

Aufwärtsblitze und Fangentladungen
Neue Erkenntnisse vom Monte San Salvatore

E. Vogelsanger, Schweiz

An den Blitzen in die Messtürme auf dem Monte San Salvatore, von denen wir den Stromverlauf registrieren, haben die Aufwärtsblitze einen grossen Anteil. Gewöhnliche Blitze im Flachland sind Abwärtsblitze. Ihre Entladung beginnt zwischen verschiedenen Ladungsgebieten innerhalb der Wolke, wonach ein Ast zur Erde vorwächst. Sie sind somit nichts anderes als bis zur Erde vorwachsende Ausläufer von Wolkenblitzen. Aufwärtsblitze dagegen beginnen an besonderen Punkten der Erdoberfläche.

Vor allem sind es hohe spitzige Bauwerke, an denen eine Konzentration des elektrischen Feldes stattfindet. Damit an diesen Konzentrationspunkten eine Entladung beginnt, muss natürlich auch das ganze Feld zwischen Wolke und Erde eine gewisse Stärke aufweisen. Wie diese starken Felder zustande kommen, ist noch nicht sicher geklärt. Auf Grund verschiedener Beobachtungen sind wir der Auffassung, dass vom statischen Ladungsaufbau in der Wolke keine so hohen Felder an der Erdoberfläche verursacht werden, und dass erst die Ladungsumschichtung infolge von Wolkenblitzen kurzzeitig zu Feldstärken führt, die Aufwärtsblitze auslösen können. Um diesem Vorgang auf den Grund zu gehen, haben wir diesen Sommer auf einem der Messtürme eine Feldmesseinrichtung montiert, über die in einem andern Rapport berichtet wird.

Ueber die Bedeutung der Aufwärtsblitze an unseren Messtürmen gibt Tabelle I Aufschluss. Die letzten drei Jahre 1964...1966 sind einzeln und im Mittelwert aufgeführt, von den vorhergehenden neun Jahren, deren Ergebnisse bereits im Bulletin* 1964 veröffentlicht sind, nur die Mittelwerte. In der Periode 1955...1963 fallen im Durchschnitt pro Jahr auf 11 Abwärtsblitze 31 Aufwärtsblitze, also $\frac{3}{4}$ Aufwärtsblitze. In den letzten 3 Jahren sind es auf 8 Abwärtsblitze 105 Aufwärtsblitze, also ca. 93% Aufwärtsblitze. Die Unterschiede zwischen den beiden Perioden sind vermutlich durch Verschiedenheiten in den Wetterbedingungen verursacht, die langjährigen Schwankungen unterliegen.

* Bulletin SEV 1964

Da die Aufwärtsblitze im allgemeinen an Türme oder andere hohe Bauwerke gebunden sind, tritt ihre praktische Bedeutung gegenüber den Abwärtsblitzen in den Hintergrund. Für die Forschung sind sie aber sehr interessant. Sie vermitteln uns die Ströme und Ladungen, die beim Aufbau eines Blitzkanales oder Kanalsystemes in Erscheinung treten, während bei den Abwärtsblitzen nur der Entladevorgang des bereits gebildeten Kanales im Stromoszillogramm sichtbar wird. Positive oder negative Aufwärtsblitze können Ladungen bis etwa 300 C mit sich führen. Die bedeutenderen Entladungen sind meist stark verzweigt, wie wir anhand einiger Diapositive zeigen werden. Sie überschreiten die Höhe von ca. 1 km über den Turmspitzen, die dem Bildausschnitt unserer 3 km entfernten Fotoeinrichtung entspricht. Ihre Ladung kann sich dabei auf eine Wolkenoberfläche von mehreren km² verteilen. Wegen der grossen Zahl der Aufwärtsblitze an den Messtürmen, waren es hauptsächlich diese Entladungen, an denen die Entwicklung des Funkenkanals mit Aufnahmen auf bewegtem Film studiert werden konnte. Bei Entladungen an den Turmspitzen ist stets die Entfernung von der Kamera bekannt, und man erfährt aus dem Oszillogramm die Polarität und den Stromverlauf in der Entladung. So liess sich z.B. nachweisen, dass positive Entladungen viel lichtschwächer sind als negative und auch keine so ausgeprägte und regelmässige Stufen im Vorwachsen zeigen wie jene. Die Aufwärtsblitze haben uns so zu wertvollen Beobachtungen über die Entstehung langer Funken verholfen.

