

Zürich, März 1969
KB/ASchm

K. Berger & E. Vogelsanger:

Ueber den Verlauf der elektrischen Feldstärke in unmittelbarer
Nähe des Blitzeinschlages

1. Uebersicht

Seitdem es gelungen ist, bei einer grösseren Anzahl von Blitzen das Vorwachsen zu photographieren, und zugleich den Stromverlauf beim Einschlagspunkt zu oszillographieren, drängt sich auch die Frage nach der elektrischen Feldstärke über dem Blitzableiter vor dem Einschlag auf, um die beobachteten Stromformen besser verstehen zu lernen. Diese Frage stellt sich vor Allem beim Abwärtsblitz, wo der Feldverlauf bei der Annäherung des Blitzkopfes an den Blitzableiter zahlenmässig zu wenig bekannt ist. Beim Aufwärtsblitz fragt es sich sodann, ob er durch ein langsames Ansteigendes Feldes infolge zunehmender oder verlagerter Wolkenladungen, oder durch vorangehende Entladungen innert der Wolken mit entsprechender rascher Feldzunahme am Blitzableiterturm verursacht wird. Zu diesem Zweck wurde am San Salvatore im Sommer 1967 erstmals eine sog. "Feldmühle" ¹⁾ am Blitzmessturm auf dem Berggipfel installiert. Die Einrichtung ist in einem Bericht an die CIGRE 1968 ²⁾ erstmals beschrieben, wobei auch einige Beispiele des Feldverlaufes angeführt wurden.

Der vorliegende Bericht gibt einen Ueberblick über die bisherigen Messungen und über den Zusammenhang zwischen dem Feldverlauf unmittelbar am Blitzmessturm und dem Stromverlauf beim Blitzeinschlag, sowohl beim Abwärtsblitz wie auch beim Aufwärtsblitz, mit Folgerungen für die weitere Blitzforschung.

2. Versuchseinrichtung

Eine erste "Feldmühle" war in den Gewitterperioden 1967 und 1968 am 70 m hohen Messturm auf dem Berggipfel in etwa 50 m Höhe über dem Boden angebracht worden. Sie bestand aus einer rotierenden und geerdeten Metallscheibe mit 24 Schlitzten und einer ebensolchen feststehenden und von Erde isolierten Messscheibe. Die erste Scheibe dreht sich mit angenähert 50 Umdrehungen pro Sekunde. Die Messscheibe wird somit während der Hälfte von ca. 1/1200 s

- 1) Der Begriff "Feldmühle" geht vermutlich auf Prof. Schwenkhagen zurück. In der englischen Literatur wird vom "generating voltmeter" oder "rotating voltmeter" gesprochen, trotzdem es sich nicht um ein Voltmeter handelt.
- 2) CIGRE-Rapport 33.03, 1968

dem atmosphärischen Feld ausgesetzt, und während der andern Hälfte von ca. $1/1200$ s vom atmosphärischen Feld abgeschirmt ("geerdet"). Derart entstehen bei jeder Umdrehung der rotierenden Scheibe 24 Messimpulse, d.h. bei der synchronen Tourenzahl von 50/s $24 \times 50 = 1200$ Messimpulse. Die Zeitauflösung liegt somit bei ca. 1 ms; Veränderungen innert dieser Zeit werden nur als Mittelwert erfasst.

Für die vorliegenden Messungen wurde die Feldmühle nicht im Leerlauf, sondern im Kurzschluss betrieben; d.h. dass die Influenz-Ladung der Messplatte über einen niederohmigen Messwiderstand an Erde abgeleitet wurde. Die Spannung an diesem Messwiderstand (wenige $k\Omega$) wird verstärkt und über ein umlaufendes Magnetspeicherband dem Oszillographen zugeführt. Auf diese Weise kann der Feldverlauf bereits einige Sekunden vor dem Einschlag des Blitzes aufgezeichnet werden.

Die von der Feldmühle erfasste lokale Feldstärke steht in linearem Zusammenhang mit den Feldstärkewerten an irgendwelchen Orten beim Turm, solange nicht Glimmerscheinungen und damit verbundene Raumladungen beim Turm auftreten. Es ist offensichtlich, dass die Feldstärke über der Turmspitze ein Maximum aufweist, das von der Beschaffenheit der Turmspitze abhängt. Es ist weniger interessant als der mittlere Feldstärkewert zwischen Turmspitze und Wolke.

Mit der Annahme, dass die geladene Wolke durch eine geladene Elektrode dargestellt werden kann, lässt sich die Feldstärkeverteilung im elektrolytischen Trog ausmessen. Es ergibt sich, dass das elektrische Feld über der Turmspitze bereits in 2facher Turmhöhe schon sehr angenähert homogen wird. Der Umrechnungsfaktor zwischen Feldstärke an der Feldmühle und der Feldstärke im homogenen Feld hoch über dem Turm wurde zu ca. 1 : 16 bestimmt.

