

Verwendung der Feldmühle zur Erforschung des Blitzes

August 1967

K. Berger

(Einführungsbericht zur Besichtigung vom 26. Sept. 1967)

Die elektrischen und optischen Beobachtungen des Blitzes auf dem San Salvatore lassen es wünschenswert erscheinen, auch das elektrische Feld am Turm oder in der Nähe des Turms vor, während und nach einem Blitzeinschlag in den Turm aufzuzeichnen. Dieser Wunsch gründet sich in erster Linie auf die Frage der Entstehung von Aufwärtsblitzen an den Türmen. Wie kann die elektrische Feldstärke E über und am Turm so hohe Werte erreichen, dass es zur Bildung von Aufwärtsblitzen kommt, und wie hoch sind diese Feldstärken?

1. Welches sind zunächst die Anforderungen, die an eine Registrierung des Feldverlaufs in der Nähe des Blitzeinschlags zu stellen sind? Es sind vor allem die folgenden:

- a) Die Einrichtung muss erlauben, sehr langsam veränderliche und sogar während langer Zeit konstante Feldstärken grössenrichtig aufzuzeichnen.
- b) Die zeitliche Auflösung des Feldstärke-Verlaufs soll erlauben, Änderungen der Feldstärke in 1 ms aufzuzeichnen. Diese Forderung resultiert aus der Betrachtung des Feldstärke-Anstiegs bei der Annäherung des Blitzkopfes an den Messturm. In 1 ms wächst der Leitblitz um ca. 100...1000 m (Bull. SEV 1966, Nr. 13, Tab. I).
- c) Der zeitliche Verlauf der Feldstärke soll bereits ca. 1 sec. vor dem Blitzeinschlag in den Turm aufgezeichnet werden, um die Entstehung des Blitzes besser zu verstehen. Da die Auslösung zur Aufzeichnung der Oszillogramme vom Blitzeinschlag selber erfolgt, heisst dies, dass der Feldstärke-Verlauf auf

einem umlaufenden, geschlossenen Magnetband gespeichert werden muss, das einige sec. speichert und dann wieder löscht.

- d) Aus der Registrierung muss auch die Richtung bzw. Polarität der Feldstärke ersichtlich sein.
- e) Die örtliche Lage des Feldmesspunktes soll möglichst derart gewählt werden, dass aus dem gemessenen E-Verlauf auch der Verlauf in andern Punkten in der Nähe des Turmes oder über dem Turm geschlossen werden kann.
- f) Die Einrichtung soll gegen Störungen im Moment des Blitzeinschlags unempfindlich sein; dies gilt auch für die Uebertragung vom E-Messgerät bis zum Oszillographen.

Die gesamten Forderungen lassen sich grundsätzlich mit zwei Methoden erfüllen: einmal mit einer hochisolierten elektrischen Antenne, andererseits mit der sogenannten Feldmühle (in der Literatur auch Influenzvoltmeter, Rotationsvoltmeter, Generating Voltmeter genannt).

Mit Rücksicht auf die Punkte a) und f) wurde einer Feldmühle mit hohem zeitlichem Auflösungsvermögen der Vorzug gegeben. Ein entsprechendes Instrument wurde im Hochspannungslabor der ETH entwickelt und im Frühling 1967 auf dem Turm 1 des San Salvatore eingebaut. Sie werden es dort sehen.

2. Beschreibung und Arbeitsweise der "Feldmühle"

Die Feldmühle besteht im Prinzip aus einer isolierten Elektrode, die wechselweise dem luftelektrischen Feld ausgesetzt und dann wieder von diesem abgeschirmt wird. Die Spannung der isolierten Elektrode gegen Erde oder der von der Elektrode über einen hochohmigen Widerstand nach Erde abfliessende Wechselstrom wird gemessen. Spannung oder Strom bilden ein Mass für das luftelektrische Feld E, dem die isolierte Elektrode ausgesetzt wird, Figur 1.

