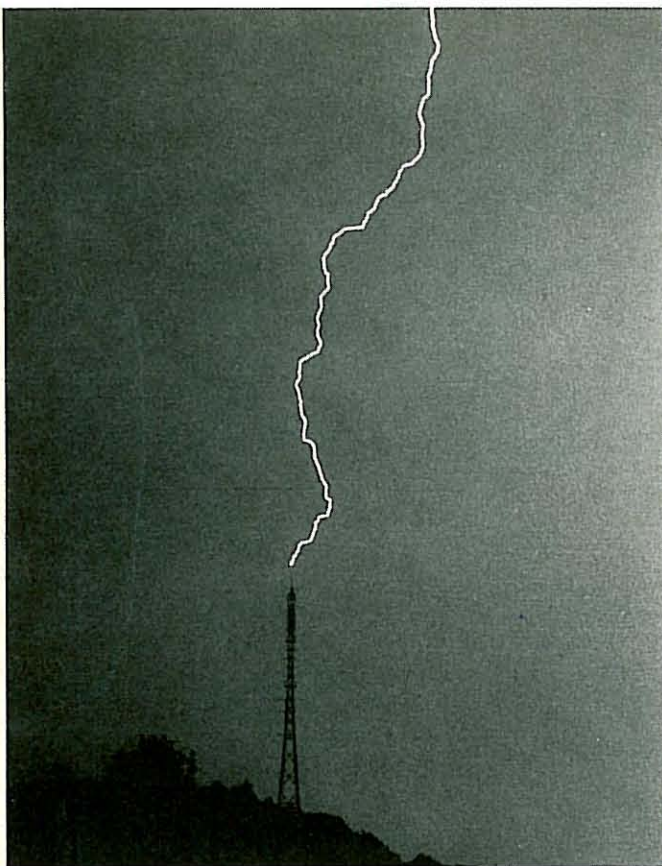
„Zündende“ und „kalte“ Blitzschläge

Die Einteilung in langdauernde Ströme kleiner Höhen (50 bis 300 A) und in kurze Stromimpulse großer Höhen (2000 bis 200 000 A) mit einer Dauer der Größenordnung $100 \mu\text{sec}$ hat nicht nur theoretisches Interesse. Die beiden Stromformen entsprechen nämlich ungefähr dem, was im Volksmund „zündende“ und „kalte“ Blitze genannt wird. Der zündende Blitz weist rund 1000mal längere Dauer auf als der kalte, dagegen relativ kleinen Strom. Damit ist er fähig, als Brandstifter zu wirken, beispielsweise Heu oder andere brennbare Stoffe, insbesondere wenn sie fein verteilt sind, anzuzünden.

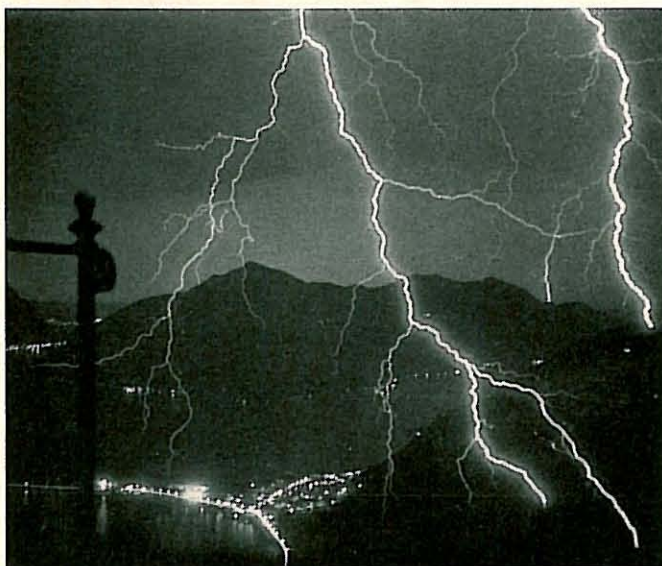
Der kalte Blitz kann dies infolge seiner kurzen Dauer weniger, trotz der enormen Temperatur im Blitzfunken. Nach amerikanischen Messungen, die zum Teil am Mte. S. Salvatore durchgeführt wurden, beträgt die Temperatur während der ersten Mikrosekunden 30 000 bis 40 000 °C. Die plötzliche Ausdehnung der Luft im Blitzkanal wirkt wie eine Explosion, durch die kurzdauernd eine sehr starke Druckwelle ausgelöst wird. Wenn diese in einer Spalte eines Baumstammes entsteht, wird der Baum zersplittert. Für das Eindringen des Blitzes genügen auch sehr dünne Spalten von 1 mm oder noch weniger. Der Durchmesser des leitenden Kerns eines Blitzkanals ist in den ersten Mikrosekunden wahrscheinlich von der Größenordnung eines mm. Er wächst mit der Zeit rasch an und dürfte im Blitzkanal ungefähr 1 cm betragen. Diese Größe kann aus den Photographien des Blitzkanals wegen der starken Überstrahlung nicht gemessen werden. Der Durchmesser des leitenden Kerns ist auch nicht zu verwechseln mit dem Durchmesser der elektrischen Glimmhülle, die mehrere m betragen dürfte. Man versteht somit, daß nur Bäume mit rissigem Gefüge oder rissiger Rinde vom Blitz gesprengt oder angesplittert werden können. Bäume mit glatter Rinde (Buchen usw.) dagegen lassen den Blitz nicht ins Innere eintreten; der Funke verläuft als äußerer Überschlag in Luft, ohne merkbliche Spuren zu hinterlassen. Dies wirft ein Licht auf

Bild 6: Häufigkeitskurven der Stromscheitelwerte positiver und negativer Blitzströme.