In Wirklichkeit ist vor dem Entstehen eines Aufwärtsblitzes mit Sicherheit mit starken Glimmentladungen über der Turmspitze zu rechnen. Die lineare Uebertragung der Feldstärken wird damit ungenau in dem Sinne, dass die Feldstärke vor allem über der Turmspitze, aber auch bei der Feldmühle reduziert wird. Messungen zeigen, dass dieser Effekt für die Feldstärkemessung in unmittelbarer Nähe des Turmes von Bedeutung ist. Viele Oszillogramme zeigen, dass sich beim Erreichen einer bestimmten Feldstärke (in der Größenordnung von 200...300 kV/m an der Mühle) der Feldanstieg verlangsamt und manchmal sogar eine Einsattelung in der Feldkurve auftritt. Es lässt sich vermuten, dass dieser Effekt durch die Ausbildung einer Glimmhülle um die Antenne auf der Turmspitze bedingt ist.

Es wurde versucht, auch den Einfluss einer solchen Glimmhülle durch Messungen im elektrolytischen Tank zu erfassen. In Fig. 1 zeigen die ausgezogenen Kurven die ermittelten Aequipotentialflächen um den Turm, solange keine Glimmhülle auftritt. Unter der Annahme, dass durch eine Glimmentladung das Nullpotential des Turmes auf eine Hülle um die Antenne mit 5 m Radius hinausgetragen wird, ergeben sich die punktiert eingezeichneten Aequipotentialflächen, denen am Standort der Feldmühle nur noch $1/3$ des ursprünglichen Feldes entspricht. Dabei ist allerdings der Spannungsabfall in der Glimmhülle vernachlässigt, und der Radius von 5 m für diese Hülle scheint extrem. Man kann annehmen, dass in Wirklichkeit die Reduktion des Feldes an der Mühle durch die Glimmentladung etwas geringer ist, schätzungsweise $1 : 2$. Dies bedeutet, dass vor dem Entstehen eines Aufwärtsblitzes das Verhältnis des mittleren Feldes zwischen Wolke und Erde zum gemessenen Feld an der Mühle etwa $1 : 8$ statt $1 : 16$ ist.

3. Resultate

Die Figuren 2 - 8 zeigen einige Beispiele für den Verlauf des Feldes und des zugehörigen Blitzstromes. Es ist jeweils das Feldoszillogramm (1) wiedergegeben (teilweise überlagert durch das Oszillogramm eines anderen Messkanals), darunter die herausgezeichnete Feldkurve (2) und schliesslich die Stromkurve (3). Die markierten Zeitpunkte bedeuten in allen Figuren:

- A = Einsetzen der Feldänderung infolge einer Wolkenentladung. Bis zum Zeitpunkt A ist das Feld stationär.
- B = Einsetzen einer Aufwärtsentladung an der Turmspitze.
- C = Einschlag eines Abwärtsblitzes in die Turmspitze (Auftreten eines Stosstromes).

Mit Ausnahme von Fig. 2 decken sich in allen Figuren die Zeitmasstäbe für die Feld- und Stromkurven.

Die Figuren betreffen:

- Fig. 2 = Abwärtsblitz aus negativer Wolke. (Der Stromverlauf ist in einem rascheren Zeitmasstab, beginnend in Punkt C der Feldkurve gezeichnet).
- Fig. 3 = Abwärtsblitz aus positiver Wolke ohne Fangentladung (eventuell mit sehr kurzer, im Oszillogramm nicht erkennbarer Fangentladung).
- Fig. 4 = Abwärtsblitz aus positiver Wolke mit langer Fangentladung. Im Zeitpunkt B beginnt die Fangentladung, deren Strom im Zeitpunkt C in den Stosstrom des Abwärtsblitzes übergeht.
- Fig. 5)
Fig. 6) } Aufwärtsblitze aus der positiven Turmspitze gegen negative Wolken.
- Fig. 7)
Fig. 8) } Aufwärtsblitze aus der negativen Turmspitze gegen positive Wolken.

(Der Strommasstab ist nur im unteren Bereich linear und hat eine Amplitudengrenzung bei ca. 10'000 A, bzw. ca. 1'000 A).

Der Stromverlauf von Fig. 8 zeigt erst eine ganz schwache Aufwärtsentladung bei B₁, die wieder erlischt und 44 ms nachher den Beginn des eigentlichen Aufwärtsblitzes.