Die für den San Salvatore ausgeführte Feldmühle besitzt 24 Segmente, bzw. 24 Ausschnitte. Mit einer Umdrehungszahl von 3000/min oder 50/s ergeben sich $50 \times 24 = 1200$ Per/s der entstehenden Influenzspannung bzw. des abgeleiteten Verschie-

bungsstroms. Das heisst, dass jede 0,83 ms die Messelektrode 1 einmal voll dem atmosphärischen Feld ausgesetzt und einmal vollständig davon abgeschirmt wird. Man erhält somit in je einer knappen ms eine Messung der Feldstärke E. Wird die Spannung der isolierten Elektrode gemessen, so hängt diese bei konstanter Feldstärke nicht von der Umdrehungszahl ab; der Verschiebungsstrom andererseits wächst linear mit der Umdrehungszahl (Frequenz).

Wie weit lassen sich die gestellten Anforderungen nun mit der Feldmühle erfüllen?

zu a) & b) Diese Forderungen sind erfüllt, auch bezüglich f).

zu c) Die Forderung der Speicherung kann auf übliche Weise mit einem Magnetband als Speicher gelöst werden, wie das Blockschema der Figur 2 zeigt. Damit das Band 1000 Messpunkte pro sec. speichern kann, ist eine minimale Geschwindigkeit von 20 cm/s erforderlich. Mit einem geschlossenen Magnetband von 1 m Länge lassen sich somit maximal 5 sec. speichern. Der Löschknopf des Bandes ist dauernd in Betrieb. 2 Spuren des Bandes dienen verschiedenen Empfindlichkeiten.

zu d) Diese Forderung lässt sich nicht ohne weiteres erfüllen, da nicht bekannt ist, welcher Amplitude der Wechselspannungskurve die Nulllinie zugehört. Es ist jedoch möglich, zum Beispiel durch Ueberlagerung eines Positiv- oder Negativimpulses während wenigstens 1 ms über das E-Feld zu entscheiden, ob dadurch die Amplituden steigen oder fallen. Je nachdem ist E mit dem Zusatzimpuls gleicher oder entgegengesetzter Polarität.

zu e) Bezweckt ist die Messung des E-Verlaufs am Turm, vor allem in der Umgebung der Turmspitze, da von hier aus Aufwärtsblitze entstehen. Diese Messung ist aus theoretischen und praktischen Gründen nicht möglich. In zweiter Linie kommt die Feldmessung am ebenen Erdboden in der Nähe des Turms in Frage. Für diesen Fall

liegt eine Berechnung des E-Verlaufs bei einem sich nähernden Leitblitz vor (C.F. Wagner: Lightning and Transm. Lines, Journal of the Franklin Institute Vol. 283, Nr. 6, June 1967, Fig. 17 & 18). Diese Messung ist nicht möglich, da keine Ebene, sondern ein eher spitzer Berggipfel die Umgebung des Turmes bildet.

Um reproduzierbare Messungen zu erhalten, die auch mit einem Blitzableiter in der Ebene vergleichbar sind, wurde die Feldmühle seitlich am Messturm selber, ca. 50 m über dem Erdboden, angebaut (Foto).

Bei unveränderter Lage der Elektroden (Erdboden, Turm und Gewitterwolken) und unter Vernachlässigung der lokalen Feldstärkebegrenzung durch Glimmen (Elmsfeuer) ändern sich alle Feldstärken relativ gleich, so dass aus der Messung in einem beliebigen Punkt auf die Werte in andern Punkten geschlossen werden kann. Beide Voraussetzungen sind jedoch im Moment der Annäherung eines Abwärtsblitzes an den Turm oder beim Einsetzen eines Aufwärtsblitzes nicht mehr erfüllt, was bei der Auswertung der Messungen zu beachten ist.

zu f) Die Unempfindlichkeit der Messeinrichtung gegenüber Störungen aus dem Blitzstrom wird dadurch erreicht, dass die gesamte Einrichtung der Feldmühle samt Verstärkern und Aufnahmegerät sich in einem gut leitenden Faraday-Käfig befindet. Für die Uebertragung zwischen Turm und Messraum dient ein spezielles Wellmantelkabel mit einem kräftigen Wellmantel aus Cu. Die Uebertragungsspannung beträgt im Kabel ca. 10...100 V bei 1200 Hz. Diese Spannung ist wesentlich grösser als der grösste Spannungsabfall des Blitzstroms im Mast.

