

Messinstrument zur Zählung der Anzahl Blitzeinschläge in einem beschränkten Umkreis¹⁾

Von E. Trümpy, Zürich

621.317.7 : 551.594.221

Es wird ein Zähler beschrieben, der auf das magnetische Feld einer elektrischen Entladung reagiert, mit der Absicht, ausschliesslich durch Erdblitze das Zählwerk in Funktion zu setzen. Das Prinzip beruht auf der Beobachtung, dass beim Erdblitz die über 5 μ s gemessene mittlere Stromänderung eine Grösse hat, welche von keiner andern Entladung erreicht wird, seien es Wolkenblitze, Erdschlüsse von benachbarten Hochspannungsanlagen usw.

Description d'un compteur qui agit sous l'influence du champ magnétique d'une décharge électrique, mais de telle sorte que le mécanisme enregistreur ne fonctionne que lorsqu'il se produit des coups de foudre au sol. Son principe est basé sur le fait que, dans ce cas, la variation d'intensité moyenne, mesurée pendant 5 μ s, est d'une grandeur qui n'est atteinte par aucune autre décharge, que ce soit par des coups de foudre entre nuages, par des mises à la terre accidentelles dans des installations à haute tension voisines, etc.

1. Bedürfnis und Ziel der Arbeit

Es ist eine alte Behauptung, dass bestimmte Gebiete viel mehr durch Blitzeinschläge gefährdet sind als andere. Eine physikalische Erklärung für diese Beobachtung ist bis heute nur in Form von Vermutungen möglich, da die meteorologischen Bedingungen für das Zustandekommen des Blitzes noch wenig bekannt sind. Zweifellos ist eine Gefährdung durch Blitze nur soweit vorhanden, als Blitzeinschläge zum Erdboden (Erdblitze) erfolgen. (Es gibt bekanntlich Gewitter, vor allem in den Tropen, deren Blitze ausschliesslich von Wolke zu Wolke verlaufen, ohne den Boden je zu erreichen [Wolkenblitze].) Es ist oft versucht worden, die Einschlagdichte der Erdblitze abzuschätzen. In der Literatur werden Zahlen von einigen Einschlägen pro Quadratmeile und pro Jahr genannt [1]²⁾.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Beschreibung der Entwicklung eines Zählers, der ausschliesslich Erdblitze in einem möglichst klar definierten Umkreis zählt.

2. Methoden der Einschlagzählung

Für die Zählung von Einschlägen ist eine ganze Reihe von Methoden denkbar:

a) Optische Methode

Der Blitz wird photographisch festgehalten und aus dem Bild der Einschlagpunkt bestimmt, wobei

¹⁾ Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass diese Arbeit durch den Fond für kulturelle Bestrebungen der Gemeinde Zollikon (Zürich) ermöglicht worden ist. Für diese finanzielle Hilfe wird bei dieser Gelegenheit der wärmste Dank ausgesprochen. Es sei auch Herrn Doushan Diebold, Ingenieur an der Aff, dafür gedankt, dass er beim Bau des Gerätes stets hilfsbereit zur Verfügung stand. Die erste Versuchs-Ausführung wurde von Herrn H. R. Meier entworfen und gebaut.

²⁾ siehe Literatur am Schluss.

in der Literatur sogar Angaben über die Möglichkeit von Photographien von Blitzen während des hellen Tages gemacht werden. Diese Methode krankt an der Abhängigkeit vom Wetter (Regen und Nebel), ferner ist ein erhöhter Standpunkt für die Photoapparate notwendig [2].

b) Optisch-akustische Methode

Der Blitz wird photographiert, die Distanz durch Messung des Zeitintervalles vom Moment des Blitzeinschlages bis zum Eintreffen der vom Donner herrührenden Schallwellen bestimmt. Grobe Fehler können entstehen, wenn die Blitzbahn nicht senkrecht, sondern schräg oder parallel zur Erdoberfläche verläuft. Distanzen können daher um einige Kilometer falsch eingeschätzt werden.

c) Elektrische Methoden

Es besteht die Möglichkeit, Erdblitze durch gleichzeitige Messung des Potentials des Erdbodens mit Sonden an verschiedenen Orten festzustellen und auch zu lokalisieren. Die Methode ist teuer und hat den Nachteil, dass andere Erdströme, z. B. von elektrischen Bahnen herrührend, Fehlmessungen ergeben können.

Schonland schlägt vor, die bei Blitzenentladungen auftretenden elektrischen Feldänderungen zur Registrierung auszunützen. Leider kann aber das auf dieser Basis entwickelte Gerät Wolken- und Erdblitze nicht unterscheiden. Zudem weist es den prinzipiellen Fehler auf, dass Entladungen in einer bestimmten Entfernung (tote Zone) nicht gezählt werden. Zur ausschliesslichen Zählung von Erdblitzen befriedigt dieses Gerät nicht.