7 Bild 7: Unverzweigter Blitz.



8

Bild 8: Blitz mit nach unten gerichteten Verzweigungen.



9

Bild 9: Blitz mit nach oben gerichteten Verzweigungen.

die Gefahr der volkstümlichen, sicher falschen Regel, wonach man sich vor dem Blitz unter Buchen flüchten soll; davor ist zu warnen!

Nur die kurz dauernden, sehr stromstarken Blitzstrom-Impulse bilden eine Gefahr für die Betriebssicherheit der Hochspannungsleitungen; für ihre Erforschung ist viel Mühe und Geld aufgewendet worden und wird für spezielle Fragen heute noch aufgewendet.

Statistik der Blitzströme

Die großen Unterschiede in Höhe, Dauer, Anstiegszeit, Ladung usw. des Blitzstromes bewirken, daß eine wissenschaftliche Beschreibung des Blitzes nur auf statistischer Basis möglich ist; d. h. es muß die Häufigkeit der Blitze mit kleinem und großem Stromscheitelwert, die Häufigkeit der Blitze mit kürzerer oder längerer Dauer, mit kleinerer oder größerer elektrischer Ladung usw. gezählt werden.

Bild 6 zeigt als Beispiel eine solche Häufigkeitskurve für den Stromscheitelwert. Mit den entsprechenden Häufigkeitskurven für die übrigen Kenngrößen positiver und negativer Blitzströme ist eine Grundlage für die Bemessung jedes Blitzschutzes gegeben. Darauf wird hier nicht eingegangen.

Photographie des Blitzes

Wohl jeder, der sich für das prächtige Naturschauspiel des Blitzes interessiert, wird sich fragen, worin die großen Unterschiede der Blitzstromformen wissenschaftlich begründet sind. Darüber gibt uns die Photographie der Blitze Auskunft. Was zeigen nun die vielen Blitzphotographien mit der üblichen Kamera?

Bild 7 zeigt einen Blitzeinschlag in den Turm 1 auf dem San Salvatore, wobei die Blitzbahn ohne jede Verzweigung bleibt. Bild 8 ist ein Beispiel für die sehr häufigen Blitze mit starken, im wesentlichen nach unten weisenden Verästelungen. Bild 9 zeigt den im Flachland seltenen Blitztyp, der sich nach oben gabelt. Solche Blitze lassen sich an hohen Türmen oder Schiffsmasten oder an Metallstangen auf Bergen beobachten.

Auflösung des Blitzes

Es liegt nahe, zu versuchen, den Blitz zeitlich aufzulösen. Man braucht zu diesem Zweck nur eine Kamera periodisch hin und her zu bewegen, so löst sich der einfache Blitzstrahl in vielen Fällen in eine kleinere oder größere Anzahl von Teilblitzen auf. Erste Aufnahmen dieser Art hat bereits Walter, Hamburg, um 1900 aufgenommen. Schwieriger ist die zeitliche Auflösung der Teilblitze; dazu dient die Kamera nach Boys und ihre Weiterentwicklungen sowie z. B. die auf dem San Salvatore verwendete Kamera nach Bild 10. Der Photofilm bewegt sich

mit der konstanten Geschwindigkeit von ca. 27 m/sec hinter dem Objektiv; es handelt sich um eine „Schmierkamera“, die für den vorliegenden Zweck ausgezeichnet geeignet ist.

Mit Filmgeschwindigkeiten von 10 bis 50 m/sec gelingt es, den einzelnen Teilblitz weiter aufzulösen, d. h. in diesem Fall, ihn in einen Leitblitz (leader stroke) und einen Hauptblitz (main stroke) zu zerlegen. Der erste Leitblitz wächst relativ langsam vor, mit ca. $1/3000$ bis $1/1000$ der Lichtgeschwindigkeit, was etwa 100 bis 300 km/sec entspricht. Für die Entstehung eines ca. 5 km langen vertikalen Teilblitzes werden somit ca. $1/20$ bis $1/60$ Sekunden benötigt. Die folgenden Bilder zeigen derartige Blitzphotographien, die mit der Kamera nach Bild 10 aufgenommen wurden.