3. Welche Feldänderungen sind nun beim nahen Blitzeinschlag zu erwarten?

Als Ursache von Feldänderungen kommen in Frage:

a) Annäherung des Blitzkopfes eines Abwärtsblitzes an den Messturm 1,

- b) Entstehung eines Aufwärtsblitzes mit anschliessendem Ladungsausgleich,
- c) Wolkenblitze oder Erdblitz in der Umgebung, die den Mess-turm nicht berühren.

Für den Fall a) liegt eine genaue Berechnung des Bodenfeldes bis zum Einschlag des Blitzes in den ebenen Erdboden vor, die bereits erwähnt wurde. Aus dieser Berechnung geht hervor, dass die Bodenfeldstärke erst in den letzten ca. 2 ms vor dem Erreichen des Bodens auf hohe Werte ansteigt, bei denen die Luft durchschlagen wird. Der mutmassliche Verlauf der Bodenfeldstärke E ist in Figur 3 skizziert. Bei praktisch konstanter Bodenfeldstärke E_0 kann ein Abwärtsblitz aus den Wolken herunterwachsen. Die Bodenfeldstärke wächst nach Wagner innert der letzten ca. 2 ms auf Werte, die dem Durchschlag entsprechen. Um diese kurze Spitze weiter aufzulösen, wäre eine Messperiode von Bruchteilen einer ms nötig. Jeder Teilblitz reduziert die Feldstärke. Die Nulllinie kann ohne Schwierigkeit überschritten werden, denn das gesamte Feld ist nicht nur von den zum Ausgleich kommenden Ladungen bestimmt. Durch einen mehr zusammengedrängten Zeitmasstab kommt nur der Gesamtsprung ($E_e - E_0$) zum Vorschein; solche Bilder sind als Glimmströme an den Turmspitzen in grosser Zahl gemessen worden (Bull. SEV 1965, Nr. 1, K. Berger & E. Vogelsanger).

Für den Fall b) eines Aufwärtsblitzes von der Turmspitze kann eine Näherungsrechnung durchgeführt werden, für welche der Turm als leitendes Halb-Ellipsoid über dem Erdboden dargestellt wird. Man kann noch weiter gehen und auch den Turm mit dem darüber entstehenden Aufwärtsblitz durch ein Ersatz-Ellipsoid abbilden, sofern man den Spannungsabfall im Leader-Lichtbogen vernachlässigt (ca. 20 V/cm bzw. 2 kV/m). V. Kozelj hat gezeigt, dass sich um ein leitendes Ellipsoid im homogenen elektrischen Feld (Gewitterfeld) ein Feld ausbildet, das durch einen Dipol mit einer linear verteilten Ladung dargestellt werden kann (Kozelj, Bericht Nr. 25, Blitzschutz-Konferenz Lugano 1967). Es ist auch ohne genaue Rechnung einzusehen, dass das elektrische Feld am Boden infolge des wachsenden Aufwärtsblitzes nicht

stark beeinflusst wird, sofern dessen Einfluss durch einen immer länger werdenden Blitzableiter gedeutet werden kann. Das zu erwartende Bild ist in Figur 4 skizziert.

Der Fall c) schliesslich ist der mannigfaltigste. Je nach dem Anteil, den die im benachbarten Wolken- oder Erdblitz umgesetzten Ladungen auf die Bodenfeldstärke beim Turm 1 inne haben, ändert diese Feldstärke. Hierher gehört die Frage, wo die wesentlichen Wolkenladungen sitzen, und wo deshalb der Ursprung des Blitzes liegt. Dazu sind einige Bilder instruktiv über das statische Feld der üblichen groben Ladungsverteilung, nämlich oben mehr +, unten mehr - Ladungen.

Dr. F. Schwab hat einige Beispiele dieser Felder im elektrolytischen Trog ausgemessen; diese Bilder werden im Dia vorgeführt werden.