Wir haben schon angedeutet, dass sehr wahrscheinlich die Aufwärtsblitze indirekt durch Wolkenblitze verursacht sind, indem erst durch diese die nötige Feldstärke an der Erdoberfläche erzeugt wird. Es ist daher nicht verwunderlich, dass Aufwärtsblitze oftmals mit Aesten von Wolkenblitzen zusammentreffen. Auf diese Weise erklären sich vermutlich die bei Aufwärtsblitzen nach negativen Wolken häufig auftretenden Folgeblitze. Man könnte diese auch als selbständige Abwärtsblitze auffassen, die dem noch geladenen Kanal der abgeklungenen Aufwärtsentladung folgen. Eher unerwartet ist es allerdings, dass auch Aufwärtsblitze mit wechselnder Stromrichtung auftreten. Wie Tabelle I zeigt, sind solche Blitze ziemlich häufig, sie machen in den letzten drei Jahren ca. 8% aller registrierten

Aufwärtsblitze aus. Mit einer einzigen Ausnahme beginnen alle mit einer Entladung aus der positiven Turmspitze, d.h. mit einem negativen Strom, wenn man diesen wie üblich auf die Richtung von der Wolke zur Erde bezieht. Der Strom kann dann unvermittelt oder nach einer kurzen Pause auf positive Werte übergehen, eventuell nachher wieder auf negative. Am Beginn der positiven Stromperiode steht oft ein Stoss, der sich in seiner Form nicht von den Stößen normaler positiver Abwärtsblitze unterscheidet. Liegt von dem betreffenden Blitz eine Aufnahme auf bewegtem Film vor, so lässt sich feststellen, auf welchem Ast einer verzweigten Aufwärtsentladung der nachherige positive Strom zugelaufen ist.

Als Beispiele sind in den Figuren 1...4 einige Oszillogramme solcher Blitze wiedergegeben. Figur 1 zeigt ein Beispiel mit hohem positivem Stosstrom (125 kA). Man muss annehmen, dass, während ein negatives Ladungsgebiet in den unteren Wolkenschichten zur Ausbildung der aufsteigenden Entladung geführt hat, ein kräftiger Abwärtsblitz aus höheren Wolkenschichten einen Ast der Aufwärtsentladung erreicht und so den positiven Stromstoss im Oszillogramm verursacht hat.

Im Oszillogramm von Fig. 2 zeigen beide Messtürme eine Aufwärtsentladung mit positiver Ladung, d.h. mit negativem Strom in Richtung Wolke Erde. Während nun im Turm 2 drei Folgeblitze mit ebenfalls negativem Strom auftreten, erscheint in Turm 1 ein solcher mit positivem Strom. Wir haben somit die interessante Erscheinung, dass in den beiden nur 400 m auseinander liegenden Türmen Blitzströme entgegengesetzter Polarität zur Erde fließen.

In Fig. 3 erscheint nach dem Abklingen des negativen Stromes und einer kurzen Strompause ein mit kleinem Stoss beginnender positiver Stromanteil. Ferner erscheinen 5 negative Stösse mit Amplituden von 4...5 kA, wovon einer während der stromlosen Pause, die andern 4 während des positiven Stromanteiles. Es ist anzunehmen, dass der positive Stromanteil und die negativen Stösse auf verschiedenen Aesten der vorherigen Aufwärtsentladung den Messtürmen zugelaufen sind. Es sind unabhängige Teilblitze, die sich im Gesamtstrom überlagern. Da der betreffende Blitz am Tage erfolgte, konnte dies leider nicht mit einer Fotoaufnahme auf bewegtem Film nachgewiesen werden.

Fig. 4 zeigt schliesslich das einzige Oszillogramm eines Aufwärtsblitzes, der mit positivem Strom beginnt, nachher einen negativen und dann wieder einen positiven Stromanteil aufweist.

Aufwärtsentladungen besonderer Art sind die sogenannten Fangentladungen. Wächst der geladene Kanal eines Abwärtsblitzes gegen die Turmspitze, so ergibt sich dort ebenfalls eine Erhöhung des elektrischen Feldes, was dazu führen kann, dass dem abwärtswachsenden Kanal aus der Wolke eine aufsteigende Entladung aus der Turmspitze entgegenwächst. Diese bezeichnet man als Fangentladung.