Die bisherigen Messungen des Feldstärkeverlaufes beim Turm zeigen im wesentlichen folgendes:

a) Abwärtsblitze

Für den Abwärtsblitz aus negativen Wolken ist Fig. 2 typisch. In den letzten ca. 15 ms vor dem Einschlag steigt das Feld von einem niederen stationären Wert auf einen Spitzenwert, von dem es bei der Entladung des Blitzkanals durch den Stosstrom plötzlich zusammenbricht. Der Feldverlauf dürfte sich durch die Annäherung des herunterwachsenden Blitzkanals erklären lassen. Bei einer Vorwachs-geschwindigkeit von 100...300 km/s des Leitblitzes entspricht der Anstiegsdauer von 15 ms eine Länge des Blitzkanals von 1,5...4,5 km.

Beim Abwärtsblitz aus positiven Wolken von Fig. 3 erstreckt sich der Feldanstieg über einen wesentlich längeren Zeitraum, nämlich ca. 45 ms, und es geht ihm eine Feldamplitude in umgekehrter Richtung voraus. Dies wird verständlich, wenn man bedenkt, dass der Erdblitz eventuell nur ein Ast eines komplexen Wolkenblitzes ist, und dass schon die Ausbildung des letzteren sich im Feldverlauf am Erdboden auswirken kann. Dies besonders dann, wenn grosse Ladungen ausgetauscht werden, wie es bei Blitzen aus positiven Wolken oft der Fall ist. Im Fall von Fig. 3 wurden ca. 30 C von der Wolke zur Erde transportiert.

Abwärtsblitze aus positiven Wolken werden fast immer durch eine Fangentladung eingeleitet. Derjenige von Fig. 3 ist der einzige ohne Fangentladung, zu dem der Feldverlauf aufgezeichnet wurde. Sobald eine Fangentladung auftritt, wirkt sich diese wie ein Aufwärtsblitz aus und bestimmt den Feldverlauf. Im Beispiel von Fig. 4 bewirkt das Auftreten der Stossladung von ca. 100 C im Blitzkanal (Zeitpunkt C) nur eine kurze positive Spitze im Feldverlauf.

Das stationäre Feld vor dem Vorgang ist bei positiven und negativen Abwärtsblitzen erstaunlich klein, im allgemeinen ca. 20...80 kV/m an der Feldmühle. Mit dem Umrechnungsfaktor 1 : 16 dürfte dies einem mittleren Feld zwischen Wolke und Erde von nur ca. 1...5 kV/m entsprechen.

b) Aufwärtsblitze

Vor dem Auftreten eines Aufwärtsblitzes ist praktisch immer ein Feldanstieg zu beobachten, der von einer Umlagerung der Ladungen in den Wolken durch Wolkenblitze herrühren muss. Die Anstiegsdauer kann etwa zwischen 20 und 200 ms variieren. Das Feld kann dabei durch Null gehen oder nicht. Dass alle Beispiele der Fig. 5...8 mit negativen Werten beginnen, ist Zufall.

Die Feldstärken, bei denen die Aufwärtsblitze einsetzen, schwanken stark. Im Durchschnitt sind sie bei Blitzen aus der negativen Turmspitze gegen positive Wolken höher als bei umgekehrtem Polaritätsverhältnis. Die Messwerte an der Mühle schwanken zwischen

210...420 kV/m bei negativem Turm und positiver Wolke
und

120...310 kV/m bei positivem Turm und negativer Wolke

Rechnet man mit dem Faktor 1 : 8 um, so ergibt sich für das mittlere Feld zwischen Wolke und Erde :

26...53 kV/m bei negativer Erde und positiver Wolke
und

15...39 kV/m bei positiver Erde und negativer Wolke

Wegen des Einflusses der Glimmhülle wohnt diesen Zahlen eine grössere Unsicherheit inne.

Unmittelbar nach dem Beginn der Aufwärtsentladung kehrt das Feld seine Richtung um. Bei Blitzen aus der negativen Turmspitze zu positiven Wolken (Fig. 7 und 8) erfolgt die Umkehr praktisch immer innerhalb 1 ms, was die Grenze unserer Zeitauflösung bildet. Bei Blitzen aus der positiven Turmspitze zu negativen Wolken erfolgt sie langsamer und der Nulldurchgang des Feldes wird nach 4...15 ms erreicht.

Nicht selten ist die Feldstärke nach Umkehr der Richtung während vielen ms grösser als vor dem Einsetzen des Aufwärtsblitzes! Sie klingt meistens nur langsam, während Zehntelssekunden ab.

Besonders verblüffend ist, dass nach der Feldumkehr das Feld an der Turmflanke die entgegengesetzte Richtung aufweist als der Strom an der Turmspitze. Diese Erscheinung lässt sich anhand des Beispiels der Fig. 9a und b erklären. Das linke Bild (Fig. 9a) zeigt den Beginn einer Aufwärtsentladung aus der positiven Turmspitze gegen eine negative Wolke. Durch die Entladung mit ihren Verzweigungen werden bedeutende positive Ladungen in den Raum über dem Turm gebracht. Das rechte Bild (Fig. 9b) zeigt ein späteres Stadium; die Entladung hat die Wolke erreicht und einen Teil der Wolkenladungen neutralisiert. Die seitlichen Verzweigungen wachsen nicht

mehr weiter, in ihnen fließt damit kein Strom mehr und ihre Leitfähigkeit ist weitgehend verschwunden. Die positiven Ladungen auf diesen Aesten sind somit im Raum isoliert und können nicht mehr in die Entladung zurückfließen. Sie bestimmen das Feld in der Umgebung des Einschlagsortes (Turmflanke), da sie diesem viel näher liegen als die negativen Ladungen in der Wolke.