Weiterhin ist denkbar, die magnetische Induktionswirkung des Blitzstromes zur Feststellung von Blitzeinschlägen zu benutzen, sofern sich zwischen Wolken- und Erdblitz ein charakteristischer Unterschied im zeitlichen Verlauf des Stromes zeigt. Ein solcher Unterschied scheint auf Grund der Messungen von *Schonland, Malan* usw. zu bestehen, weil es allem Anschein nach nur bei Erdblitz zu Hauptblitzen (main-strokes) kommt, nicht aber bei Wolkenblitzen. Der Hauptblitz sei dabei als Stromimpuls grosser Höhe und kurzer Dauer definiert. Leider lässt sich der Stromverlauf der Wolkenblitze nicht durch direkte Messung bestimmen, weil der Strom nicht über die Erde fliesst. Als indirekte Methode kommt zu diesem Zwecke lediglich die Messung der Induktionswirkungen in Betracht. Solche Messungen sind bis heute nicht veröffentlicht worden.

Auf Anregung und unter der Leitung von Prof. Dr. K. Berger wurde im Hochspannungslaboratorium der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich ein Blitzeinschlagzähler entwickelt, der die Induktionswirkung der Erdblitz zur Registrierung benützt.

3. Grundlagen und Prinzip des neuen Einschlagzählers

Auf Grund vieler in der Blitzmessstation auf dem Monte San Salvatore bei Lugano aufgenommener Oszillogramme des Blitzstromes bei Einschlägen in die dort aufgestellten Blitzableiter ist bei Erdblitz ein Stromanstieg festgestellt worden, der sich wie folgt charakterisiert (Fig. 1 und 2):

- a) Dauer des Blitzstromanstieges: 1...10 μs (wesentlicher Teil meist innerhalb 5 μs);
- b) Stromamplitude: 5...100 kA;
- c) Halbwertdauer $T_H = 10...100 \mu\text{s}$ (ausnahmsweise bis 300 μs , sofern die Stromamplitude grösser als 10^4 A ist).

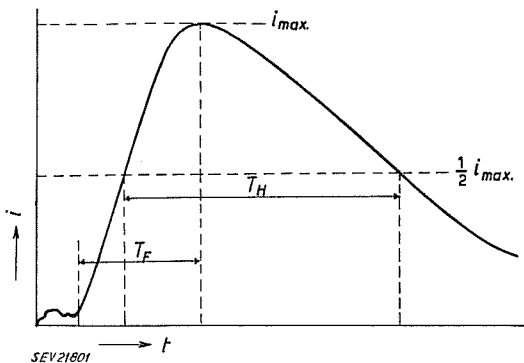


Fig. 1

Prinzipielles Stromoszillogramm eines Erdblitzes

T_F Frontdauer, 1...10 μs ; T_H Halbwertdauer, 10...100 μs ;
 i Strom des Erdblitzes (Maximum $i_{max} = 5...100$ kA); t Zeit

Eine Korrelation der drei Werte-Gattungen konnte bis jetzt nicht festgestellt werden.

Rasche Stromänderungen kleiner Amplitude sind beim Wolkenblitz vermutlich ebenfalls möglich, doch scheint die Annahme gerechtfertigt, dass die mittlere Stromänderung über 5 μs gemessen beim Erdblitz grösser ist als beim Wolkenblitz, denn die

so beschriebene Stromänderung kann nur durch die rasche Entladung des geladenen Blitzkanals an einen Leiter (die Erde) entstehen. Das Prinzip des entwickelten Apparates besteht nun darin, einen Zähler

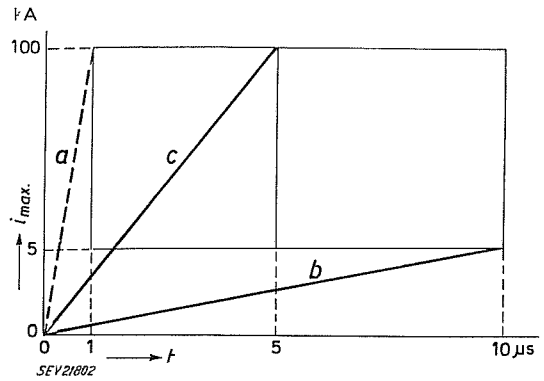


Fig. 2

Diagramm der beim Erdblitz vorkommenden Steilheiten der Front T_F

a und b stellen die extrem vorkommenden Steilheiten der Front dar, c hingegen die auf das Meßsystem am stärksten wirkende Front

i_{max} Stromamplituden der Erdblitz; t Zeit

ansprechen zu lassen, sobald die mittlere Stromänderung $\left| \frac{\Delta i}{\Delta t} \right|_{5 \mu\text{s}}$ einen Schwellenwert überschreitet.