Photobeispiele von Abwärtsblitzen aus negativen Wolken, Bilder 11 und 12

In der Horizontalen ist der Zeitmaßstab in Millisekunden (msec), in der Vertikalen die Höhe über der Spitze des Meßturmes oder über dem Boden in m aufgetragen. Der Beginn der Lichterscheinung befindet sich auf der linken Bildseite, das Ende der Aufnahme rechts. Man erkennt deutlich die schwach gezeichneten Striche, die sich zuerst oben, dann immer weiter unten zeigen, was beweist, daß sich der Blitzkanal von der Wolke aus gegen den Erdboden hin ausbildet. Sobald diese schwach leuchtenden Stufen des „leaders“ die Erde bzw. die Turmspitze ganz oder annähernd erreicht haben, folgt der helle Strich, der den Hauptblitz anzeigt. Dieser leuchtet eine gewisse Zeit, um dann abzuflauen. Im Hauptblitz entlädt sich der vorher von der Wolke aus aufgeladene Kanal des Leitblitzes sehr rasch. Mit der gewählten Geschwindigkeit des Films läßt sich die viel größere Geschwindigkeit der fortschreitenden Entladung des Blitzkanals nicht messen. Sie beträgt nach anderen Messungen ca. $1/3$ der Lichtgeschwin-

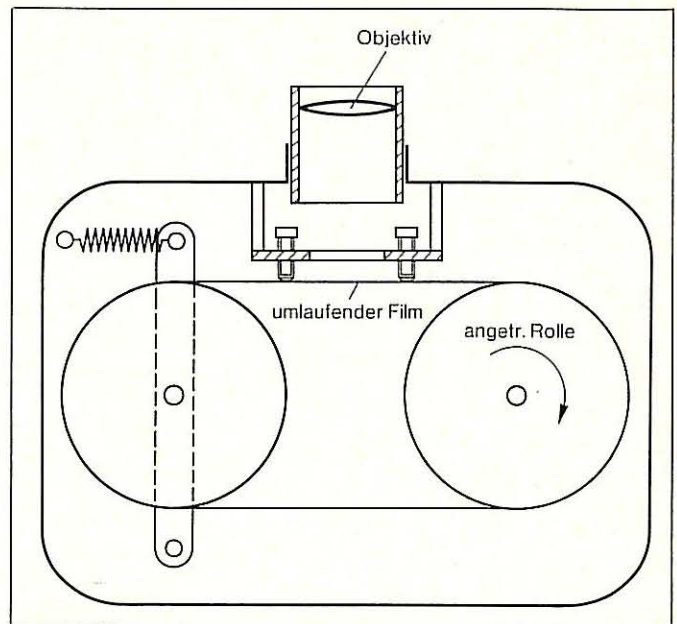


Bild 10: Kamera für rasch bewegten Film zur zeitlichen Auflösung der Teilblitze.

digkeit, ist also etwa 100- bis 1000mal größer als jene der Ausbildung des Leitblitzes. Das Bild des Hauptblitzes, wie es mit dem bewegten Film gesehen wird, unterscheidet sich daher praktisch nicht vom üblichen Bild, das mit ruhendem Film erhalten wird.

Die gleichzeitig mit dem Photo (Bild 11) gemessenen Blitzströme (entsprechend Bild 4) beweisen die Entladung einer negativ geladenen Wolke nach dem Meßturm. Der Blitzstrom am Erdboden wächst in allen diesen Fällen innerhalb ca. $10 \mu\text{sec}$ auf seinen vollen Wert von 15 bis 30 kA (15 000 bis 30 000 A).

11a

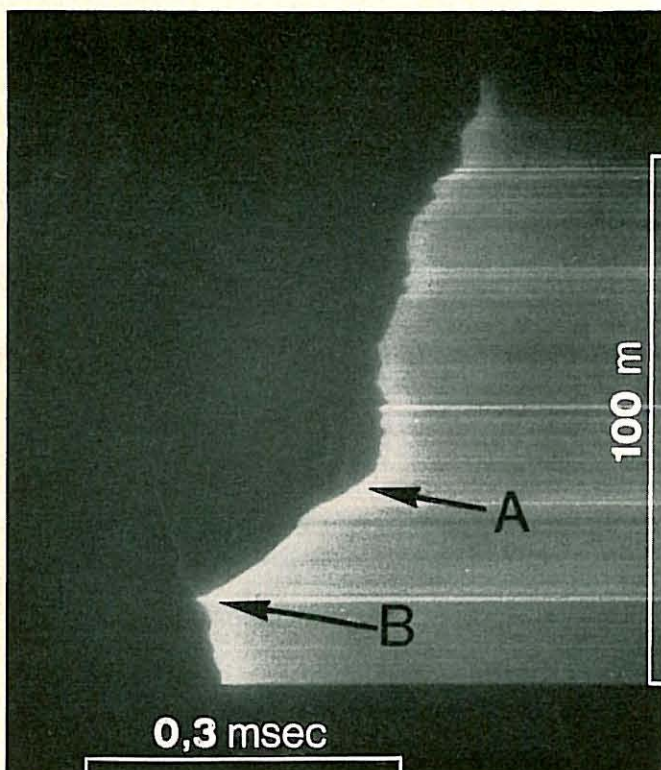


Bild 11: Erstes Beispiel eines Abwärtsblitzes aus einer negativen Wolke nach dem Turm 2.