Bei Abwärtsblitzen aus negativen Wolken konnten wir nur kurze Fangentladungen von wenigen 10 m Länge beobachten. Fig. 5 a veranschaulicht einen solchen Vorgang anhand der Aufnahmen auf bewegtem Film. Der negative Kanal zeigt ein Vorwachsen aus der Wolke in Ruckstufen, die auf dem Bild sichtbar sind. In Punkt A ca. 37 m über der Turmspitze erreicht er den rechten Ast der Fangentladung aus dem Turm, die sich in Punkt B gegabelt hat. Damit kann sich der Blitzkanal gegen Erde entladen, er leuchtet in diesem Moment hell auf. Fig. 5 b zeigt das zugehörige Stromoszillogramm. Die Entwicklung der Fangentladung ist leider im Bilde nicht sichtbar, da es sich dabei um den Aufbau eines positiven Kanales handelt. Wie schon erwähnt, sind die positiven Entladungen viel lichtschwächer als die negativen, sodass man auf dem von der hellen Hauptentladung überstrahlten Film keine sichtbare Schwärzung erwarten kann.

Besonders interessant sind die entsprechenden Vorgänge bei Blitzen aus positiven Wolken, die wir als Fangentladungen grosser Länge interpretieren müssen. Wir sehen bei diesen Blitzen oft, dass der Vorgang mit einer aufwärtswachsenden Entladung beginnt, der dazugehörige positive Strom von einigen hundert Ampères aber nach wenigen Millisekunden in einen kräftigen Stossstrom übergeht. Der Stoss zeigt, dass in der Wolke ein Kanal mit hoher positiver Ladung (bis über 100 C) vorhanden war, der vom aufstrebenden negativ geladenen Kanal erreicht wurde, und der sich dann über diesen nach Erde entladen konnte. Wegen der hohen Ladung des in der Wolke gebildeten Kanales ist die Annahme naheliegend, dass dieser selbst an der Turmspitze

das erforderliche Feld erzeugt hat, um die Aufwärtsentladung auszulösen. Die letztere stellt damit nur die Fangentladung für einen kräftigen Abwärtsblitz dar. Der Treffpunkt der beiden Entladungen liegt im allgemeinen ausserhalb des Bildausschnittes unserer Fotoeinrichtungen. Rechnet man aber mit gleichbleibender Vorwachs geschwindigkeit der Aufwärtsentladung, so ergeben sich Höhen über der Turmspitze bis zu etwa 2 km. Wir stossen so auf die interessante Erscheinung, dass positive Abwärtsblitze sehr lange Fangentladungen haben können. Der niedrigste Treffpunkt liegt mit 500 m über der Turmspitze noch im Ausnahmehereich unserer Kameras. Die Aufnahme auf bewegtem Film, die in Fig. 6a wiedergegeben ist, ist leider stark überstrahlt. Man sieht daher nur den untersten Teil der Aufwärtsentladung und das Aufleuchten der ganzen Blitzbahn beim Zusammentreffen der beiden Kanäle. Das Herunterwachsen des oberen Kanales ist nicht zu erkennen. Aus den nach unten gerichteten Verzweigungen sieht man aber, dass es sich im oberen Teil um eine abwärtswachsende Entladung handeln muss. Fig. 6 b zeigt den dazugehörigen Stromverlauf.

Die langen Fangentladungen erklären eine andere Beobachtung, nämlich die, dass die Stosströme bei positiven Blitzen im allgemeinen wesentlich flachere Fronten aufweisen, als jene negativer Blitze. Wenn die Entladewelle des positiven Blitzkanals dem Messturm über den Kanal einer langen Fangentladung zuläuft, wird ihre Front durch die Dämpfung abgeflacht. Wir haben auch einen positiven Blitzschlag beobachtet, der offenbar ohne Fangentladung die Blitzantenné von der Seite getroffen hat. Der Stosstrom dieses Blitzes zeigt praktisch den gleichen Frontverlauf, wie er bei negativen Abwärtsblitzen auftritt. Fig. 7 zeigt diesen Stromverlauf im Vergleich mit jenem eines normalen negativen Abwärtsblitzes.

In Tabelle II sind einige Daten der kräftigsten positiven Abwärtsblitze der letzten Jahre zusammengestellt. Soweit die vertikale Länge (H) der Fangentladung angegeben ist, liegt auch eine Aufnahme auf bewegtem Film vor. Man sieht, dass im Durchschnitt mit zunehmender Länge der Fangentladung die Stossfront flacher wird.

