

FKH - 11/62

Zürich, 2. Oktober 1962.

Frontzeit und Anstiegssteilheit des Blitzstromes bei Erdblitzten.

Beitrag von Prof. Dr. K. Berger
zur Int. Konferenz in Leatherhead/England vom 7.-11. Mai 1962
über "Gas Discharges and the Electricity Supply Industry".

Frontzeit und Anstiegssteilheit des Blitzstromes bei Erdblitzten.

Mai 1962

Zusammenfassung.

Auf Grund der in den Jahren 1958 bis 1961 auf dem Monte San Salvatore bei Lugano durchgeführten Messungen können vier Typen von Blitzströmen unterschieden werden. Der erste Typ entsteht wohl nur auf hohen, steilen Bergen, oder auf sehr hohen Gebäuden oder Türmen, in Verbindung mit einer aufwärts gerichteten Vorentladung ("leader"). Die andern drei Typen kommen sowohl auf Bergspitzen wie auch in der Ebene vor, zwei bei der Entladung negativer Wolken, die dritte bei der Entladung positiver Wolken gegen Erde.

Während es gut bekannt ist, dass ein ausgesprochener Unterschied in der Anzahl der Teilblitze zwischen den beiden Polaritäten besteht, zeigen die vier erwähnten Entladungs-Typen auch ausgesprochene Unterschiede im Stromverlauf, insbesondere in Bezug auf die Frontdauer und Frontsteilheit der Teilblitze. Nur die drei letzten Typen sind gefährlich für die elektrische Energie-Uebertragung. Ausschliesslich Beispiele dieser drei Typen des Stromverlaufs werden in diesem Aufsatz gezeigt und besprochen.

Mess-Ausrüstung:

Die ganze Einrichtung für die Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore ist im SEV-Bulletin 1955¹⁾ beschrieben. Anfang 1958 wurde ein neuer Kathodenstrahl-Oszillograph (KO) installiert, der speziell für die Messung der Blitzströme entwickelt worden war. Die im folgenden gezeigten Beispiele von Blitzstrom-Kurven wurden mit diesem neuen KO aufgenommen. Kurz gesagt, besteht die Messeinrichtung aus zwei 70 m hohen Blitzauffang-Türmen in einer Horizontal-Distanz von ca. 400 m. Turm 1 steht etwa 15 m unterhalb des Berggipfels. Dieser Turm wurde 1958 durch die Generaldirektion der schweizerischen PTT-Verwaltung als Fernseh-Turm errichtet. Er steht an der Stelle des im Bulletin SEV 1955 beschriebenen hölzernen Blitzturmes aus dem Jahre 1943¹⁾

1) Bull. SEV 1955, Nrn. 5 & 9 Berger

Turm 2 steht auf einem etwas tieferen Bergvorsprung, genannt "San Carlo"; er wurde ausschliesslich für die Blitzforschung errichtet.

Der Gipfel des Monte San Salvatore mit einer Höhe von 912 m ragt 640 m über den Seespiegel des Luganersees. Die Spitze vom Turm 1 liegt ca. 695 m, diejenige von Turm 2 ca. 650 m über dem Seespiegel. Die Blitztürme sind durch Polyäthylen-Kabel von 120 und 500 m Länge mit der Mess-Station verbunden, welche in einem alten Gebäude untergebracht ist. Die beiden Kabel sind speziell konstruiert, um eine genügende Abschirmung der Mess-Adern im Moment des Blitzschlages zu gewährleisten. Das Prinzip-Schema der Blitzmesseinrichtung ist aus Fig. 1 ersichtlich.

Zu jedem Turm gehört ein Zweistrahler-KO, der den Spannungsabfall an einem zylindrischen Shunt R_1 von $0,05 \Omega$ in zwei verschiedenen Mass-Stäben aufzeichnet. Die KO-Seite des Messkabels ist durch einen Hochfrequenz-Widerstand reflektionsfrei abgeschlossen, der zugleich als Spannungsteiler für den KO und den Schleifen-Oszillograph (SO) dient.

Die Auslösung beider Oszillographen erfolgt schon bei kleinen Blitzströmen durch das Ansprechen der Funkenstrecke F. Damit beginnt ein Oszillogramm mit langsamer Schreibgeschwindigkeit auf Film oder Papier, das auf einer Trommel mit der Geschwindigkeit 1 m/s rotiert.

Diese mechanische Zeitbasis wird beim KO ergänzt durch eine elektrische Zeitablenkung, die den Kathodenstrahl mit hoher Geschwindigkeit in der gleichen Richtung ablenkt. Es können Ablenkzeiten von 30/100 μs oder 200/1000 μs für Hin- und Rücklauf eingestellt werden. Die Auslösung dieser schnellen Zeitablenkung erfolgt, wenn rasche Stromänderungen von mindestens 1 kA/ μs vorkommen, mit einer Verzögerung von ca. 1 μs . Diese Verzögerung wird seit 1960 durch ein in die Messleitung eingebautes Verzögerungskabel kompensiert. Sobald eine Hin- und Herbewegung des Strahles beendet ist, kann unverzüglich eine neue Auslösung erfolgen. Der Blitzstrom jedes Turmes (T 1 und T 2) wird durch 2 Kathodenstrahlen mit verschiedenen Zeit- und Strom-Masstäben aufgezeichnet.

Während der Jahre 1958 und 1959 wurde ein Strahl mit der hohen Stromempfindlichkeit 50 A/mm verwendet. Seit 1960 sind beide Strahlen mit einer relativ geringen Strom-Empfindlichkeit von ca. 2 und 6 kA/mm im Betrieb. Der kleinere Strom ist mit der schnelleren Zeitablenkung 30/100 μ s, der grössere Strom mit der langsameren Zeitablenkung 200/1000 μ s kombiniert. Auf diese Weise wird versucht, ein Maximum an Information über den Verlauf der Strom-Zeitkurve herauszuholen.