Links:

a) Photo Leitblitz und Hauptblitz

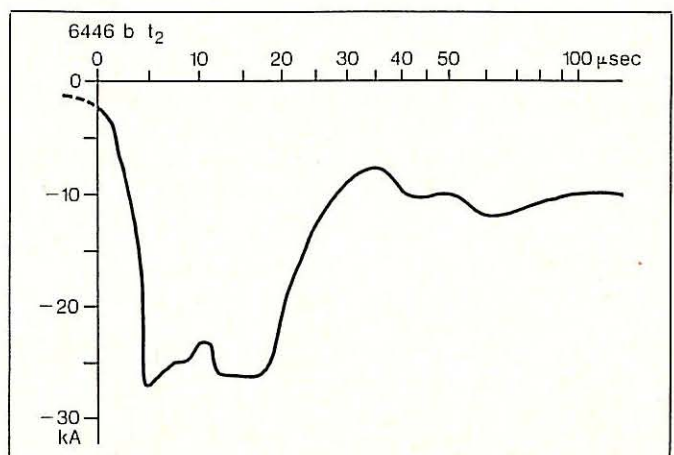
A Treffpunkt des Leitblitzes mit dem Hauptblitz bzw. mit der unsichtbaren Fangentladung

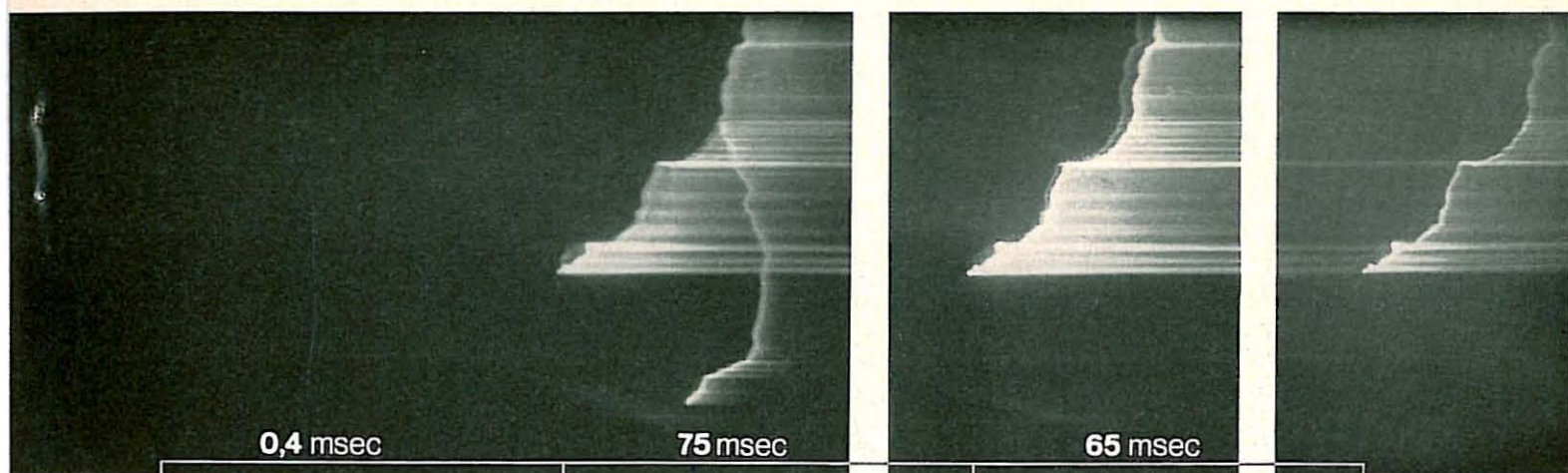
B Seitenast der sonst unsichtbaren Fangentladung

Unten:

b) Zugehöriger Stromverlauf im Turm 2.

11b





12a

12b



Bild 12: Zweites Beispiel eines Abwärtsblitzes aus negativer Wolke zur Stahlkonstruktion des Turmes 2, unterhalb der Nadel.

- a) Photo mit rasch bewegtem Film des ersten Teilblitzes (links) sowie von 2 Folgeblitzen in 75 + 65 msec Abstand (rechts).
- b) Photo auf ruhendem Film, im Hintergrund Lugano.

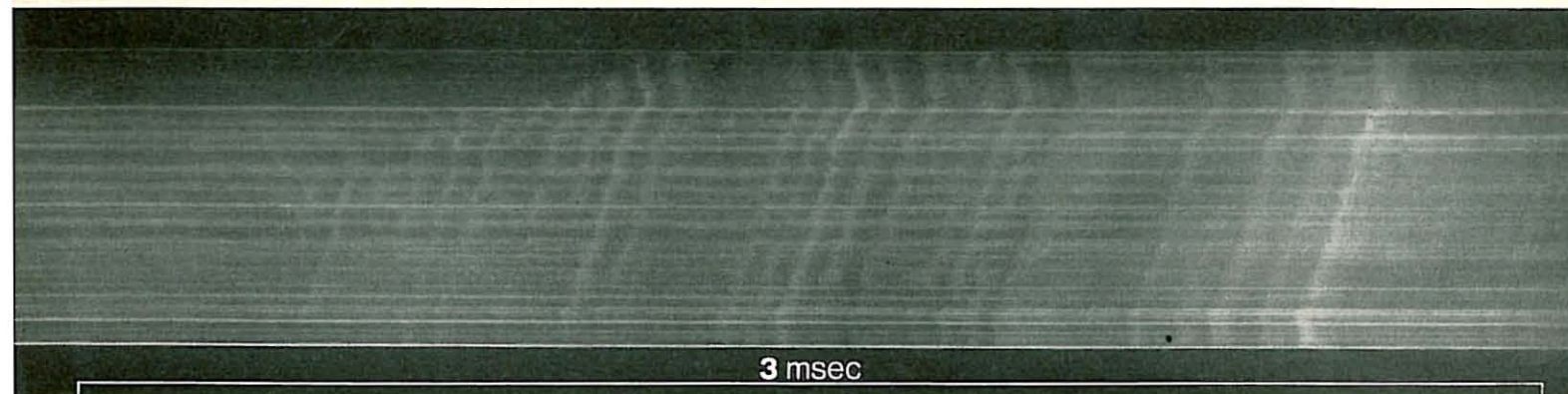
Bild 13: Beispiel eines Aufwärtsblitzes von der negativen Turmspitze 2 aus.