Es sind zwar 2 Blitze angeführt, von denen wir keine Aufnahmen auf bewegtem Film besitzen (es handelt sich um Blitze bei Tag, die nicht fotografiert werden können), die im Stromoszillogramm keine Fangentladung erkennen lassen und trotzdem eine relative flache Stossfront aufweisen. Wir vermuten, dass bei diesen Blitzen wohl eine Fangentladung aufgetreten ist, aber der Oszillograph erst durch den Stosstrom ausgelöst wurde.

Für die Praxis lassen sich aus den geschilderten Verhältnissen zwei Schlussfolgerungen ziehen:

- 1) Hohe Bauwerke bilden Ansatzpunkte für Fangentladungen, welche Blitze aus positiven Wolken aus einem relativ weiten Umkreis auf sich ziehen können.
- 2) Aus diesem Grunde ist anzunehmen, dass in der Zahl der Blitzschläge per km^2 Flachland die positiven Blitze einen relativ kleineren Anteil ausmachen als bei den Abwärtsblitzen in unsere Messtürme.
- 3) Im flachen Gelände, wo keine Fangentladungen auftreten, müssen die positiven Blitzströme ebensowohl steile Fronten aufweisen, wie sie bei negativen Blitzströmen bekannt sind.

Die Besonderheiten der positiven Wolken sind vor allem deswegen beachtenswert, weil diese sowohl im Durchschnitt als auch in den vorkommenden Maximalwerten wesentlich kräftiger sind als jene aus negativen Wolken. Um dies zu veranschaulichen wurden in Tabelle III für Abwärts- und Aufwärtsblitze beider Polaritäten die mittleren Ladungen aller von 1955...1966 gemessenen Blitzströme zusammengestellt. Bei den im Flachland allein wichtigen Abwärtsblitzen führen die positiven Blitze im Mittel 11 mal mehr Ladung als die negativen. Würde man anstatt der Ladung das $\int i^2 dt$ betrachten, das für den Energieumsatz des Blitzstromes in einem ohmschen Widerstand und für Stromkräfte massgeblich ist, so wäre der Unterschied noch grösser. Die Blitze aus positiven Wolken sind daher von grosser praktischer Bedeutung, auch wenn ihre Häufigkeit relativ gering und die Schwierigkeit ihrer Erforschung umso grösser ist.

Anzahl der oszillografierten Blitzeinschläge, aufgeteilt nach Vorwachsrichtung des Leitblitzes und Stromrichtung, für die Jahre 1964...1966 im Vergleich mit dem Mittel der Jahre 1955...1963.

	1964	1965	1966	Mittel 1964...66	Mittel 1955...63
Ausgewertete Oszillogramme	45	90	133	89,3	35,1
Gleichzeitige Entladungen an beiden Türmen	13	32	25	23,3	7,0
Ausgewertete Entladungen	58	122	158	112,7	42,1
<u>Abwärtsblitze</u>					
total	10	5	13	9,3	11,0
aus negativen Wolken	7	3	7	5,7	9,0
aus positiven Wolken	3	2	6	3,7	2,0
<u>Aufwärtsblitze</u>					
total	48	117	145	103,3	31,1
zu negativen Wolken	38	93	121	84	27
zu positiven Wolken	4	13	16	11	3,1
mit wechselnder Stromrichtung	6	11	8	8,3	1,0

Tabelle II

Auswertung der Fangentladungen bei den stärkeren Abwärtsblitzen aus positiven Wolken.

Oszillogr. No.	T ms	H m	Q C	i kA	$(di/dt)_{max}$ kA/ μ s
6451	0	0	30	32	17
6015	0		45	180	9
6572	0		60	77	4
66113	1,0		120	150	20
6527	3,0	500	12	22	4,5
6572	6,1	1000	62	77	3
6675	7,0		30	110	2
6678	7,0		15	55	5
6232	8,7	1200	65	56	2
6520	11,6	1150	35	27	1
6674	12,7		30	30	0,6
66100	12,7		50	65	2
6016	13,0		70	87	2,4
6422	14	1800	130	106	2
6017	15,5		55	46	1,7
6677	19		80	68	1,1

T Zeit vom Beginn der aufwärtswachsenden Entladung bis zum Einsetzen des Stosstromes

H Vertikale Länge des aufwärtswachsenden Kanales bis zu seinem Zusammentreffen mit dem in den Wolken gebildeten Kanal (mit gleichbleibender Vorwachs geschwindigkeit extrapoliert)

Q Stossladung (während der ersten 2 ms nach Stossbeginn)

i Stosstrom (Scheitelwert)

$(di/dt)_{max}$ Grösste Frontsteilheit (steilste Tangente) des Stosstromes.