Mathematisch wird die verlangte mittlere Stromänderung dadurch erhalten, dass das bestimmte Integral in den Grenzen $t = t_1$ bis $t = t_1 + 5 \mu\text{s}$ der

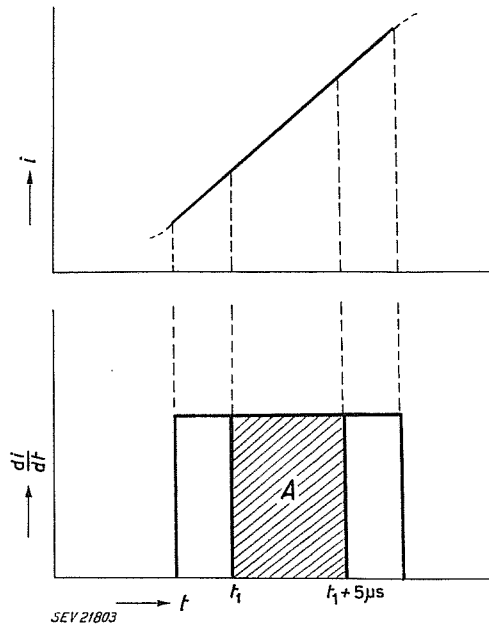


Fig. 3

Graphische Darstellung der im Text definierten Fläche A
 Bezeichnungen siehe im Text

nach der Zeit differenzierten Stromkurve $i = i(t)$ des Blitzes gebildet wird. Das Integral ist proportional der verlangten mittleren Stromänderung und ist in Fig. 3 durch die Fläche A dargestellt. Diese Proportionalität ist daraus ersichtlich, dass im Nahfeld des Blitzes gilt:

$$A = \int_{t_1}^{t_1+5\mu s} u_i dt = -M \int_{t_1}^{t_1+5\mu s} \frac{di}{dt} dt = -M \int_{t_1}^{t_1+5\mu s} di$$

$$A = -M [i(t_1 + 5\mu s) - i(t_1)] = -M \Delta i$$

(Δi in $5\mu s$)

Dabei soll A Fläche, u_i in den Rahmenantennen induzierte Spannung, M magnetische Kopplung, i Blitzstrom und t Zeit bedeuten.

Der Einschlagzähler verwirklicht die genannten mathematischen Operationen auf folgendem Wege:

a) *Differentiation der Stromkurve $i = i(t)$ des Blitzes*

Wird eine induktive Ankopplung des Zählers an den Blitz gewählt, so induziert das vom Blitzstrom herrührende Magnetfeld in der Antenne des Zählers eine Spannung u_i , welche im Nahfeld proportional di/dt ist:

$$u_i = -M \frac{di}{dt}$$

b) *Ausführung der Integration*

Das verlangte bestimmte Integral wird auf bekannte Art durch Aufladung einer Kapazität C über einen Widerstand R gebildet.

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c dt, \quad i_c = \frac{u_i}{R}$$

Die Dauer der Aufladung muss nach Voraussetzung $5\mu s$ betragen. Falls die Zeitkonstante $\tau = RC \gg 5\mu s$ ist, wird die Amplitude h des dreieckigen Spannungsimpulses u_c , welcher an der Kapazität erhalten wird, proportional der oben definierten Fläche A (Fig. 4). Damit ist eine leicht auswertbare Grösse für das gesuchte Integral gefunden.

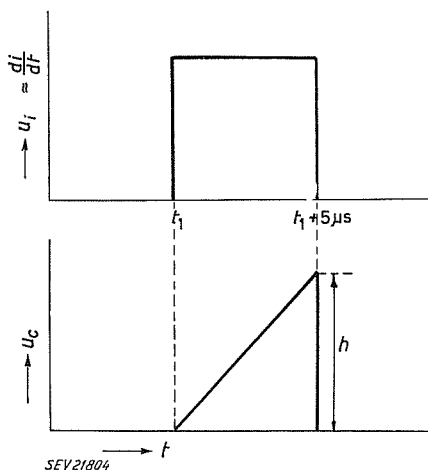


Fig. 4

Graphische Darstellung der Integration
Bezeichnungen siehe im Text

Zur Ausführung der beschriebenen Integration wurde ein Zweikanal-Meßsystem gewählt. Die beiden Kanäle werden abwechselungsweise während $5\mu s$ eingeschaltet, bzw. gesperrt. Der eingeschaltete Kanal führt die verlangte Integration in der vorgeschriebenen Zeitspanne von $5\mu s$ durch, während-

dem der gesperrte Kanal vollkommen entladen wird, um in den folgenden $5\mu s$ Einschaltzeit frei von Restladungen, d. h. messbereit zu sein. Überschreitet die Amplitude h einen Schwellenwert h_{min} , so muss der Zähler ansprechen.

4. Beschreibung des ausgeführten Apparates

a) *Kopplung, algebraische Addition und Eingangsverstärker*

Damit die Empfindlichkeit des Einschlagzählers nicht stark von der Richtung abhängt, wird er mit zwei zueinander räumlich um 90° verdrehten, abgeschirmten Rahmenantennen an den Blitz angekoppelt (Fig. 5). Auf gute Abschirmung der beiden Antennenzuführungen und auch des ganzen Zählergehäuses ist zu achten, damit die Kopplung keinesfalls kapazitiv erfolgen kann. Die beiden Windungs-

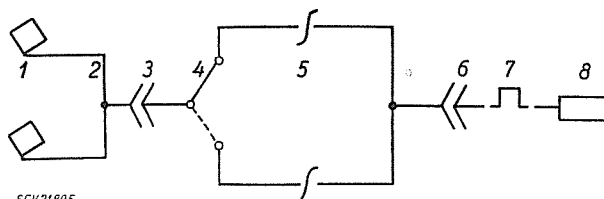


Fig. 5

Schematischer Aufbau des Einschlagzählers

- 1 Rahmenantenne; 2 Addition; 3 Verstärker; 4 Schalter; 5 Integration; 6 Verstärker; 7 Auslösung; 8 Zähler

enden einer Rahmenantenne sind symmetrisch zur Erde geschaltet. Mit einer Doppeldiode pro Antenne wird erreicht, dass über einen gemeinsamen Kathodenwiderstand unabhängig von der Polarität des Blitzes formgetreue positive Impulse entstehen, welche im darauffolgenden Verstärker vergrößert und begrenzt werden.