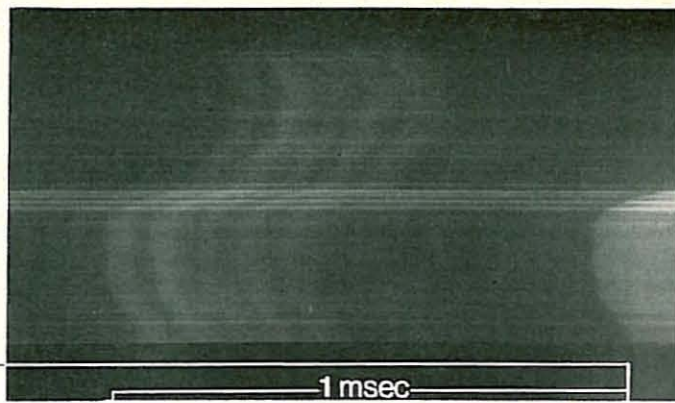
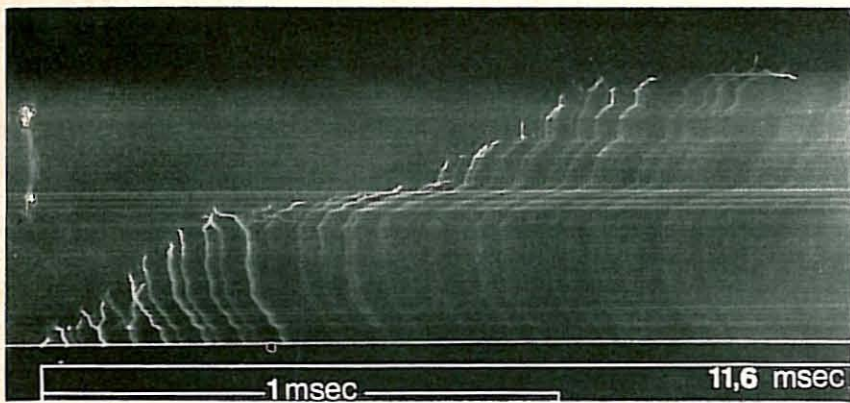
- a) Photo mit rasch bewegtem Film, links Anfang der Entladung
- b) Photo mit ruhendem Film,
- c) Vergrößerung des Anfangs von a).

Bild 14: Beispiel eines Aufwärtsblitzes von der positiven Turmspitze 2 aus.

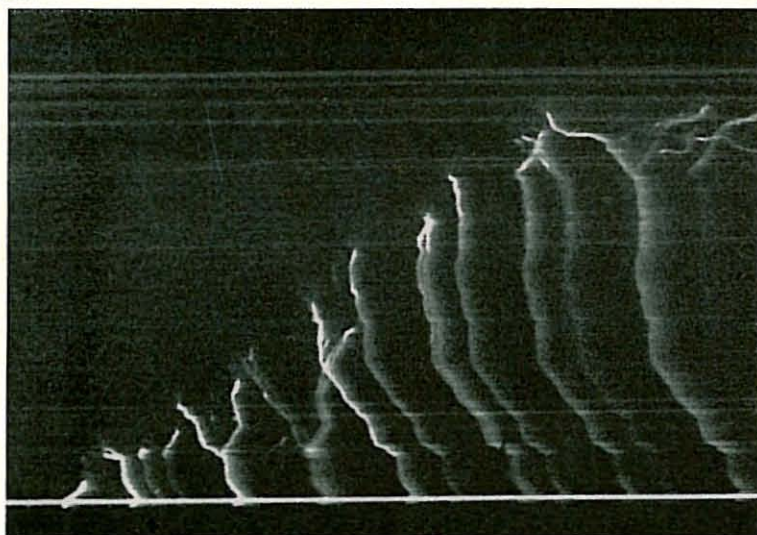
- a) Photo mit rasch bewegtem Film vom Berggipfel aus,
- b) Photo mit rasch bewegtem Film von Breganzona-Lugano aus.