Der neue KO wurde auf Grund unserer Blitzmessungen seit 1943 entwickelt. Er wurde durch die Firma Dr. P.E. Klein, in Tettnang, Württemberg/DL entworfen und gebaut. Die Messgenauigkeit wird durch die Dämpfung in den Polyäthylen-Kabeln und durch die Zeitkonstante ("response-time") des Shuntres R_1 begrenzt. Seit 1943 verwenden wir einen Shunt aus mehreren konzentrischen Konstantan-Röhren (vorher Cumal) mit einer Zeit-Konstante von 50 ns (0,05 μ s). Der heutige Shunt ist für Blitzströme von 200 kA Amplitude und 200 μ s Dauer dimensioniert. Dieser Shunt-Typ wurde in den letzten Jahren durch das Komitee 42 der IEC gutgeheissen.²⁾

Häufigkeit verschiedener Blitzstrom-Oszillogramme auf dem Monte San Salvatore von 1958 - 1961.

Tabelle 1 zeigt, nach Polaritäten geordnet, die Anzahl der von Turm 1 und 2 erhaltenen Oszillogramme. Als negativen oder positiven Blitzschlag bezeichnen wir die Entladung einer negativen oder positiven Wolke nach Erde. Ein zweipoliger Blitzschlag beginnt stets mit einer negativen Entladung gegen Erde, wechselt dann zu einer positiven Entladung und manchmal wieder zurück zu einer negativen.

Tabelle 1

Gewitter-saison	neg. Blitze	pos. Blitze	zweipolige Blitze
1958	7	-	1
1959	54	5	2
1960	33	8	-
1961	18	-	-
1958 bis 1961	112	13	3

2) Dok. 42 (Sekretariat) 7.2.62 IEC, Genf

Blitzstrom-Form

Typ A

Diese Stromform kommt vor, wenn ein Leitblitz ("leader") von der Spitze eines Turmes gegen die geladene Wolke vorwächst. Sie wird nur an sehr hohen Gebäuden (Empire State Building)³⁾ oder auf dem Gipfel hoher, steiler Berge wie dem Monte San Salvatore beobachtet, wo etwa die Hälfte aller Blitzschläge diese Stromform aufweisen, die sich durch einen sehr langsamen Anstieg auszeichnet. Die Stromamplituden liegen zwischen etwa 20 A und einigen 100 A. Die Stromdauer kann einige hundertstel bis einige zehntel Sekunden betragen. Die elektrische Ladung variiert von einigen Coulomb (Cb) bis zu etwa 30 Cb. Die Zusammenstellung vieler Beispiele der Stromform Typ A wurde schon früher publiziert.¹⁾ Der Einfluss solcher Blitzeinschläge auf die Uebertragungs-Leitungen kann allgemein vernachlässigt werden, weshalb diese hier nicht weiter betrachtet werden.

Typ B. Dieser Stromverlauf wird durch einen von einer negativen Wolke nach unten ruckweise vorwachsenden Leitblitz ("stepped leader") eingeleitet, wenn er sich der Erde nähert und die erste Hauptentladung auslöst. Der Vorgang kann auch eine vom Turm ausgehende aufwärtsgerichtete Fang-Entladung ("midgap streamer") einschliessen. Die stufenförmige Vorentladung ist im allgemeinen sehr lichtschrach und daher schwierig zu photographieren. Fig. 2 zeigt einige Beispiele von Stromkurven dieser Art, die in den Gewitterperioden 1959 bis 1961 aufgenommen wurden.

Tab. 2 gibt die aus diesen Oszillogrammen ausgewerteten Werte der Strom-Amplitude, Frontdauer und Frontsteilheit nach IEC-Definitionen, sowie die max. Frontsteilheit $(di/dt)_{\max} = s_{\max}$. Die Stromfront ist stets nach oben konkav, d.h. die grösste Steilheit wird am Ende der Stromfront erreicht, wo ein scharfer Knick in den Rücken der Stromkurve überleitet. Diese Beobachtung wurde bereits in einer früheren Publikation¹⁾ festgehalten, auf Grund von Oszillogrammen, die mit einem Kalt-Kathodenstrahl-Oszillographen aufgenommen wurden. Die stark gekrümmte Front ergibt einen ausgesprochenen Unterschied zwischen der mittleren und der maximalen Steilheit (s_{IEC} und $s_{\max}$).

3) K.B. Mc Eachron, Journal Franklin Inst. Vol. 227, No.2, Febr. 1939

Fig. 3 wurde aufgezeichnet, um zu untersuchen, ob zwischen Strom-Amplitude und Anstiegs-Steilheit bei diesem Strom-Typ eine Beziehung besteht. Eine geringfügige Tendenz ^{zu} zunehmender mittlerer Steilheit (s_{IEC}) von etwa 5 auf etwa 8 kA/ μ s ist bei steigenden Stromamplituden (im Bereich der aufgetretenen Ströme von 15 ... 75 kA feststellbar. Zwischen der maximalen Steilheit (s_{max}) und der Stromamplitude besteht dagegen kein Zusammenhang. Die maximale Steilheit liegt immer zwischen 10 und 30 kA/ μ s. Dieser Aufsatz befasst sich nicht mit dem äusserst interessanten Problem der Blitzbildung, zu dessen Aufklärung die obigen Beobachtungen eventuell beitragen können.⁴⁾

Typ C. Dieser Stromverlauf wird durch die dem ersten Teilblitz nachfolgenden Teilblitze aus negativen Wolken verursacht. Die Folgeblitze werden stets durch einen abwärts gerichteten kontinuierlichen Leitblitz ("dart leader") eingeleitet, der mit einer viel höheren Geschwindigkeit vorwächst als der erste stufenförmige Leitblitz ("stepped leader"), sofern dieser überhaupt zu erkennen ist.