Die Addition der Eingangsspannungen der beiden Rahmenantennen wird dadurch erhalten, dass der schon erwähnte Kathodenwiderstand auch gemeinsam für die beiden Doppeldioden wirkt. Die Ströme der beiden Doppeldioden addieren sich demnach in jedem Moment, so dass die Summenspannung am Kathodenwiderstand je nach der Richtung des Blitzes nur zwischen 1 und $\sqrt{2}$ schwanken kann.

Der eigentliche Verstärker umfasst zwei Stufen, da trotz der verlangten grossen Bandbreite von ca. 1 MHz eine genügend grosse Verstärkung und damit eine genügende Empfindlichkeit gewährleistet sein muss. Die maximal gestattete Empfindlichkeit ergibt sich dadurch, dass Wolkenblitze in minimal vorkommender Entfernung nicht gezählt werden dürfen. Aus diesem Grunde wurde die grösste Empfindlichkeit so festgelegt, dass der Zähler bei einem Blitz in einem Kilometer Entfernung und mit der mittleren Stromänderung von $1000 A/\mu s$ während $5\mu s$ seine Zählschwelle gerade erreicht. Die Eingangsspannung am Verstärker beträgt dabei ca. 0,8 V. Ströme von hundertfacher Steilheit müssen noch gezählt werden.

Die Verstärkung dieser Stufe ist variabel, so dass die Empfindlichkeit des Gerätes von ihrer maximalen Grösse bis zur vollständigen Unempfindlichkeit beliebig und kontinuierlich eingestellt werden kann.

b) Elektronischer Schalter und Integration

Den in Abschnitt 3 angeführten Ausführungen ist noch folgendes beizufügen:

Die beiden elektronischen Schalter am Eingang des Zweikanalsystems bestehen aus zwei Heptoden. Auf entsprechenden Steuergittern der beiden Röhren werden einander um 180° phasenverschobene Spannungsimpulse rechteckiger Form aufgedrückt, derart, dass beim gleichzeitigen Anlegen des Eingangssignals an die entsprechenden andern beiden Steuergitter die eine Röhre gesperrt bleibt, währenddessen in der andern Strom fließt. Die Schaltdauer beträgt nach Voraussetzung $5 \mu\text{s}$.

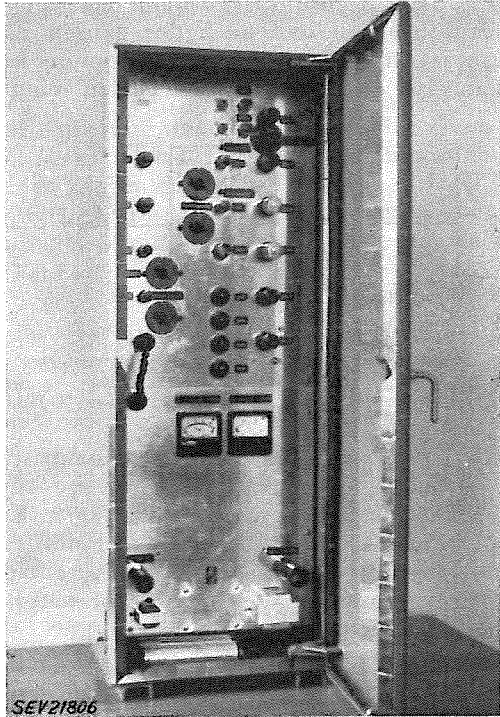


Fig. 6
Ansicht des Messinstrumentes

Die Entladung der Integration erfolgt durch eine Anordnung von zwei Doppeldioden pro Kanal. Die Entladungen werden wie beim Schalter durch phasenverschobene Spannungsimpulse gesteuert.

c) Endstufe

Vor Vereinigung der beiden Kanäle werden die Spannungsimpulse getrennt verstärkt. Die beiden Röhren, welche die Vereinigung vollziehen, sind als Schwellen geschaltet. Da die Steuergitter unter den cut-off vorgespannt sind, müssen die Spannungsimpulse eine gewisse Amplitude aufweisen, damit sie weitergeleitet werden. Es ist darauf zu achten, dass die Vorspannungen dazu genügen, die Röhren für das «Geräusch» des elektronischen Schalters gesperrt zu halten. Es kann hier auch die Empfindlichkeit des ganzen Zählers variiert werden. Schwellenänderungen während des Betriebes sind nicht zu empfehlen, da die beiden Röhren sich nur mit Hilfe weiterer Messinstrumente einregulieren lassen.