14a

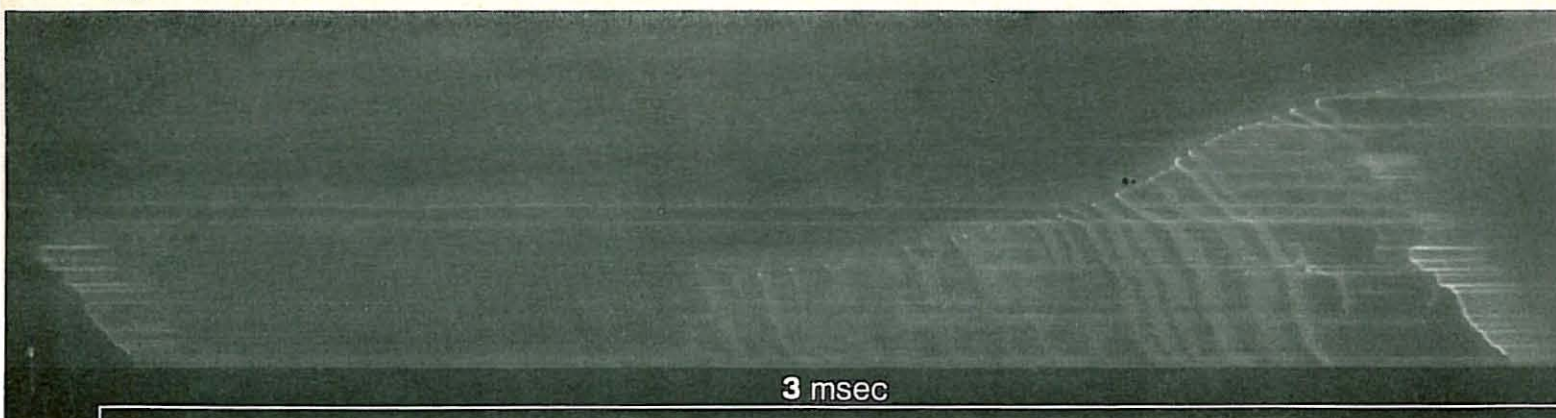




13c



14b



Beispiele von Aufwärtsblitzen und eines positiven Abwärtsblitzes, Bilder 13 und 14

Im Gegensatz zu den Bildern 11 und 12 zeigen die Bilder 13 und 14 das Vorwachsen eines Leitblitzes von einer Turmspitze, d. h. von „Erde“ gegen die Wolken hinauf. Dieser Fall ist für die Erforschung langer Funken besonders wertvoll, weil in der Turmspitze zugleich der Verlauf des Blitzstromes bei der Entstehung des Blitzkanals von Anfang an gemessen werden kann. Dies geschieht auf dem San Salvatore seit 1943. Die Photos sind zum Teil vom Gipfel des San Salvatore gegen Turm 2 aufgenommen, zum anderen Teil von einer Photostation in Lugano-Breganzona aus. Bild 13 zeigt einen Aufwärtsblitz von der negativen Turmspitze 2 nach oben, Bild 14 von der positiven Turmspitze aus. Der Unterschied in der Formierung des Funkenkanals ist deutlich erkennbar. Positiv geladene Kanäle sind derart lichtschrach, daß sie nur in seltenen Fällen auf der bewegten Photoschicht erscheinen.

Optischer und elektrischer Vergleich, Blitztypen

Aus dem Vergleich vieler Blitzbilder mit den Strom-Oszillogrammen ergibt sich, daß ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Vorwachsrichtung des Leitblitzes und dem Stromverlauf an der Turmspitze besteht: Bei Aufwärtsblitzen besteht der Strom des ersten Teilblitzes aus einem kleinen Strom langer Dauer. Bei Abwärtsblitzen dagegen beginnt der Strom mit einem starken Stromimpuls. Es kann somit auch aus den Oszillogrammen erkannt werden, ob es sich um einen Abwärtsblitz oder einen Aufwärtsblitz handelt. Umgekehrt kann aus der Art der Stufenbildung, wie sie in einer guten Aufnahme auf bewegtem Film ersichtlich wird, auch auf die Polarität der Ladung im Blitzkanal geschlossen werden. Negativ geladene Kanäle zeigen sehr ausgeprägte Stufenbildung, positiv geladene dagegen zeigen wohl teilweise stärker leuchtende Endpunkte des Kanals, aber keine als längere Striche erscheinenden Ruckstufen. Die zeitliche Schwankung der Lichtintensität ist im positiven Kanal viel kleiner als beim negativen. Schließlich hat sich bestätigt, daß aus der Richtung der Verästelungen eindeutig auf die Vorwachsrichtung eines Blitzes geschlossen werden kann.

Alle Beobachtungen lassen sich in das Schema des Bildes 15 einfügen, das alle vier möglichen Blitztypen darstellt.