Fig. 4 zeigt einige Beispiele des Stromverlaufs vom Typ C. In Tabelle 3 sind die aus diesen Beispielen ausgewerteten Werte von Amplitude, Frontzeit und Frontsteilheit zusammengestellt. Im grossen Ganzen bestätigen die zwischen 1958 bis 1961 aufgenommenen Oszillogramme die schon früher gemachte Feststellung, dass die Folgeblitze eine wesentlich kürzere Frontdauer aufweisen als die erste Entladung. Die Stromkurve der Folge-Entladungen ist erstaunlich regelmässig in der Front und im Rücken; sie enthält keine überlagerten Schwingungen oder andere Unregelmässigkeiten, gleichgültig, ob die erste Entladung vom Typ A oder B war. Die Front der Folgeentladung kann nur unter Verwendung eines Verzögerungs-Kabels aufgezeichnet werden. Wenn keine Verzögerungs-Kabel verwendet wurden, wie in den Jahren 1958 und 1959, war die Front der Stromkurve auf dem Oszillogramm nicht sichtbar. Nachdem 1960 ein Verzögerungskabel mit 1,75 μ s Verzögerungszeit in die Mess-Kanäle eingebaut wurde, konnte festgestellt werden, dass die Auslöse-Verzögerung des Oszillographen etwa 1,1 μ s beträgt. Erst von diesem Zeitpunkt an konnten die Frontdauer T_F und die Steilheit s der Folge-Teilblitze gemessen werden. Die für 1959 in Tabelle 3 eingetragenen Werte sind daher ^{Maximal- bzw. Minimalwert}

4) C.F. Wagner and A.R. Hileman: The Lightning Stroke I and II. Papers 58-24 and 61-488, AIEE Trans. 1958-1961.

Die Front-Dauer der Oszillogramme liegt immer bei ungefähr einer μs oder tiefer, unabhängig von der Strom-Amplitude. Die Mess- und Verzögerungs-Kabel haben bis zu Frequenzen von 15 MHz eine nur unbedeutende Dämpfung. Wir können daher schliessen, dass die Frontdauer der Strom-Kurven vom Typ C im allgemeinen weniger als 1 μs beträgt.

Der Verlauf der Stromkurve entspricht angenähert demjenigen des IEC-Impulses. Der Unterschied zwischen mittlerer Steilheit nach IEC und der maximalen Steilheit ist beim Typ C unbedeutend und viel kleiner als bei den Stromkurven vom Typ B. Der Zeitmasstab der Oszillogramme gestattet keine exakte Auswertung der maximalen Steilheiten. Diese dürften etwa 50...100 % höher liegen als die in Tabelle 3 angegebenen Mittelwerte nach IEC-Auswertung. Ein Vergleich der Steilheiten von Tab. 3 mit denjenigen von Tabelle 2 zeigt, dass die nach IEC ausgewerteten Steilheiten des ersten Teilblitzes (Typ B) immer kleiner sind als diejenigen der Folge-Teilblitze (Typ C), ungeachtet der grösseren Strom-Amplituden in den ersten Teilblitzen. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die s_{max} - Werte von Tabelle 2 nicht wesentlich von den Werten in Tabelle 3. Dies bedeutet, dass die Steilheit am Ende der konkaven Front des ersten Teilblitzes ungefähr gleich ist, wie die mittlere Steilheit der Folgeblitze. Betrachtet man an Stelle der Steilheit die Front-Dauer, so liegt die nach IEC definierte Frontdauer für die Folge-Teilblitze (Typ C) bei einer Mikrosekunde oder weniger.

Typ D

Dieser Stromverlauf tritt bei der Entladung positiver Wolken gegen Erde auf. Im Gegensatz zu den negativen Wolken entladen sich die positiven Wolken mit ganz wenigen Ausnahmen in einer einzigen Entladung. Fig. 5 zeigt einige Beispiele des Stromverlaufs positiver Einschläge, d.h. der Entladung positiv geladener Wolken. Die Auswertung der die Stromkurve charakterisierenden Daten ist in Tabelle 4 angegeben. Aus dieser Tabelle ist leicht ersichtlich, dass die Stromkurve stark von derjenigen der Typen B und C abweicht. Die Frontdauer ist viel länger und der konkave Verlauf der Front, der für Typ B charakteristisch ist, kann hier nicht allgemein festgestellt werden.

Die in der einzigen, ungeteilten Entladung des positiven Blitzes abfliessende Ladung ist im allgemeinen grösser als die Summe der Ladungen aller Teilblitze vom Typ B und C eines negativen Gesamt- blitzes. Ladungen von mehr als 100 Cb sind hier keine Seltenheit. Die Dauer der positiven Entladungen beträgt im allgemeinen eine oder einige hunderstel Sekunden, ohne Unterbruch. Die Strom-Amplituden erreichen mehrere Kiloampère, aber selten mehr als 30 kA¹⁾. Etwa alle 5 ... 10 Jahre werden auf dem Monte San Salvatore ausnahmsweise schwere Entladungen vom Typ D beobachtet. Anfänglich wurde durch solche Strom-Giganten jeweils der Mess-Shunt R_2 (Fig. 1) zerstört. Die letzte Beobachtung dieser Art datiert vom Jahre 1960, wo der Blitzschlag No. 15 von Fig. 5 eine mechanische und thermische Ueberlastung des Shuntes R_2 (1 Ω , 25 kg Konstantan) verursachte. Seither wurde in einem neuen 0,75 Ω - Shunt die thermische Belastbarkeit verdreifacht und die mechanische Festigkeit sogar in noch stärkerer Masse erhöht. Für die drei "Giganten" Nr. 15 ... 17 in Fig. 5 beträgt das $\int i^2 dt$ ca. $2 \dots 4 \cdot 10^6 \cdot 10^6$ s⁶. Dies ist ein Mehrfaches des stärksten negativen Einschlages vom Typ B und C, der seit 1945 auf dem Monte San Salvatore gemessen wurde.

Es ist nicht Aufgabe dieses Aufsatzes, die Gründe für die Heftigkeit der positiven Entladungen zu untersuchen. Es ist wohl möglich, dass die gleiche Ursache, die der Entstehung mehrerer Teilblitze aus negativen Wolken zugrunde liegt, auch die Erklärung für eine ununterbrochene, einzige Entladung der positiven Wolke nach Erde ergibt.

Diskussion des Blitzschutzes im Zusammenhang mit den oben angeführten Typen des Stromverlaufs.