Mittlere Ladungsmenge pro Blitz
aus allen von 1955...1963 regi-
strierten Blitzströmen

	- (negat. Wolke)	+ (pos. Wolke)
Abwärtsblitze	11 C	122 C
Aufwärtsblitze	26 C	54 C

Legende zu den Figuren

Fig. 1... 4 Beispiele für den Stromverlauf bei Aufwärtsblitzen mit wechselnder Stromrichtung. Im Oszillogramm von Fig. 3 erfolgt an beiden Messtürmen gleichzeitig je ein Aufwärtsblitz, von denen nur jener am Turm 1 (obere Kurve) die Stromrichtung ändert.

Fig. 5 Abwärtsblitz aus negativer Wolke mit kurzer Fangentladung

- a Aufnahme auf bewegtem Film
(Die Originalaufnahme wird mit Diapositiv gezeigt)
- b Stromverlauf

Fig. 6 Abwärtsblitz aus positiver Wolke mit 500 m langer Fangentladung

- a Aufnahme auf bewegtem Film
(Die Originalaufnahme wird mit Diapositiv gezeigt)
- b Stromverlauf

Fig. 7 Verlauf der Stossfront bei Abwärtsblitzen

- a aus positiver Wolke, ohne Fangentladung
- b aus negativer Wolke

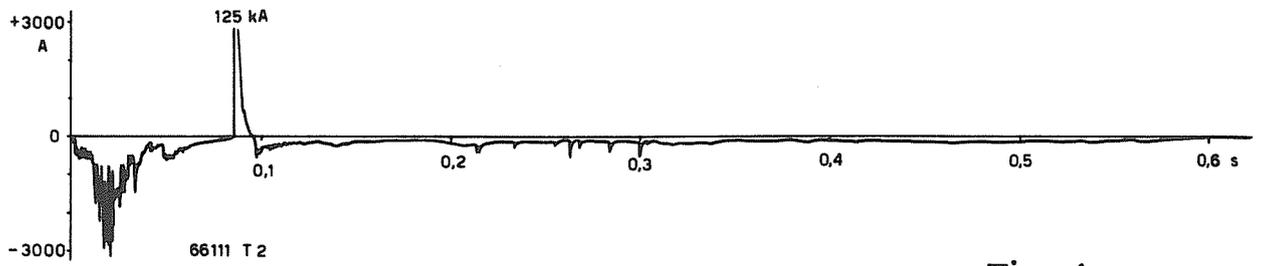


Fig. 1

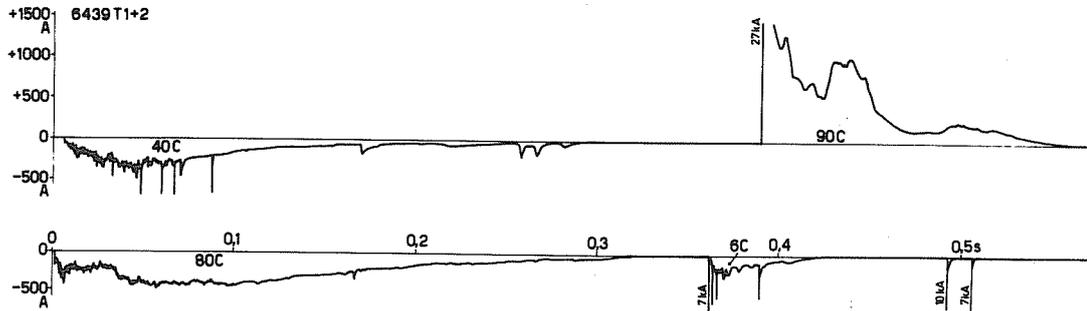


Fig. 2

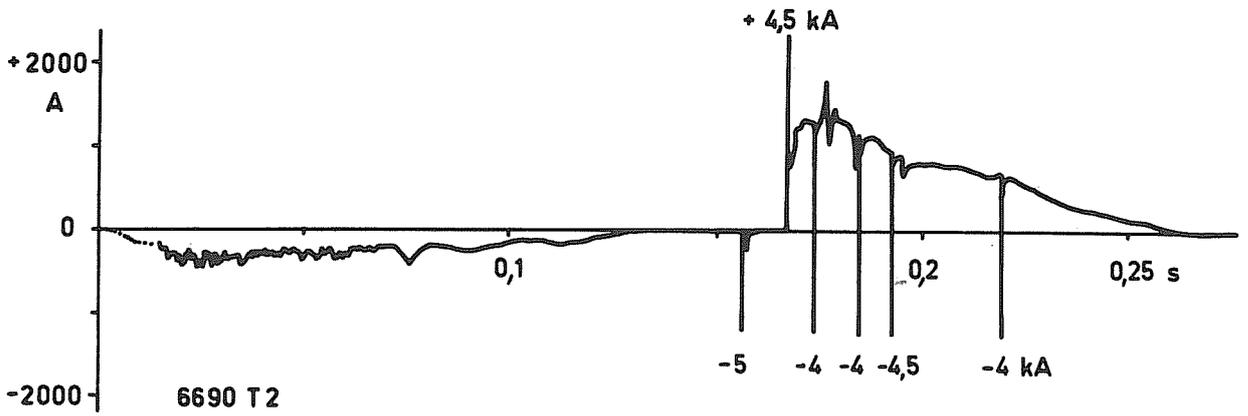


Fig. 3

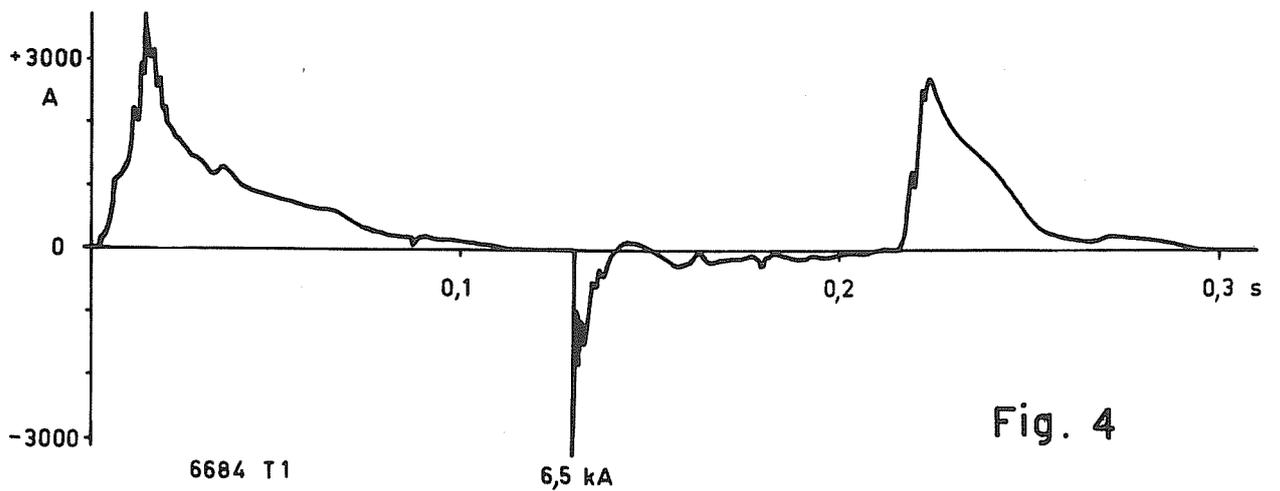


Fig. 4

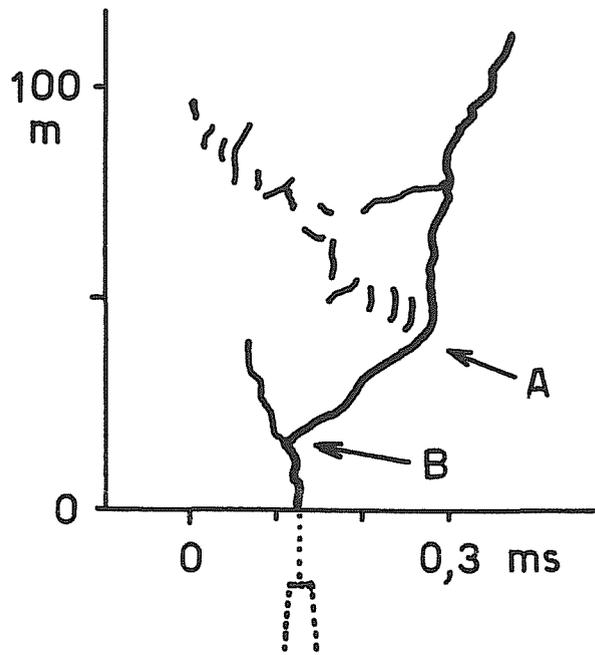
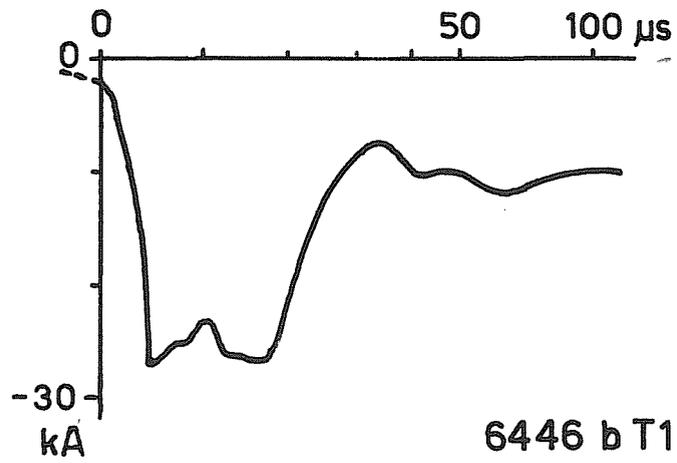