Fangentladungen

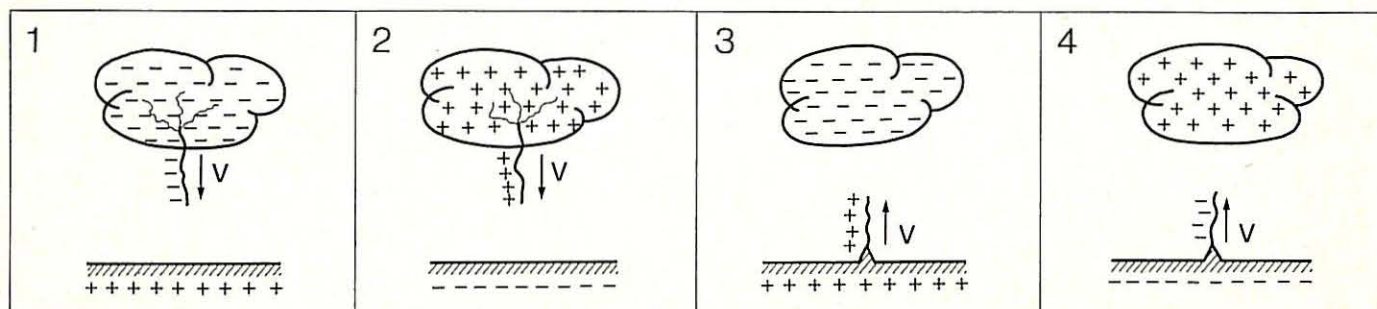
Schließlich soll noch auf die Fangentladung hingewiesen werden. Beim genaueren Betrachten von Bild 11 zeigt sich, daß der Hauptblitz früher einsetzt, als dem Moment entspricht, in dem der Leitblitz die Turmspitze oder den Erdboden erreicht hätte. Dies muß dahin gedeutet werden, daß dem herunterwachsenden Leitblitz bei der Annäherung an die Turmspitze eine Entladung vom Turm aus entgegenwächst; das ist die „Fangentladung“, die den herunterwachsenden Leitblitz „fängt“. Vom Standpunkt des Hochspannungsingenieurs aus hat man sich eine Fangentladung gewissermaßen als „Durchschlag“ der hochbeanspruchten Reststrecke zwischen Leitblitzkopf und Turmspitze vorgestellt. Diese Vorstellung muß jedoch auf Grund der Beobachtung sehr langer Fangentladungen unter positiven Wolken mindestens teilweise berichtigt werden. Die lange Fangentladung ist anfänglich im Oszillogramm nicht zu unterscheiden von einem Aufwärtsblitz an der negativen Turmspitze. Erst nach einer oder mehreren Mikrosekunden zeigt dann der Strom einen starken Anstieg mit Stromwerten von vielen kA, was darauf hinweist, daß der aufwärts wachsende Kanal einem bereits bestehenden Kanal in der Wolke begegnet ist, so daß sich dieser dann über den Aufwärtskanal entladen konnte. Das entspricht in diesem Falle durchaus einer „Fangentladung“. Sie kann mehr als 1 km Länge erreichen; manchmal ist sie nur aus dem Stromverlauf ersichtlich, da der Treffpunkt oft in den Wolken liegt.

„Blitzschutz“ und „Blitzgefährdung“

Die gewonnenen Resultate der gleichzeitigen elektrischen und photographischen Blitzbeobachtungen sind zunächst für die Hochspannungstechnik interessant. Sie bestätigen nämlich, daß zur Entstehung sehr langer Blitze nicht unbedingt sehr hohe Spannungen notwendig sind. Mit dem Strom der Größenordnung 100 A, der den Leitblitzkanal auflädt, entsteht nämlich in den Stufen bereits ein Lichtbogen, der die Luft gut leitend macht. Damit verlagert sich das elektrische Feld an die Kanalenden, so daß der Kanal weiterwachsen kann, wie dies der Funkenphysiker M. Töpler, Dresden, für Gleitentladungen auf Isolieroberflächen bereits um die Jahrhundertwende nachgewiesen hat. Die Spannung zwischen Gewitterwolke und Erde dürfte kleiner sein als früher angenommen wurde, nämlich nicht einige 100 Megavolt (MV).

Bild 15: Die vier möglichen Blitztypen:

- 1 Abwärtsblitz aus negativer Wolke,
- 2 Abwärtsblitz aus positiver Wolke,
- 3 Aufwärtsblitz aus positiver Turmspitze,
- 4 Aufwärtsblitz aus negativer Turmspitze,
- V Vorwachsrichtung des Leitblitzes.



Jahr	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1955 bis 1963 Total	Mittel
<i>Ausgewertete Oszillogramme</i> (beide Türme auf demselben Oszillogramm)	30	20	28	9	46	37	18	36	92	316	35,1
Einschläge gleichzeitig in beide Türme	3	7	2	1	14	5	0	5	26	63	7,0
Total der Einschläge in beide Türme	33	27	30	10	60	42	18	41	118	379	42,1
<i>Einschläge in Turm 1</i>	21	15	14	7	35	24	13	23	70	222	24,7
Abwärtsblitze	5	4	3	1	9	1	7	11	11	52	5,8
Aufwärtsblitze	16	11	11	6	26	23	6	12	59	170	18,9
<i>Einschläge in Turm 2</i>	12	12	16	3	25	18	5	18	48	157	17,4
Abwärtsblitze	7	3	4	1	3	7	2	6	14	47	5,2
Aufwärtsblitze	5	9	12	2	22	11	3	12	34	110	12,2
<i>Positive Blitzströme</i>	3	5	12	0	4	8	0	4	10	46	5,1
Abwärtsblitze	2	1	4	0	2	3	0	2	4	18	2,0
Aufwärtsblitze	1	4	8	0	2	5	0	2	6	28	3,1
<i>Negative Blitzströme</i>	30	22	16	9	54	34	18	37	104	324	36,0
Abwärtsblitze	10	6	3	2	10	5	9	15	21	81	9,0
davon mit kontinuierlichem Stromanteil	4	4	3	1	5	2	4	3	2	28	3,1
Aufwärtsblitze	20	16	13	7	44	29	9	22	83	243	27,0
davon mit Stößen	4	2	6	2	15	12	5	15	25	86	9,5
<i>Blitzströme mit wechselnder Polarität</i> (nur Aufwärtsblitze)	0	0	2	1	2	0	0	0	4	9	1,0
Prozentsatz der Blitze mit positivem Stromanteil	9,1	18,5	46,7	10,0	10,0	19,0	0	9,8	11,9	14,5	
Prozentsatz der Abwärtsblitze	36,4	26,0	23,3	20,0	20,0	19,0	50,0	41,5	21,2	26,1	