Alle diese Schwelle passierenden Impulse lösen, ungeachtet des Kanals dem sie angehören, einen

monostabilen Multivibrator aus. Dieser schliesst seinerseits einen Stromkreis und bringt das Zählwerk zum Ansprechen. Wichtig ist, dass die Auslösung des Multivibrators praktisch unabhängig von der Dauer des Eingangsimpulses erfolgt. Diese darf im ausgeführten Falle Bruchteile von $1 \mu\text{s}$ betragen.

Aus dem ganzen Zählsystem geht hervor, dass ein einziger in der Rahmenantenne induzierter Spannungsimpuls mit einer Dauer grösser als $5 \mu\text{s}$ den Multivibrator verschiedene Male auslösen kann. Um nur eine einmalige Registrierung zu erhalten, wurde ein Zählwerk gewählt, das alle $\frac{1}{20}$ s neu zu zählen im Stande ist, eine Zeit, die viel grösser als die gemessene Dauer von Erdblitzen, besonders als deren Frontdauer T_F ist.

5. Anfänglich aufgetretene Störungen

a) Verschiedene Röhren führen nur beim Ansprechen des Zählers Strom und sind somit praktisch ständig gesperrt. Gewöhnliche Röhren haben die Eigenschaft, nach langen Sperrzeiten bei Impulsbetrieb keinen oder nur noch einen Bruchteil des Nennstromes zu liefern. Aus diesem Grunde sind beim ausgeführten Zähler alle derart beanspruchten Röhren unter den zur Verfügung stehenden RCA-Spezialtypen 5915 und 5963 ausgewählt worden.

b) Auf die Erdungs- und Abschirmungsverhältnisse ist speziell Rücksicht zu nehmen. Das Gehäuse muss mit dem Nulleiter des Netzes verbunden sein, damit keine Potentialunterschiede zwischen diesem und einer eventuellen weiteren Erdung des Gehäuses auftreten können. Es wurde festgestellt, dass solche Störimpulse den Zähler zum Ansprechen bringen, solange der Käfig nicht vollständig ist. Zur Vervollständigung des Käfigs gehört auch das Abblocken der speisenden Netzphasen an den Käfig.

c) Eine weitere Quelle von Fehlzählungen kann das Netzgerät sein. Es darf von einer Stabilisierung der Spannung abgesehen werden, falls beim Einschalten der Netzspannungen sich die positiven Anodenspannungen nur verzögert gegenüber den negativen Gittervorspannungen bilden können, bzw. beim Ausschalten sich der umgekehrte Vorgang abspielt. In diesem Fall ist das Gerät vollkommen unempfindlich auf Störungen des Netzes.

d) Kurzschlüsse, Erschlüsse usw. von benachbarten Hochspannungsleitungen dürfen selbstverständlich keine Fehlzählungen verursachen. Beim extremen Fall einer Wanderwelle auf einer Freileitung von 500 kV fließt bei einem Wellenwiderstand von 200Ω ein Wellenstrom von 2500 A . In der $1\text{-}\mu\text{s}$ -Front besteht eine Stromänderung von $2500 \text{ A}/\mu\text{s}$. Über $5 \mu\text{s}$ ergibt sich somit eine mittlere Änderungsgeschwindigkeit von nur $500 \text{ A}/\mu\text{s}$. Zudem ist bei gleichem di/dt bei Blitz und Erdschluss das magnetische Feld des Blitzes viel stärker mit der Antenne gekoppelt als jenes einer fernen Hochspannungsleitung.

6. Funktionskontrolle des Einschlagzählers

Einige prinzipielle Messprobleme, welche durch das System des entwickelten Zählers begründet sind, seien kurz angeführt.

a) *Richtungsempfindlichkeit*

Durch die räumliche Anordnung der beiden Antennen ergibt sich ein Unterschied der Empfindlichkeit in der Ebene im Verhältnis von maximal $1 : \sqrt{2}$, bei Voraussetzung vertikaler Blitze.

b) *Zählfolge*

Da das Zählwerk nur alle $\frac{1}{20}$ s neu zählen kann, werden zwei Erdblitz, die in weniger als $\frac{1}{20}$ s aufeinander folgen, nur einmal gezählt. Eine solche rasche Folge von Erdblitz ist aber selten.

c) *Schwellenwert (Empfindlichkeit)*

Wie schon erwähnt, muss in mindestens einem Kanal des Einschlagzählers eine Fläche minimaler Grösse A_{min} innert $5 \mu s$ induziert werden, damit die Schwelle zur Auslösung des Zählers erreicht wird. Dadurch, dass der Erdblitz nicht mit dem Gerät synchronisiert werden kann, ergeben sich Komplikationen, indem die totale induzierte Fläche A_{total} durch den Schalter willkürlich in verschiedene Teilflächen A_1, A_2, \dots zerhackt wird (siehe Fig. 7).