Drei Aspekte von primärer Bedeutung für den Blitzschutz seien im Folgenden angeführt:

- a) Ohmscher Spannungsabfall, der durch die Blitzströme, insbesondere in den Erdungen verursacht wird.
- b) induktive Spannungabfälle in den, den Blitzstrom führenden Leitern, oder induzierte Spannungen in benachbarten Leitern.

c) Querschnitte oder Dimensionen der den Blitzstrom führenden Leiter.

zu Punkt a): Der Strom-Verlauf von Typ D wird die stärksten Ohmschen Spannungsabfälle verursachen. Der Erdungswiderstand von Mast- und Stations-Erdungen kann aus oekonomischen Gründen nicht immer so tief gehalten werden, dass bei hohen Blitzströmen keine Rücküberschläge auftreten. Im Gegensatz dazu ist der Ohmsche Spannungsabfall an den blitzstromführenden metallischen Leiter im allgemeinen unbedeutend, wenn diese Leiter thermisch und mechanisch genügend dimensioniert sind. (Punkt c).

zu Punkt b): Der induktive Spannungsabfall ist von grösster Bedeutung, wenn Ueberschläge von einem blitzstromführenden Leiter zu einem andern leitenden Objekt vermieden werden sollen. Ein Draht mit einer Induktivität von ca. $1,5 \mu\text{H/m}$ ergibt einen Spannungsabfall von ca.

	15 kV/m bzw. 45 kV/m
bei einer Stromänderung von	10 kA/ μs " 30 kA/ μs

Gegen einen isolierten parallelen Draht kann diese Spannung auftreten, wenn dessen eines Ende mit dem den Blitzstrom führenden Leiter verbunden ist.

Einige nationale Blitzschutzregeln verlangen daher eine minimale Distanz von ca. $1/10$ der Länge des parallelen Leiters, um Ueberschläge zwischen den beiden zu vermeiden. Wenn der parallele Leiter nicht mit dem blitzstromführenden verbunden ist, beträgt die Spannungsbeanspruchung zwischen den beiden etwa die Hälfte des obigen Wertes. Es folgt aus dieser einfachen und groben Annäherung, dass ein Blitzeinschlag vom Typ B oder C in die Spannweite des Erdseiles einer Uebertragungs-Leitung Ueberschläge an den zunächst liegenden Mastisolatoren verursachen kann. Z.B. wird ein Einschlag in die Mitte einer 300 m betragenden Spannweite an den zunächst gelegenen Isolatoren die folgenden Spannungen verursachen:

$150 \text{ m} \cdot 1/2 \cdot 15 \text{ kV/m} \cdot 1/2 = 560 \text{ kV}$ bei 10 kA/ μs Stromanstieg, oder

$150 \text{ m} \cdot 1/2 \cdot 45 \text{ kV/m} \cdot 1/2 = 1700 \text{ kV}$ bei 30 kA/ μs Stromanstieg.

Als weiteres Beispiel kann geschlossen werden, dass in armierten Gebäuden, wo eine grosse Anzahl vertikaler Eisenstäbe zur Ableitung des Blitzstromes zur Verfügung stehen, keine Gefahr von Ueberschlägen auf leitende Objekte im Innern des Gebäudes besteht. Das Gitter von dicht verlegten Eisen-Stäben wirkt wie ein fast vollständiger Faraday-Käfig gegen die steilsten Stromanstiege der Typen B und C.

zu Punkt c): Ein Strom-Gigant vom Typ D mit einem $i^2 dt = (4...6) \cdot 10^6 A^2 s$ wird durch einen Kupfer-Draht von 10 mm² Querschnitt oder einen Stahldraht von 30 mm² Querschnitt geführt, ohne dessen Schmelzung zu verursachen. Die Erfahrung des Gebäude-Blitzschutzes zeigt, dass ein Leiter dieser Dimensionen sehr selten beschädigt wird, und dass, wenn ein Schaden auftritt, dieser an Verbindungs-Stellen oder am Einschlags-Punkt des Blitzes entsteht, dass aber nicht die ganze Länge des Leiters selbst in Mitleidenschaft gezogen wird.

Würden wir von unseren Blitzresultaten nur die häufigeren Strom-Typen B und C in Betracht ziehen, so könnten wir die schlimmsten Blitzschäden niemals verstehen und erklären. Sobald wir aber auch die Ströme vom Typ D berücksichtigen, so können wir dies wohl. Der Blitz ist ein meteorologisches Phänomen, das zeitlich und räumlich einer sehr grossen Streuung unterliegt. Nur durch Beobachtungen, die sich über eine lange Zeit erstrecken, können wir hoffen, in eines der schönsten Wunder der Natur einzudringen.

Tabelle 2 : Typ B

Entladung No ¹⁾	Turm	$i_{\max}$ ²⁾ kA	T_F (IEC) 3) μs	s_{IEC} 3) kA/ μs	$s_{\max}$ kA/ μs
590728/30 -1	T ₁	-33	4	8,1	24
590728/32 -1	T ₁	-74	9,6	7,7	21
590728/33 -1	T ₁	-49	7	7,0	15
590728/36 -1	T ₂	-45	5,6	8,0	28
590728/40 -1	T ₁	-33	7,2	4,5	16
590728/40 -1	T ₂	-15	4	3,8	21
590728/42 -1	T ₁	-52	11,6	4,5	25
590729/44 -1	T ₁	-38	6,8	5,5	18
590729/45 -1	T ₁	-47	5,4	8,7	20
610622/18 -1	T ₂	-22	3,4	6,5	17
610627/23 -1	T ₂	-44	10,2	4,3	11

Bemerkungen:

- 1) Die "Entladungsnummer" ist wie folgt zusammengesetzt:
 - a) Zwei Ziffern für das Jahr, z.B. 59 für 1959,
 - b) Zwei Ziffern für den Monat z.B. 07 für Juli
 - c) Zwei Ziffern für den Tag, z.B. 26 für den 26.
 - d) Oszillogramm-Nummer und Teil-Blitz,
z.B. 18 - 1 für den ersten Teil-Blitz auf Oszillogramm 18
 - e) T₁ oder T₂ für Blitzauffang-Türme 1 oder 2.
- 2) Der Scheitelwert $i_{\max}$ wurde an der ersten Spitze gemessen, wo die Front meist mit einem scharfen Knick in den Rücken übergeht, der am Anfang einen mehr oder weniger konstanten Stromverlauf aufweist. Langsame Stromanstiege nach 10 oder 15 μs wurden nicht berücksichtigt. Deshalb ist der Wert $i_{\max}$ nicht in allen Fällen mit dem wirklichen Strom-Maximum identisch.
- 3) Frontdauer T_F und Steilheit s_{IEC} werden durch eine gerade Linie definiert, die durch die Punkte der Stromkurve mit 10% und 90% $i_{\max}$ gezogen wird. Wenn das Oszillogramm erst oberhalb 10% $i_{\max}$ beginnt, wurde der Front-Verlauf bis auf 10% $i_{\max}$ hinunter extrapoliert.