Aufwärtsblitze aus der negativen Turmspitze zu positiven Wolken zeigen im allgemeinen grössere und rascher ansteigende Ströme als solche der umgekehrten Polarität. Man könnte annehmen, dass dies der Grund für die raschere Feldumkehr sei. Es gibt aber auch bei dieser Stromrichtung Fälle mit kleinen Strömen, und die Feldumkehr erfolgt bei diesen nicht weniger rasch. Z.B. zeigt der Strom in Fig. 8 bei B₁ eine erste kleine Spitze von höchstens 20 A und ca. 20 mC. Schon diese bewirkt einen steilen Feldzusammenbruch. Bei den Aufwärtsblitzen aus der positiven Turmspitze von Fig. 5 und 6 ist die bis zum Feldnulldurchgang ausgeströmte Ladung etwa 100 mC d.h. 5 mal grösser. Offenbar bringt die Entladung aus der negativen Turmspitze, die stärker verzweigt ist und im Durchschnitt langsamer fortschreitet, mehr isolierte Ladungen in die Umgebung des Blitzkanals und bewirkt dadurch die raschere Feldumkehr als die Entladung aus der positiven Turmspitze.

4. Schlussfolgerungen

Die Aufzeichnung des Feldverlaufes am Turm vor und während des Blitzeinschlages erlaubt einen guten Einblick in das physikalische Geschehen über der Turmspitze. Sie liefert aber keinen Anhaltspunkt über die Feldänderung infolge des Abfließens oder der Neutralisation der höher liegenden und wesentlich grösseren Wolkenladungen. Diese werden vom Moment des einsetzenden Aufwärtsblitzes überschattet von den entstehenden Raumladungen über der Turmspitze.

Es ist daher zu erwarten, dass in Entfernungen vom Blitzeinschlag, die ein Vielfaches der Turmhöhe betragen und die etwa der Wolkenhöhe entsprechen, wesentlich andere Feldstärke-Änderungen auftreten werden. Diese Frage ist von Bedeutung für die Abklärung der Vorgänge innerhalb der Wolken vor und während des Blitzeinschlages einerseits und als Grundlage für das Funktionieren der sogenannten "Blitzzähler", wie sie von der CIGRE empfohlen werden. Feldstärkeregistrierungen liegen zwar bereits in grösserer Anzahl vor, aber leider in keinem Fall das zugehörige Stromoszillogramm des Blitzes. In der Regel ist auch der Abstand des Blitzes vom Messgerät nicht bekannt.

Infolge der Raumladungswirkung in unmittelbarer Nähe des Turms bleibt somit nur die Möglichkeit, das Wolkenfeld durch mehrere in wenigen km vom Einschlagsort aufgestellte Feldmühlen zu erfassen und mit dem Stromverlauf im Blitz zu vergleichen.

Diese Aufgabe soll im Sommer 1969 erstmals mit Hilfe von neuartigen Feldmühlen in Angriff genommen werden.

Legende zu den Figuren

- Fig. 1 Blitzauffangturm auf dem Monte San Salvatore mit Aequi-
potentialflächen
- V Potential
E₀ Mittlere Feldstärke zwischen Wolke und Erde
H Turmhöhe
M Feldmühle
- Fig. 2 Feld- und Stromverlauf bei einem Abwärtsblitz aus ne-
gativer Wolke
Erklärungen im Text
- Fig. 3 Feld- und Stromverlauf bei einem Abwärtsblitz aus po-
sitiver Wolke ohne Fangentladung
Erklärungen im Text
- Fig. 4 Feld- und Stromverlauf bei einem Abwärtsblitz aus po-
sitiver Wolke mit langer Fangentladung
Erklärungen im Text
- Fig. 5 } Feld- und Stromverlauf bei einem Aufwärtsblitz aus der
Fig. 6 } positiven Turmspitze gegen negative Wolken
Erklärungen im Text
- Fig. 7 } Feld- und Stromverlauf bei einem Aufwärtsblitz aus der
Fig. 8 } negativen Turmspitze gegen positive Wolken
Erklärungen im Text
- Fig. 9 Ladung und Feld bei einem Aufwärtsblitz
- a beim Beginn der Entladung
b wenn der Blitzkanal in die Wolke eingedrungen ist
-