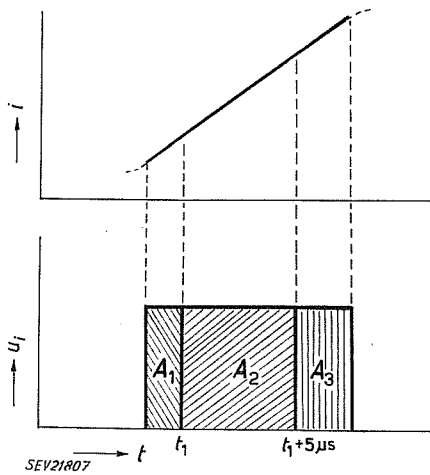


Fig. 7

Darstellung der Aufteilung der Fläche A_{total} durch das Zweikanal-Meßsystem

$$A_{total} = A_1 + A_2 + \dots + A_n$$

Der Zähler spricht an, falls A_1 oder A_2, \dots oder $A_n \geq A_{min}$
Bezeichnungen siehe im Text

I. $t_i \geq 10 \mu s$

A_{total} wird willkürlich in die verschiedenen Kanäle aufgeteilt; mindestens ein Kanal wird jedoch sicher während $5 \mu s$ ununterbrochen gespiesen. A_{min} wird somit unter allen Umständen im einen oder andern Kanal eindeutig erreicht. Die Schwelle ist scharf ausgeprägt, d. h. eine kleine Änderung von u_i bewirkt, dass die Blockierung des Zählers aufgehoben wird und dieser jeden Eingangsimpuls zählt.

II. $t_i < 10 \mu s$

Je nach dem Zeitpunkt der Umschaltung in der Stromfront wird die Fläche A_{total} verschieden unterteilt. Der ungünstigste Fall ist jener, wo A_{total} gerade halbiert wird. Bei $t_i = 5 \mu s$ wird jeder Kanal während $2,5 \mu s$ gespiesen und u_i muss verdoppelt werden, um dieselbe Fläche A zu erhalten

wie in jenem Fall, wo A_{total} nicht aufgeteilt wird. Dasselbe gilt für $t_i < 5 \mu s$. Dies heisst, dass die Empfindlichkeit des Einschlagzählers in diesem Falle bis doppelte Werte A_{total} benötigt, d. h. dass A_{total} maximal im Verhältnis $2 : 1$ streut. Bei Frontdauern $< 5 \mu s$ wird die Wahrscheinlichkeit, dass die Umschaltung gerade mitten in der Front passiert, immer kleiner. Im Grenzfall bekommt jeder Kanal nur den halben Gesamtimpuls A_{total} , doch wird dieser Fall immer seltener. Da die meisten Erdblitz eine Frontdauer von $2 \dots 5 \mu s$ (selten länger als $10 \mu s$) aufweisen, wird die Streuung im Sinne höherer Ansprechwerte bei kürzerer Dauer als $5 \mu s$ immer seltener. In Fig. 8 ist der Verlauf der Schwellen graphisch dargestellt, wobei T_F als Parameter berücksichtigt wird.

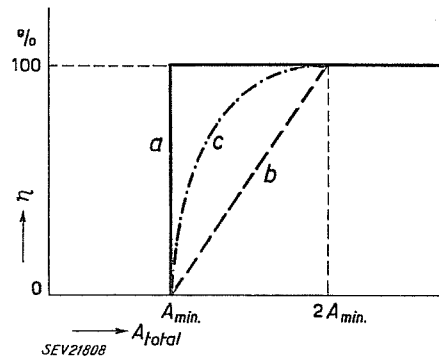


Fig. 8

Darstellung der Streuung, hervorgerufen durch das Zweikanal-Meßsystem

η Prozent der gezählten Blitze

$a : t \geq 10 \mu s$; $b : t = 5 \mu s$; $c : t = 8 \mu s$ bzw. $2 \mu s$

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

In den vorangehenden Betrachtungen wurden Blitze mit während der Frontdauer T_F konstant bleibender Stromänderung behandelt. Ist di/dt nicht konstant, so bleiben die Streuungsverhältnisse identisch den eben besprochenen. Als einzige Bedingung für die Front gilt, dass diese keine Schwingungen aufweist, weil in diesem Fall der Zähler nicht auf die mittlere, sondern auf die Summe der absoluten Teilbeiträge der positiven und negativen Spannungsänderungen während $5 \mu s$ reagiert. Dieser theoretische Fall ist nicht von Interesse, da Schwingungen in der Front bei Erdblitz nicht ausgeprägt sind.

Die verschiedenen, in Abschnitt 6c beschriebenen Fälle wurden experimentell nachgeprüft. Einerseits wurde mit einem Rechteck-Impulsgenerator bei der niedrigen Stossfolge von 50 Hz direkte Spannung an die Windungsenden der Rahmenantenne gelegt, wobei die Zeitdauer der Impulse beliebig von 2 bis $60 \mu s$ variiert werden konnte. Andererseits wurde der Einschlagzähler induktiv an eine Stoßschaltung gekoppelt. Die Frontdauer des Stosses konnte in diesem Fall in den Stufen von 32, 15, 7 und $3 \mu s$ gewählt werden. Die gemessene Streuung der Empfindlichkeit entsprach den obigen Überlegungen. Im besonderen bestätigte sich das Verhältnis zwischen Streuungsbeginn und Streuungsende von $2 : 1$.