Sofern der Ursprung des Blitzes dort liegt, wo die elektrische Feldstärke auf einer grösseren Distanz einen kritischen Wert der Grössenordnung 30 kV/cm bei normaler Luftdichte, oder ca. 20 kV/cm in wenigen km Höhe erreicht, können wir für jede Ladungsverteilung den Ursprungsort des Blitzes angeben.

Der Ursprung kann sehr wohl zwischen den \pm Ladungen in den Wolken liegen, im Sommer in ca. 4 km Höhe, nämlich dort, wo die Temperatur zwischen 0 und -10° liegt. Bei tief liegenden untern Ladungen kann aber auch zwischen dieser Ladung und ihrem Spiegelbild unter dem Erdboden (das zur Berechnung herangezogen werden muss) das Feld maximal werden, sodass dort ein Blitz einsetzt, sei es als Abwärtsblitz über der Ebene oder als Aufwärtsblitz an hohen Turmspitzen. Die Tatsache, dass Blitze nicht bei heiterem Himmel, sondern (abgesehen von Staubgewittern) nur in feuchter Luft (Wolken) vorkommen, liegt offensichtlich darin, dass die Ladungstrennung entgegen der Coulombschen Anziehungskräfte zwischen positiven und negativen Trägern nur bei schweren Trägern, das heisst solchen mit um Grössenordnungen grösserer Masse als der Molekülmasse, möglich ist.

Was den Einfluss eines Nachbarblitzes auf die Bodenfeldstärke anbetrifft, wird in vielen Fällen eine Schwächung auftreten, in andern Fällen eine Stärkung, in wieder andern Fällen eine

Polaritätsumkehr. Es ist nicht der Zweck, hier alle Fälle zu deuten; dies würde den Rahmen dieses Kurzberichts weit sprengen.

Es sollen im folgenden lediglich einige Beispiele im Lichtbild gezeigt werden, die sich im Laufe dieses Sommers präsentiert haben. Wir sind erstaunt über die Vielfalt der bereits erhaltenen Resultate, und wir hoffen daher, dass es möglich sein wird, durch Vergleich der Feldstärke-Registrierung mit dem Blitzstromverlauf die Fragen nach dem Einsatzpunkt des Blitzes, nach seinen Entstehungsbedingungen und damit nach der Ursache der Aufwärtsblitze besser zu verstehen.

Beilage :

2 Figurenblätter

Legende zu Figur 2 :

Schematische Darstellung der ganzen Feld-Registriereinrichtung

- 1 rotierende und geerdete Schlitzscheibe
- 2 ruhende Schlitzscheibe zur Messung des Verschiebungsstromes
- 3 Antriebsmotor
- 4 Widerstand
- 5/6 Verstärker
- 7 Messkabel von der "Feldmühle" in den Messraum
- 8 Eingangsverstärker zum Magnetband
- 9 Magnetband
- 10 Aufnahmekopf
- 11 Wiedergabekopf
- 12 Löschkopf
- 13 Ausgangsverstärker zum Magnetband
- 14 magnetischer Oszillograph
- 15 Kathodenstrahl-Oszillograph
- 16 Auslöseimpuls für die Oszillographen
- 17 einstellbares Verzögerungsglied