Fig. 5a



6446 b T1

Fig. 5b

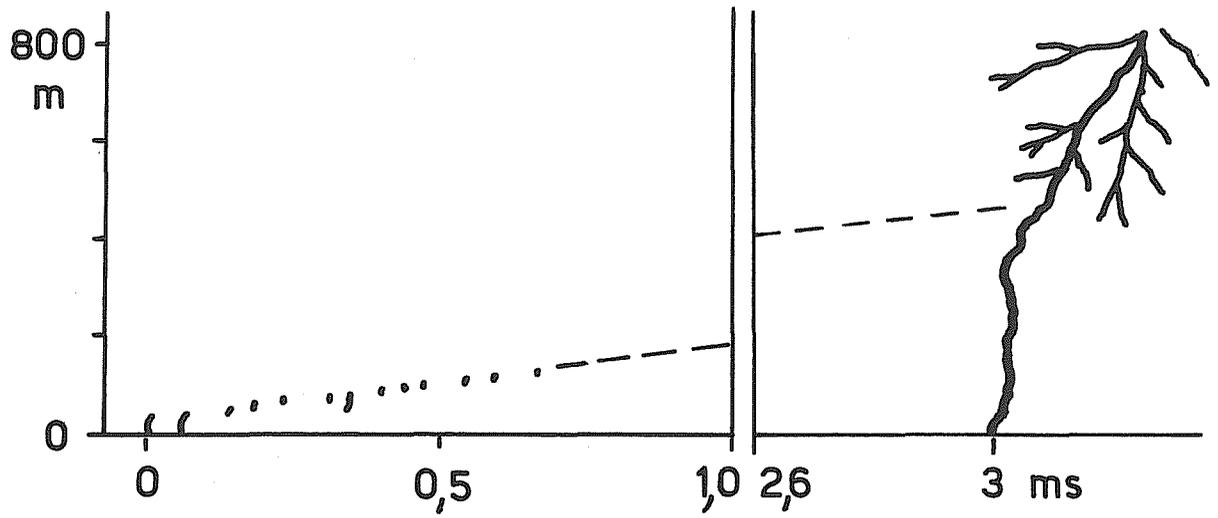


Fig. 6a

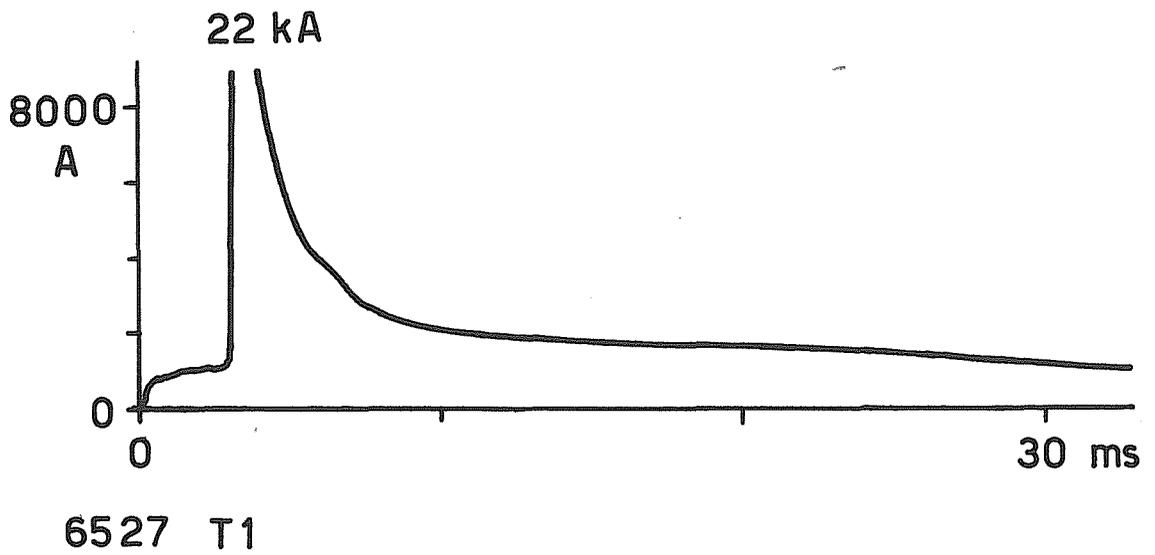