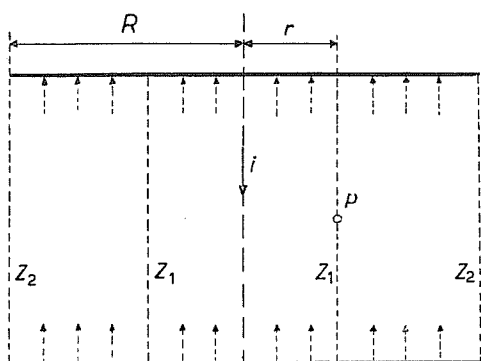
d) *Obere Messgrenze*

Bei der Aufstellung des Einschlagzählers ist darauf zu achten, dass unter keinen Umständen ein Erd-

blitz in nächster Nähe einschlägt. Die induzierte Spannung zwischen Kathode und Heizfaden der Eingangsröhre darf 330 V nicht übersteigen, was bei der bestehenden Schaltung einen Höchstwert für die induzierte Spannung von 660 V ergibt. Für die steilste vorkommende Front eines Erdblitzes von 10 kA/μs darf dieser nicht näher als ca. 12 m einschlagen. Auf dem Monte San Salvatore wird der Einschlagzähler in dieser Hinsicht durch einen ca. 20 m entfernten Blitzableiter geschützt.

e) Einfluss der Blitzlage und Blitzlänge

Für die folgenden Betrachtungen soll der Erdblitz als Entladung eines Plattenkondensators durch einen zentralen Überschlagfunken nach Fig. 9 definiert werden. Der Stromkreis schliesst sich durch einen Verschiebungsstrom $\epsilon \frac{d\vec{E}}{dt}$ [E elektrische Feldstärke; ε Dielektrizitätskonstante], wobei dieser gleichmässig über die Platten verteilt fiesse. Die beiden Platten des Kondensators, Erde und Wolke,



SEV21809

Fig. 9

Für die Rechnung benütztes Ersatzbild einer Blitzentladung (Erdblitz)

R Radius der Kondensatorplatten; r Radius des durch den Punkt P gelegten Zylinders Z₁; Z₁, Z₂ Zylinder

seien Leiter; die Randwirkung der Kapazität wird vernachlässigt. Die Rahmenantenne sei dabei so angeordnet, dass die Feldstärke \vec{H} senkrecht zu A steht. (A ist die von der Rahmenantenne umschlossene Fläche).

Die beschriebene Entladung induziert in der Rahmenantenne des Zählers eine Spannung

$$u_i = - \frac{d\Phi}{dt} = - \mu_r \mu_0 N \frac{d}{dt} \iint H dA$$

Da in diesem grossen Plattenkondensator die Feldstärke H über die ganze Rahmenantenne als konstant angesehen werden darf, gilt:

$$u_i = - \mu_r \mu_0 N A \frac{dH}{dt}$$

H lässt sich nach Maxwell berechnen:

$$\text{rot } H = j + \epsilon \frac{dE}{dt}$$

Wird diese Beziehung in die Gleichung von Stokes eingesetzt, so wird:

$$\oint H_s ds = \iint \text{rot } H_n dA_1 = \iint j_n dA_1 - \iint \epsilon \frac{dE_n}{dt} dA_1 = i - \epsilon \iint \frac{dE_n}{dt} dA_1$$

Darin bedeutet A₁ die Fläche längs deren Rand das Linienintegral gebildet wird; die Indizes n und s geben an, dass es sich um Normal-, bzw. Tangentialkomponenten an den Integrationsweg handelt. Falls die beiden Kondensatorplatten Kreisscheiben sind, kann der Rotationssymmetrie wegen H bestimmt werden:

$$H_s = \frac{i}{2 \pi r} - \frac{\epsilon}{2 \pi r} \iint \frac{dE_n}{dt} dA^*$$

Aus Symmetriegründen folgt weiter, dass die Ströme in den Platten auf das magnetische Feld keinen Einfluss ausüben können. Es gilt somit:

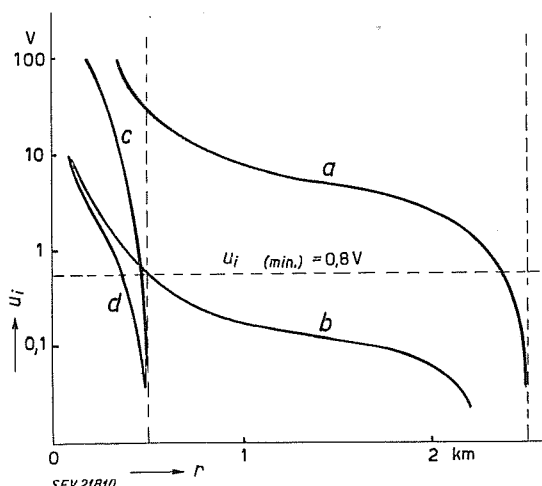
$$H_s \equiv H$$

Wird durch den Punkt P ein Zylinder Z₁ gelegt (wie in Fig. 9 gezeichnet), so beträgt der innerhalb dieses Zylinders fliessende Verschiebungsstrom $i (r^2/R^2)$. Der Rest des Verschiebungsstromes fiesst im Hohlzylinder Z₂. Das von diesem innert Z₁ erzeugte Feld ist 0. Es gilt somit:

$$H = \frac{i}{2 \pi r} - \frac{i r^2}{2 \pi r R^2} = i \frac{R^2 - r^2}{2 \pi r R^2}$$

und

$$u_i = - \mu_r \mu_0 N A \frac{R^2 - r^2}{2 \pi r R^2} \frac{di}{dt}$$



SEV21810

Fig. 10

Vom Erdblitz in der Rahmenantenne induzierte Spannung u_i in Funktion des Abstandes r

Kurve	R km	$\left \frac{\Delta i}{\Delta t} \right _{5 \mu s}$ A/μs
a	2,5	2 · 10 ⁴
b	2,5	500
c	0,5	2 · 10 ⁴
d	0,5	500

In Fig. 10 ist u_i in Funktion von r und mit $\left| \frac{\Delta i}{\Delta t} \right|_{5 \mu s}$ und R als Parameter dargestellt. Wie aus Fig. 2 hervorgeht, sind die in Betracht fallenden

extremen Steilheiten $\frac{di}{dt} = 5 \cdot 10^2 \frac{A}{\mu s}$ und $\frac{di}{dt} = 2 \cdot 10^4 \frac{A}{\mu s}$. Weitere Parameter stellen die geometrischen Abmessungen des Plattenkondensators dar. Als extreme Fälle sind Kondensatoren mit einem Plattenradius R von 0,5 und 2,5 km aufgezeichnet. Die Distanz der Platten ist gleich deren Radius gewählt. Da zum Ansprechen des Zählwerks ein minimales u_i von ca. 0,8 V in der Antenne induziert werden muss, ergeben sich die räumlichen Zählgrenzen des Einschlagzählers. Diese sind nicht nur für jedes $\left| \frac{di}{dt} \right|_{5 \mu s}$, sondern auch für jeden Plattenkondensator verschieden.

Es bleibt zu berücksichtigen, dass die gemachten Voraussetzungen nur grobe Näherungen der Wirklichkeit sind. Eine Erfassung des Einflusses der Topographie der Gegend, der Wolkenformen usw., ist nicht möglich.

Bessere Ersatzbilder des Blitzes sind leider nur für stationäre Wechselfelder möglich (z. B. Hertzscher Dipol). Für die Berechnung des Magnetfeldes H des Blitzstromes kommen daher nur Fourier-Reihen in Frage, die leider für allgemeine Betrachtungen sehr unübersichtlich sind. Grundsätzlich würde das Bild in der Hinsicht besser, als der Feldabfall mit der Entfernung flacher würde. Die Schwierigkeit, dass sich für den Messbereich des Zählers keine scharfe, vom Stromverlauf unabhängige Grenze (Blitzdistanz) angeben lässt, bleibt jedoch bestehen.

Zusammenfassend kann über den Messbereich des Einschlagzählers unter Berücksichtigung der in Ab-

schnitt 6 aufgeführten Ergebnisse folgendes festgestellt werden. Spricht der Einschlagzähler an, so hat bestimmt ein Blitz in die Erde eingeschlagen, und zwar innerhalb eines Umkreises von höchstens ca. 5 km Radius, was der grössten vertikalen Blitzlänge entsprechen dürfte. Nicht jeder Erdblitz in diesem Umkreis hingegen wird gezählt, d. h. stromschwache und kurze Blitze nur, wenn sie näher liegen. Von der Anzahl der gezählten auf die Anzahl der ungezählten Erdblitzes zu schliessen, ist unmöglich. Somit kann lediglich angegeben werden, dass im genannten Umkreis eine bestimmte, minimale Anzahl von kräftigen Erdblitzes eingeschlagen hat.

Für absolute Messungen der Anzahl Blitzeinschläge pro km^2 ist demnach der Einschlagzähler nicht geeignet, trotzdem die Abhängigkeit der induzierten Spannung von den elektrischen Daten des Blitzes und seiner Entfernung und Lage streng definiert sind. Werden hingegen nur vergleichende Messungen, z. B. zwischen verschiedenen Gebieten gewünscht, so dürfen die Zählungen benützt werden, falls die topographischen Formen der Gegenden einander ähnlich sind. In diesem Falle spielen die beschriebenen Streuungen des Gerätes, sowie die verschiedenen Zählgrenzen keine Rolle, da diese, für viele Einschläge betrachtet, in den verschiedenen Gegenden dieselben sind.

Literatur:

- [1] Golde R. H.: Frequency of occurrence of lightning flashes to earth. Journal of Royal Meteorological Society Bd. 71 (1945) Nr. 307/308.
- [2] Schonland: The Flight of Thunderbolts. Oxford 1950.

Adresse des Autors:

E. Trümper, dipl. Elektroingenieur ETH, Hochspannungslaboratorium der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 7/6