3) T_F Frontdauer entsprechend IEC-Definition

s_{IEC} Steilheit entsprechend IEC-Definition

d.h. $i_{max} : T_F$

s_{max} Maximale Steilheit zwischen 2 Punkten von 0,1 i_{max} Abstand

Tabelle 3 : Typ C

Entladung No. ¹⁾	Turm	i_{max} kA	$T_F(IEC)$ μs	IEC kA/ μs
590728 / 33-2	T_1	- 30	1,1	27 ³⁾
590728 / 33-4	T_1	- 25	1,1	22 ³⁾
590728 / 33-6	T_1	- 17	1,1	15 ³⁾
590728 / 33-7	T_1	- 35	1,1	31 ³⁾
590728 / 33-8	T_1	- 18	1,1	16 ³⁾
590728 / 33-9	T_1	- 28	1,1	25 ³⁾
590728 / 40-3	T_1	- 20	1,1	18 ³⁾
590728 / 40-5	T_1	- 28	1,1	25 ³⁾
590728 / 40-6	T_1	- 15	1,1	13 ³⁾
590729 / 44-2	T_1	- 12	1,1	11 ³⁾
590729 / 45-3	T_1	- 14	1,1	13 ³⁾
590729 / 45-4	T_1	- 23	1,1	21 ³⁾
600812 / 19-2	T_2	- 11	1	11 ³⁾
600904 / 26-2	T_2	- 8	0,6	13
610515 / 5-2	T_1	- 10	0,8	12,5
610609 / 9-2	T_2	- 11	0,7	15
610609 / 9-3	T_2	- 6	ca. 0,3 ²⁾	20 ²⁾
610609 / 10-2	T_2	- 9	1	9
610812 / 25-2	T_2	- 9	1,3	7,3

Bemerkungen:

- 1) Die letzten Ziffern geben die Nummer des Teilblitzes (2...9) innerhalb des Gesamtblitzes an.
- 2) Diese Werte von T_F und s sind unsicher wegen der erhöhten Auslöseverzögerung bei der kleinen Stromamplitude von 6 kA.
- 3) In den Jahren 1958 und 1959 wurde ohne Verzögerungskabel gemessen. Für die Messungen ab 1960 wurde ein Verzögerungskabel mit einer Laufzeit von $1,75 \mu s$ eingebaut. Damit konnte festgestellt werden, dass die Auslösezeit der Zeitablenkung kleiner als $1,1 \mu s$ war. Für die Messungen von 1959 konnten somit nur Maximal-Werte für T_F , bzw. Minimalwerte für s angegeben werden.

T_F)
 s_{IEC}) siehe Tabelle 2

Tabelle 4 : Typ D

Entladung No. 1)	Turm	i_{max} kA	T_F IEC μs	s_{IEC} kA/ μs	s_{max} kA/ μs
600812/15 1)	T_2	+ <u>180</u>	36	5,0	9
600812/16	T_2	+ 82	90	0,9	2,2
600812/17	T_2	+ 42	71	0,59	1,8
590715/25 2)	T_1	+ 41	20	2,05	4,1

Bemerkungen: Die Auslösung der schnellen Zeitablenkung erfolgt durch die Stromänderung (di/dt). Daher wird der Anfang der Stromkurve nicht aufgezeichnet, wenn er sehr flach ist ($1 \text{ kA}/\mu s$ oder weniger), was bei den positiven Entladungen meistens der Fall ist.

Bemerkungen:

- 1) Dieser "Riesen-Blitz" verursachte einen Ueberschlag am Shunt R_2 , der durch das Zeichen ∇ in der Stromkurve angegeben ist.
- 2) Dieser positive Teil-Blitz gehört zu einer zweipoligen Entladung mit negativer, positiver und wieder negativer Komponente.
- 3) T_F)
 s_{IEC}) siehe Tabelle 2
 s_{max})

Legende zu den Figuren

- Fig. 1 Prinzipschema der Mess-Einrichtung für Blitzströme.
 T_1 und T_2 Blitzauffang-Türme
 N isolierte Blitznadel
 F Funkenstrecke zur Auslösung der Oszillographen.
 Kleine Korona-Ströme (Elms-Feuer) bringen die Funken-Strecke nicht zum Ansprechen und werden durch empfindliche Registrier-Instrumente dauernd aufgezeichnet.
 R_2 Shunt mit $0,75 \Omega$ zur Messung der kleineren, langsam veränderlichen Blitzströme.
 R_1 zylindrischer Shunt von $0,05 \Omega$ zur Messung der Stoss-Ströme.
 KO Kathodenstrahloszillograph
 SO Schleifen-Oszillograph
- Fig. 2 Stromverlauf Typ B, Beispiele von 1959 - 1961.
 Erster Teilblitz mit abwärts gerichteter Vorentladung, von negativen Wolken zur Erde.
- Fig. 3 Beziehung zwischen der Frontsteilheit s und der Stromamplitude i_{max}
 ($x=s_{IEC}$, $o=s_{max}$) siehe Tabelle 1

Fig. 4 Strom-Verlauf Typ C, Beispiele von 1959 - 1961.
Folge-Teilblitze von negativen Wolken zur Erde.

Fig. 5 Strom-Verlauf Typ D, Beispiele von 1959 -1961
Entladungen von positiven Wolken zur Erde.