Anzahl der in den Jahren 1955 bis 1963 oszillographierten Blitzeinschläge, aufgeteilt nach Meßturm, Stromrichtung und Vorwachsrichtung des Leitblitzes.

sondern einige 10 MV, für kürzere Blitze vielleicht sogar noch weniger als 10 MV. Wir nähern uns damit dem Gebiet der für die Prüfung von Höchstspannungsübertragungen nötigen Prüfspannungen (1 MV = 1 Million Volt).

Der genaueren Erkenntnis der Entstehung der Blitzentladungen kommt sodann Bedeutung in allen Fragen des Schutzes von Personen und Lebewesen gegen Blitzschlag zu. Wir verstehen heute die große Gefährdung auf Berggraten oder unter Bäumen, oder auf einem Heuwagen beim Hantieren mit der Heugabel, oder einem hohen Steinturm oder einer Kirche mit Metallkreuz auf dem Dach ohne künstliche oder natürliche Blitzableitung zur Erde.

Ungelöste Probleme der Blitzforschung

Die geschilderten Beobachtungen stellen einige Fragen zur Diskussion, von denen nur die folgenden erwähnt seien:

- Wie kann sich an der Turmspitze ein genügend hohes elektrisches Feld entwickeln, um einen Aufwärtsblitz entstehen zu lassen? Entstehen diese nur als Folge bereits bestehender Blitze innerhalb der Wolken? Dazu ist die Beobachtung interessant, daß in der Nähe des Meßturmes auf dem Berggipfel im Moment eines Blitzes in der Umgebung des Berges in der Regel ein kurzer scharfer Knall über der Turmspitze wahrzunehmen ist. Dieser Knall rührt von einer Stoßentladung her, die ihre Entstehung einem starken elektrischen Feld verdankt. Hier liegt wohl auch die Ursache der Blitzunfälle mit Regenschirmen oder Eispickeln. Unfälle scheinen durch solche Stoßentladungen möglich, ohne daß der Blitzeinschlag in die betreffende Person erfolgt.
- Warum entstehen Mehrfachblitze nur aus der Entladung negativ geladener Wolken, aber nicht aus positiven Wolken? Eine Erklärung ist darin zu sehen, daß

bei der stoßartigen Entladung des Blitzkanals stets eine positive Restladung zurückbleibt, unabhängig von der Wolkenpolarität. Diese Erscheinung ist in der verschiedenen Beweglichkeit der positiven und negativen Ladungsträger begründet.

- Warum sind die Fangentladungen aus der negativen Turmspitze viel länger (bis über 1 km) gegenüber den Fangentladungen aus positiven Turmspitzen? Diese Beobachtung steht im Gegensatz zu den Beobachtungen an negativen und positiven Spitzen unter technischer Hochspannung. Möglicherweise liegt eine Erklärung für diese Beobachtung darin, daß die negativ geladenen Kanäle wesentlich stärker leuchten als die positiven.
- Läßt sich die Entstehung der positiven und negativen Leitblitzkanäle mit den modernen Auffassungen über den Gasdurchschlag einwandfrei erklären? Am schwierigsten zu verstehen ist ohne Zweifel das ruckartige Vorwachsen der negativ geladenen Kanäle. Vielleicht bringt die moderne Plasmaforschung eine einleuchtende und zahlenmäßig richtige Erklärung.

Die beschriebenen Untersuchungen über den Blitz wurden durchgeführt von der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), unter Mithilfe des Hochspannungs-Institutes der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich; für die Anschaffung wertvoller Apparate wurden vom Schweizerischen Nationalfonds für wissenschaftliche Forschung in den letzten Jahren Geldmittel zur Verfügung gestellt.

Für die gewissenhafte und sorgfältige Mitarbeit bei der Aufnahme und Ausarbeitung der Oszillogramme und Photographien ist der Autor H. Binz und E. Vogelsanger zu großem Dank verpflichtet.

Literatur: Töpler, M.: Meteorologische Zeitschrift 34 (1917) S. 225—239. — Hagenguth, J. H., und J. G. Anderson: Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 71 (1952) S. 640—649. — Berger, K., und E. Vogelsanger: Bull. SEV 56 (1965) S. 2—22. — Berger, K., und E. Vogelsanger: Bull. SEV 57 (1966) S. 599—620. — Orville, R. E.: J. of Applied Physics 38 (1967) Nr. 2, S. 895—896. — Uman, M. A.: Quantitative Lightning Spectroscopy, IEEE Spectrum, August, 1966, S. 102—110.