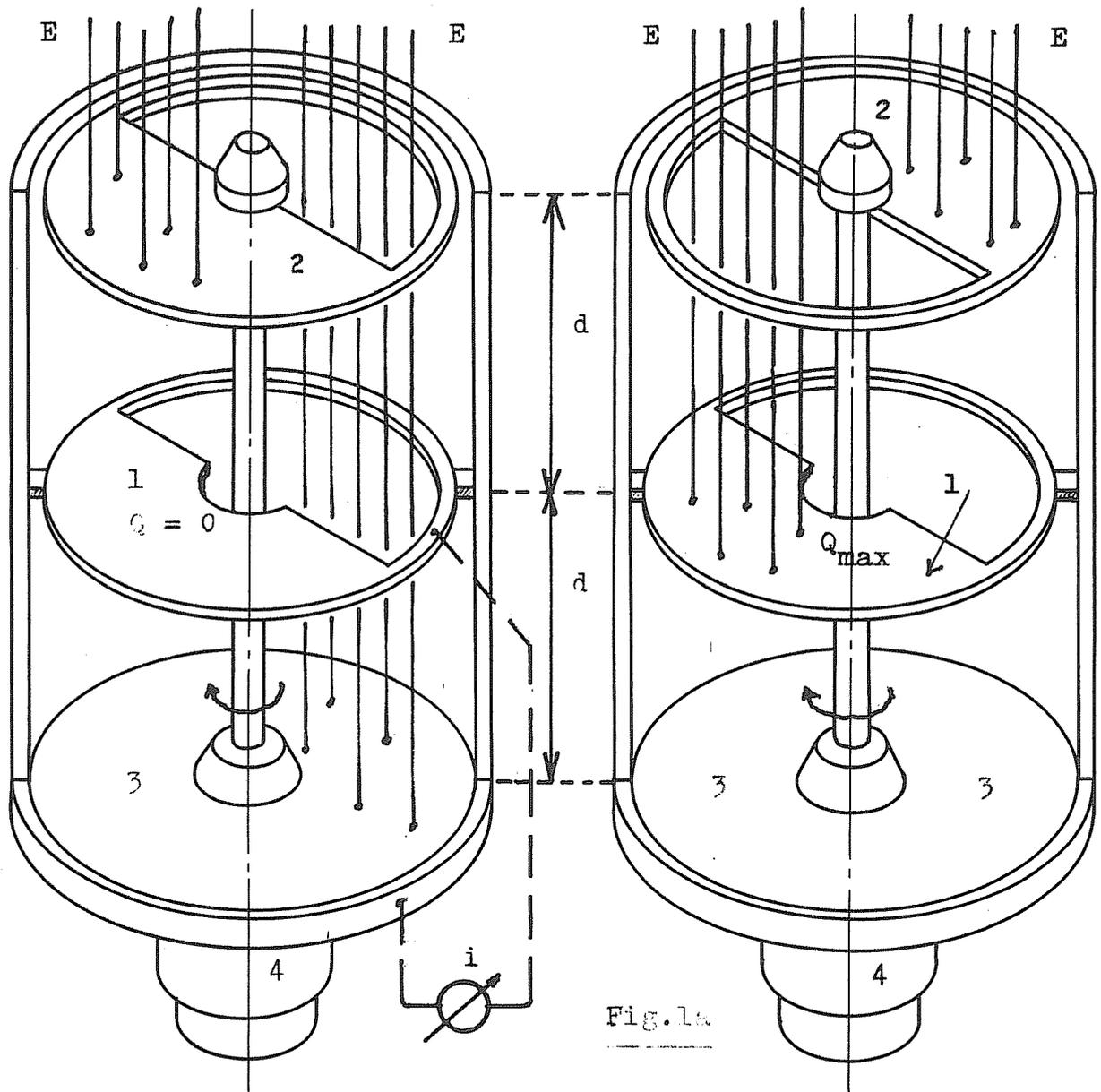
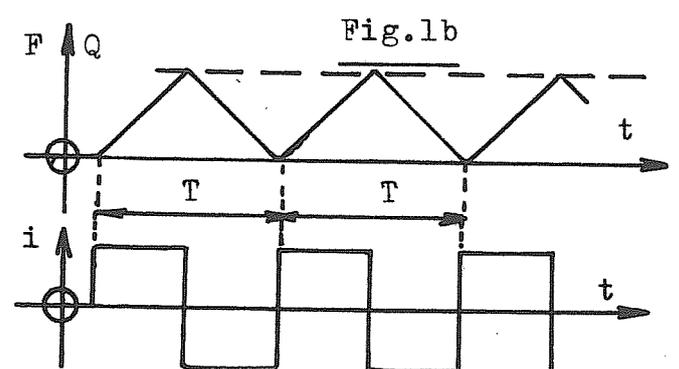


Fig. 1a



$$Q = (\epsilon n p) \cdot F(t) \cdot E(t)$$

$E = \text{konst. während } T = 1/np :$

$$i = \frac{dQ}{dt} = k \cdot E \cdot \frac{dF}{dt}, \text{ Fig. 1b}$$

$E = \text{variabel innert } T = 1/np :$

$$i = k \left[E(t) \frac{\partial F}{\partial E} + F(t) \frac{\partial E}{\partial t} \right]$$