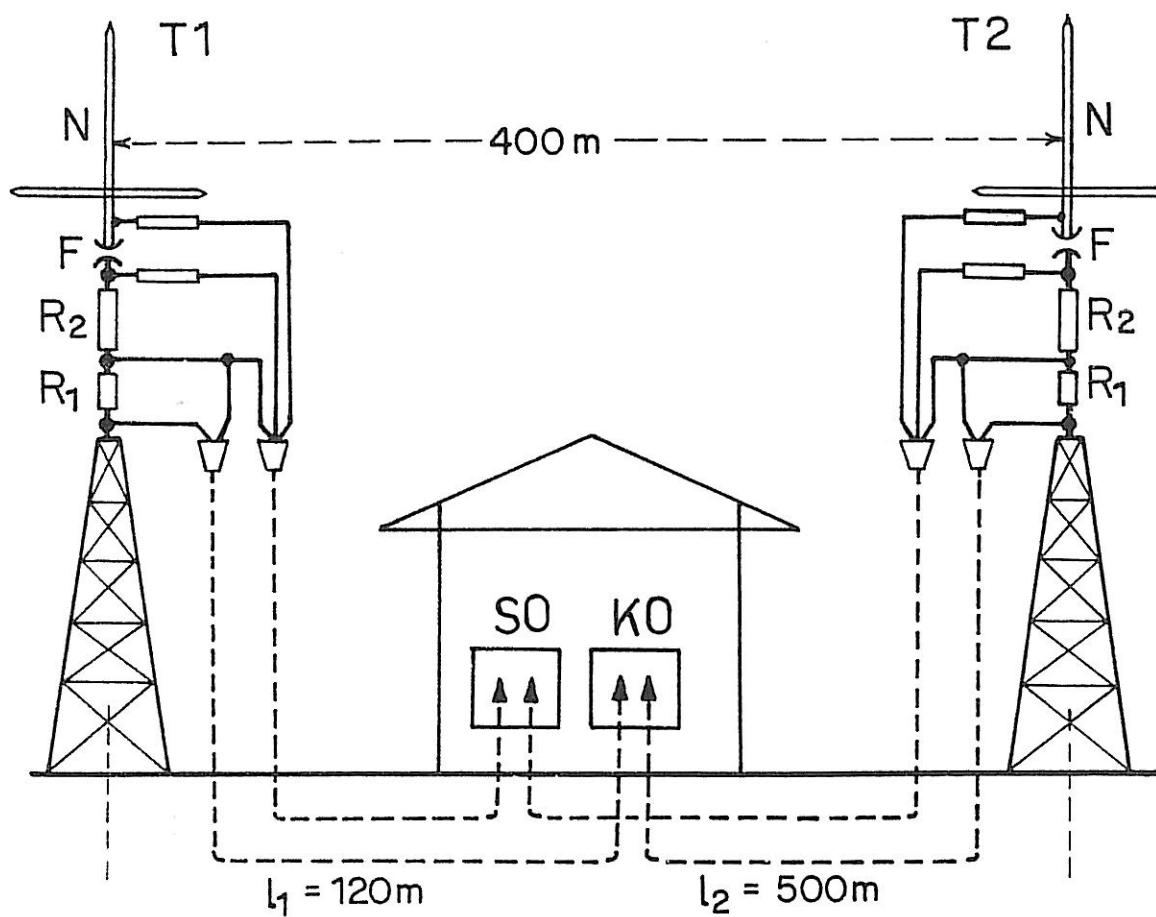


Fig.1

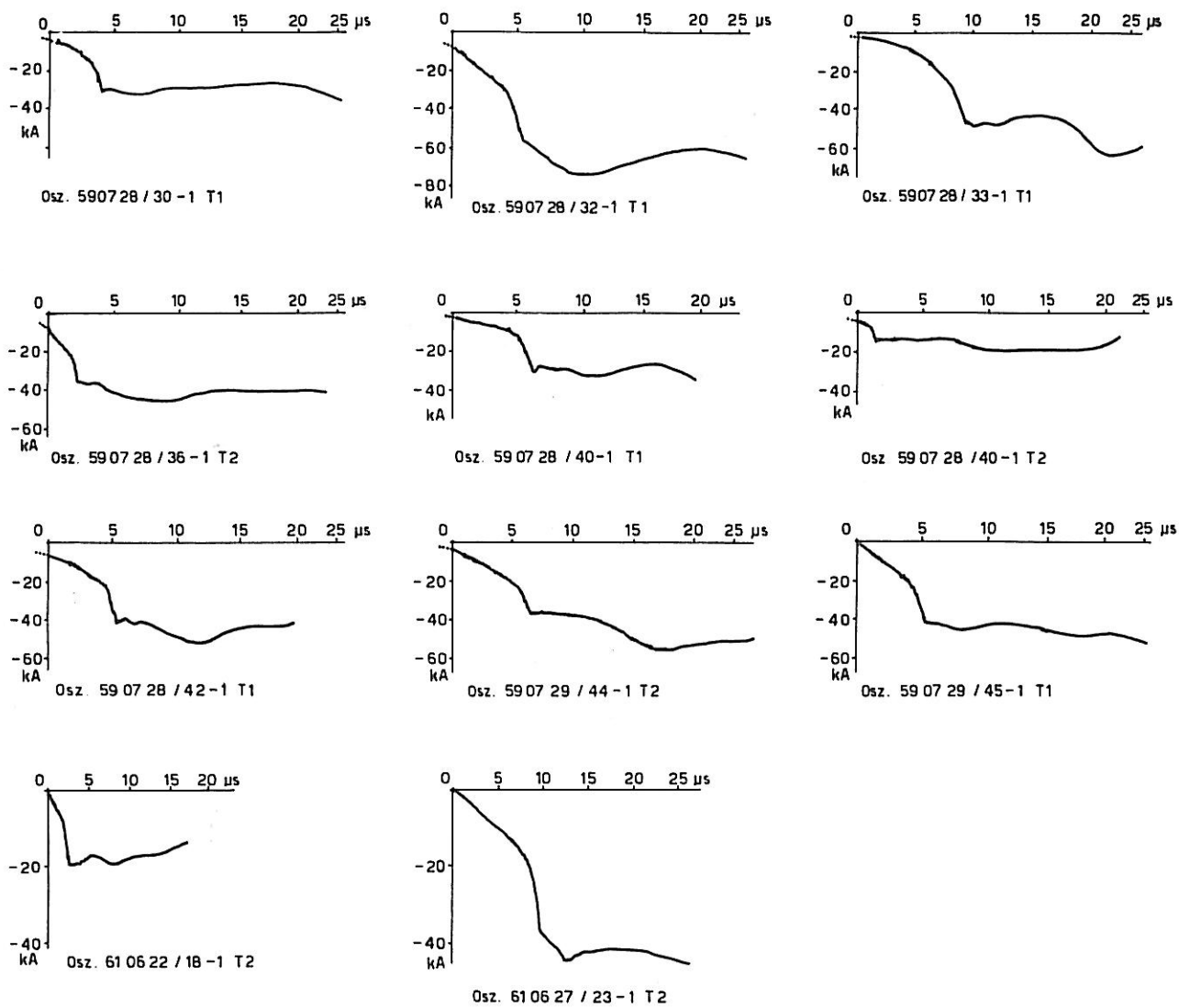


Fig. 2

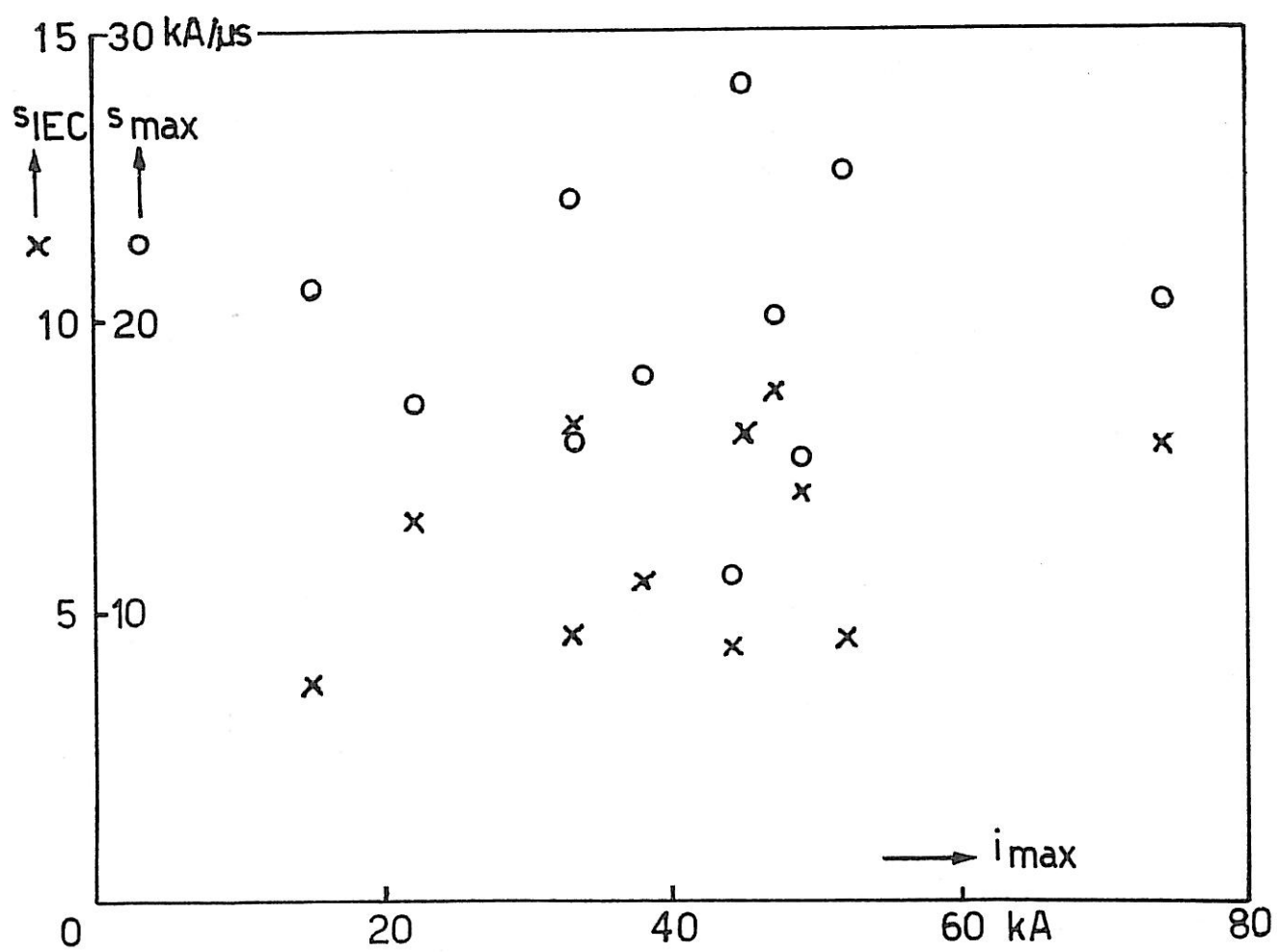


Fig. 3