Fig. 6b

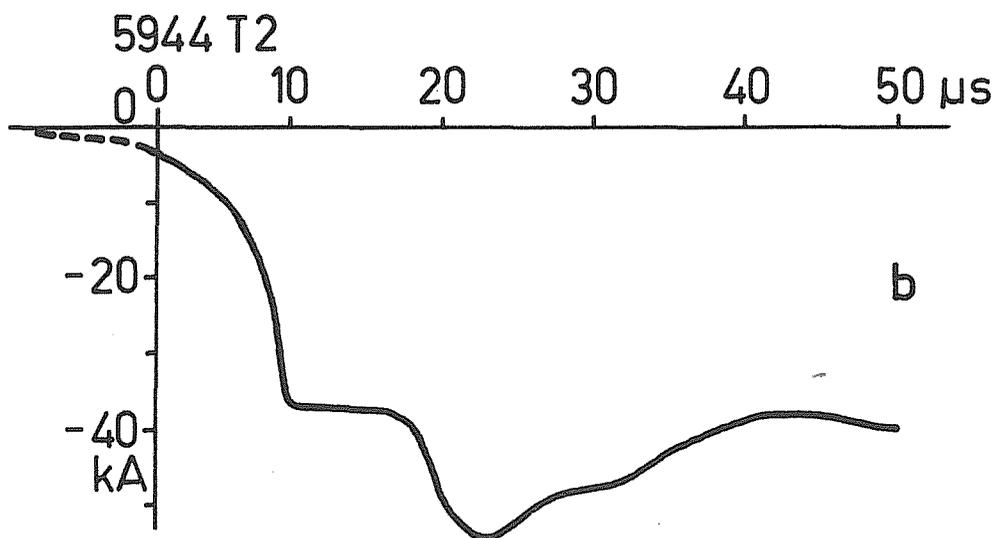
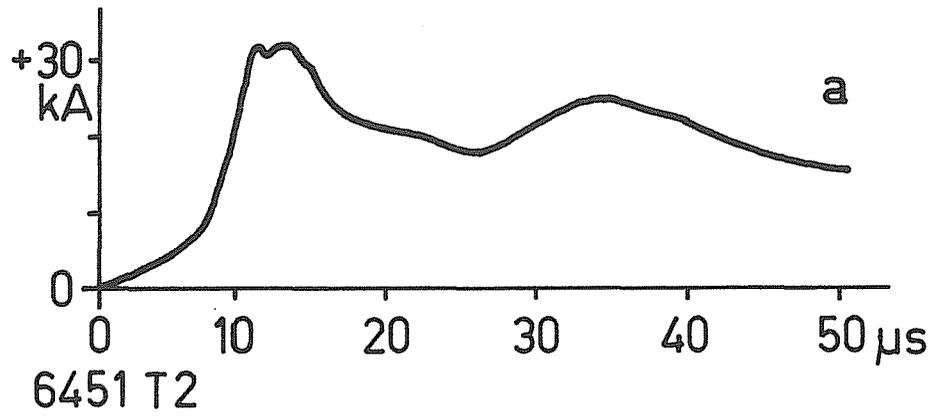


Fig. 7