- 1 Messplatte, isoliert
- 2 Abschirmplatte, geerdet
- 3 Geerdetes Gehäuse
- 4 Antriebsmotor
- d Plattenabstand, mm
- E Feldstärke
- Q Elektr. Ladung auf 1
- i Verschiebungsstrom
- ϵ Dielekt. Konstante
- n Drehzahl pro sec.
- p Anzahl Sektoren
- T Periodendauer

FKH 1967

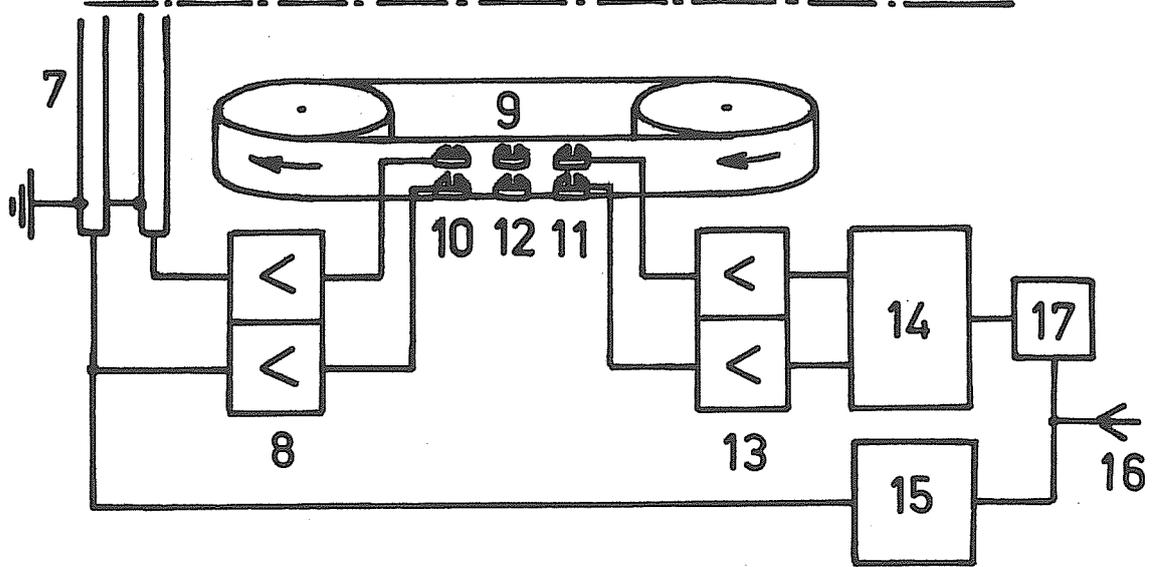
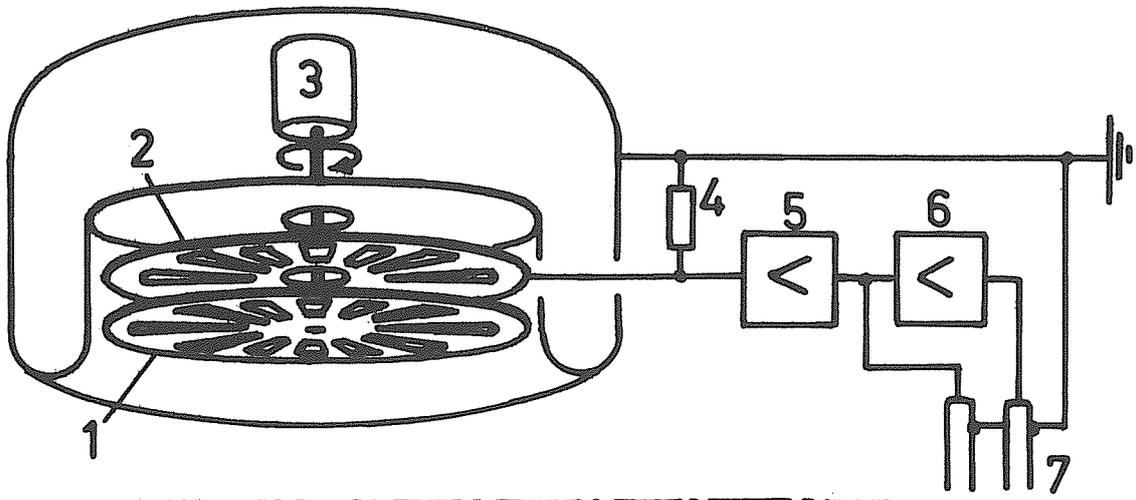