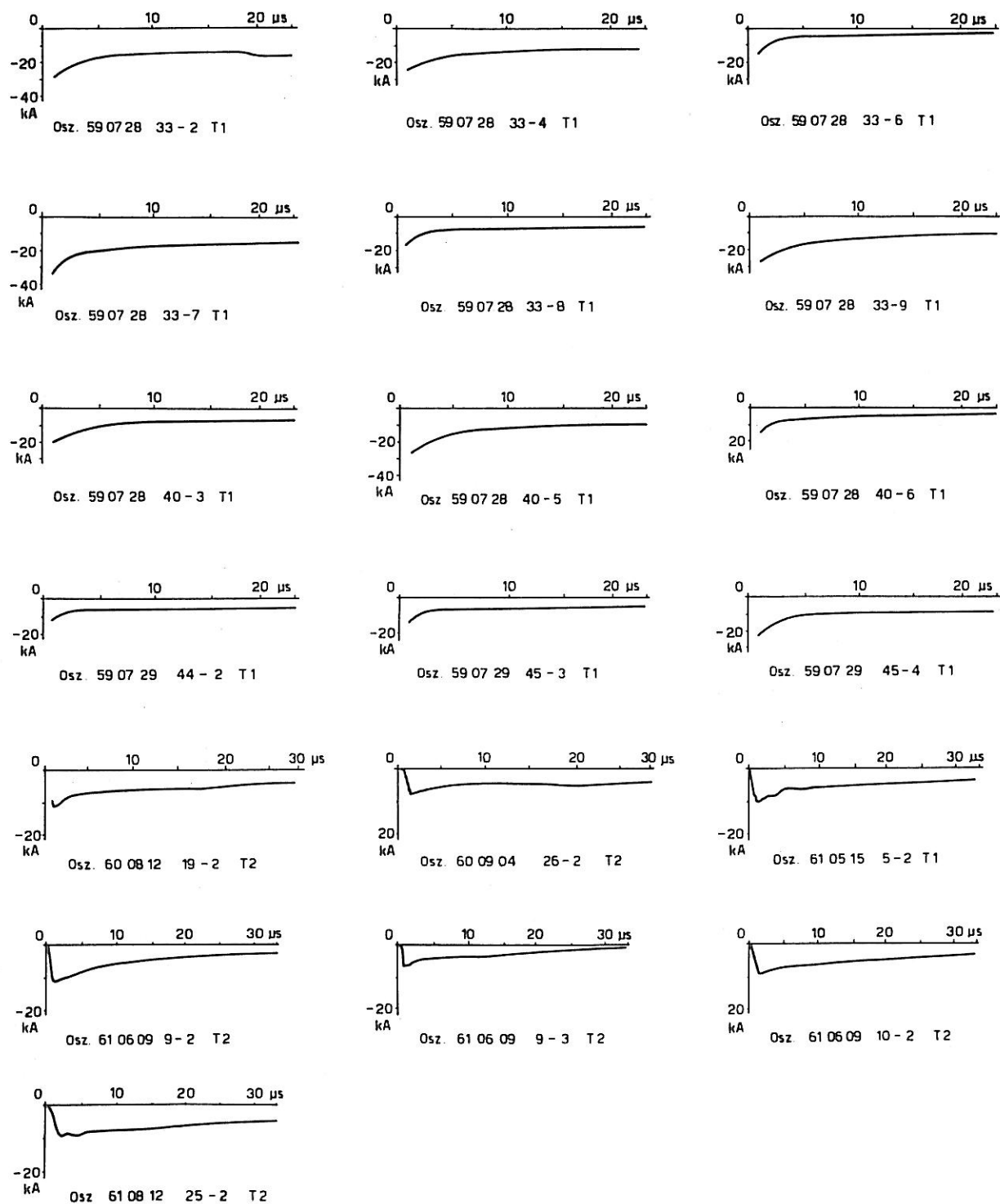
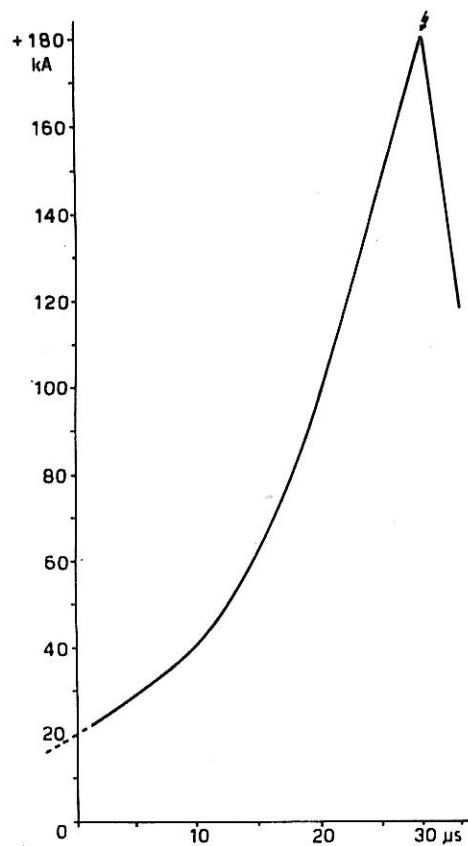
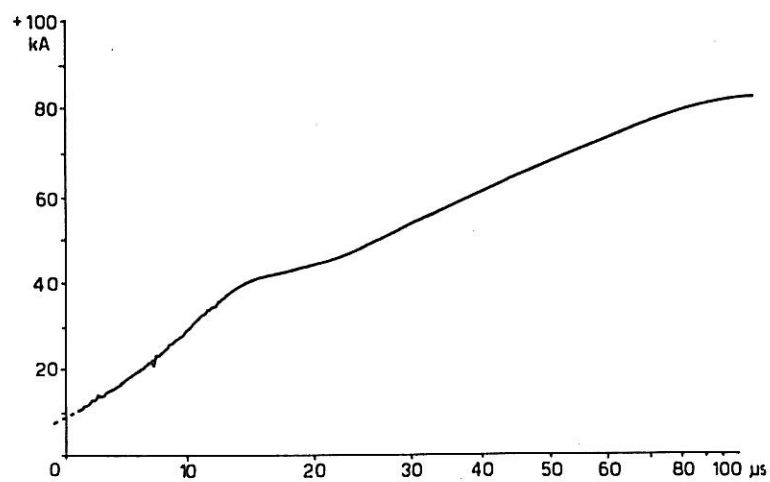


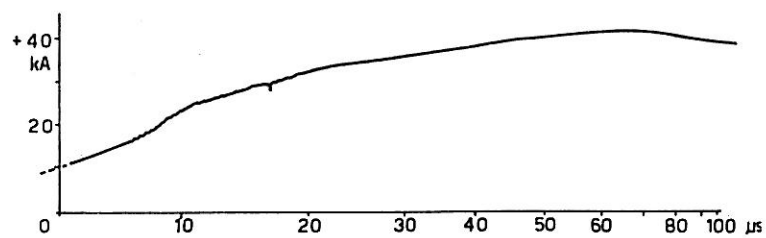
Fig. 4



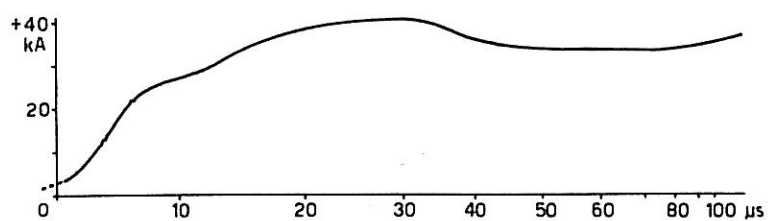
Osz. 60 08 12 / 15 T2



Osz. 60 08 12 / 16 T2



Osz. 60 08 12 / 17 T2



Osz. 59 07 15 / 25 T1

Fig. 5