Fig.2

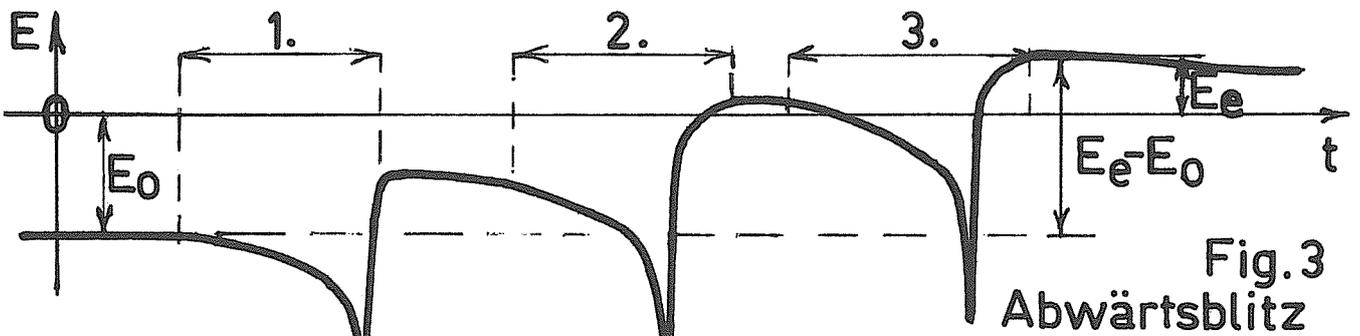


Fig.3
Abwärtsblitz

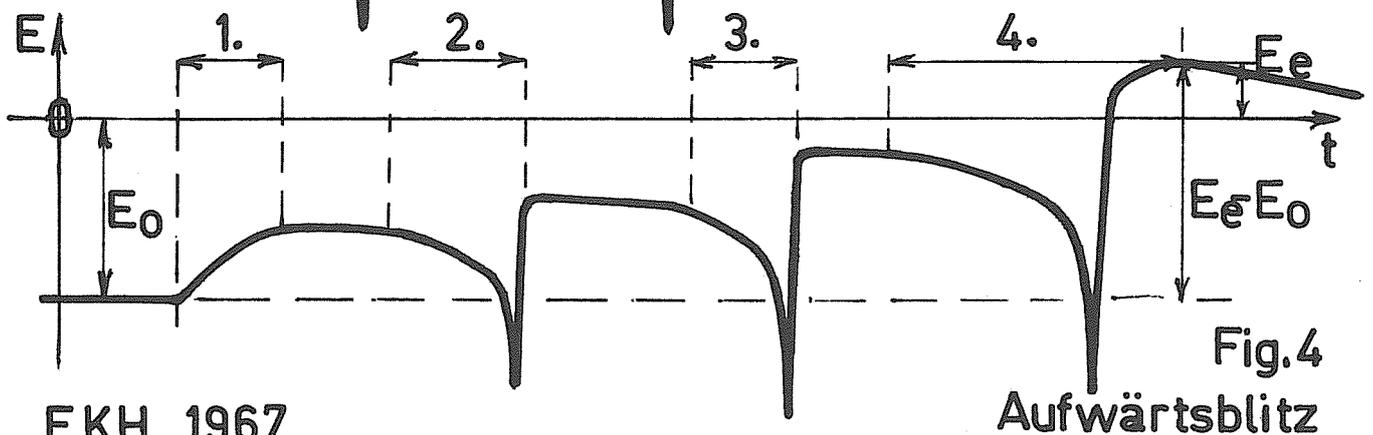


Fig.4
Aufwärtsblitz