

Dynamische Zerstörung einer Erdungsleitung durch einen Blitz

Autor(en): **Meister, H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins :
gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen
Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes
Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **64 (1973)**

Heft 25

PDF erstellt am: **17.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915634>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Dynamische Zerstörung einer Erdungsleitung durch einen Blitz

Von H. Meister

551.594.221 : 621.316.992

Meistens ist es sehr schwierig, aus den Schäden an Fernmeldeanlagen auf Amplitude und Dauer des Blitzstromes zu schliessen. Die Deformation zweier parallelgeführter Leiter ermöglichte wegen der definierten Anordnung die Berechnung der Daten eines extrem starken Blitzes in einen Fernsehumschalter. Rechnung und experimentelle Nachkontrolle unter Laborbedingungen ergaben einen Blitzstrom von über 300 kA, also einen sehr hohen Wert.

La plupart du temps, il est très difficile de déduire l'amplitude et la durée du courant d'éclair d'après les dégâts provoqués aux installations de télécommunications. La déformation de deux conducteurs parallèles nous a permis de calculer, dans un réémetteur de télévision, les caractéristiques d'un éclair extrêmement violent, grâce à la disposition définie. L'étude théorique et une vérification expérimentale en laboratoire donnent un courant de l'éclair de 300 kA, donc une valeur très élevée.

1. Einleitung

Über die Eigenschaften von Blitzen ist man vorwiegend durch die über Jahrzehnte durchgeführten Forschungen der FKH¹⁾ auf dem Monte San Salvatore ziemlich gut orientiert. Man kann aus dieser Statistik einigermaßen auf die Störungsempfindlichkeit bestimmter Fernmeldeanlagen schliessen, auch liefert sie die Grundlagen zur Planung blitzgeschützter Anlagen. Es ist aber verhältnismässig schwierig, diese Überlegungen durch Betriebserfahrungen zu belegen, da die Schäden in den wenigsten Fällen einen Rückschluss auf Amplitude und Dauer des Blitzes zulassen. Bei einem der ersten Fernsehumschalter eines neuen Typs ermöglichte eine an sich ungünstige Bauweise, aus der Deformation zweier definiert angeordneter Drähte ziemlich genau die Amplitude und die Dauer eines Blitzstromes zu berechnen.

2. Situation

Beim Umschalter Eggwil, der vor der Ausarbeitung der Richtlinien für den Überspannungsschutz von Umschaltern erstellt wurde, besteht die Verbindung zwischen dem Sendermast und den beiden Zoreskanalhälften aus zwei in 30 mm gegenseitigem Abstand auf Stützen montierten Kupferdrähten von 20 mm² Querschnitt. Der Mast (Fig. 1) ist mit verzinktem Bandstahl geerdet. Weitaus der grösste Teil des Blitzstromes wird aber vom Zoreskanal übernommen, der auf eine Länge von 215 m zum Schutz des Fernmelde- und des Niederspannungskabels verlegt wurde.

¹⁾ FKH = Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen.

Diese beiden Leitungen zwischen dem Zoreskanal und der Erdleitung des Umschaltmastes wurden nun nach einem Einschlag in den Mast im Mai 1973 weggerissen und stark deformiert vorgefunden (Fig. 2).

3. Art der Drahtdeformation, mechanisches Äquivalent

Der in beiden Drähten in gleicher Richtung fliessende Strom hat die Drähte so stark beschleunigt, dass sie beim Zusammenprall an der Aufschlagfläche flachgepresst wurden. Die in Bewegungsrichtung gemessene Drahtdicke wurde von 5,0 mm auf 3,2...3,5 mm reduziert, dafür war die Aufschlagfläche 7,0...7,2 mm breit. Die beiden Drähte erweckten bei flüchtigem Betrachten den Eindruck eines einzigen, halbierten Drahtes (Fig. 3 und 4). Die Deformation war bis in eine Distanz von 35 mm zu den 300 mm voneinander entfernten Stützen unverändert. Die Drahtsteifigkeit war deshalb gegenüber den Massenkräften vernachlässigbar.

Die scharfen ausgefranzten Drahtkanten bestätigten die Berechnung, wonach die Deformation nicht durch eine Erwärmung der Drähte begünstigt worden war. Mit Fallgewichten wurde ermittelt, welche Energie den festgestellten Deformationen entsprach. Mit Fallkörpern von 9,8 und 49 N (1 und 5 kp) wurde eine Leitungslänge von 10 mm breitgeschlagen. Die resultierende Deformation kann der Fig. 5 entnommen werden. Die Resultate waren gut reproduzierbar.

Im praktischen Fall war allerdings die Masse etwa 50000 mal kleiner als die des grösseren der Fallgewichte, die Aufprallgeschwindigkeit aber entsprechend höher. Ohne Nachprüfung wird man kaum über einen solchen Bereich extrapolieren

dürfen. Die Zulässigkeit der Extrapolation wurde durch Laborversuche erwiesen.

Die festgestellte mittlere Deformation entspricht einer Energie von $W' = 2750 \text{ Ws/m}$.

Der Verformungsenergie entspricht folgende Endgeschwindigkeit:

$$v = \sqrt{\frac{2W}{m}}$$

v Endgeschwindigkeit m/s
 W Energie Ws } auf 1 m Draht bezogen
 m Masse kg }

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 2750}{0,178}} = 175 \text{ m/s}$$

Diese Geschwindigkeit übersteigt immerhin 50% der Schallgeschwindigkeit. Man kann nun berechnen, welcher Strom zur Beschleunigung auf diese Endgeschwindigkeit nötig war.

4. Berechnung der Beschleunigungsenergie

Die elektrodynamische Kraft auf einen Draht beträgt:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i^2 \frac{l}{a} \quad (\text{N})$$

l Länge
 a Abstand
 i Strom in 1 Draht
 μ_0 Permeabilität des leeren Raumes

$$\frac{F}{l} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{i^2}{a} \quad (\text{N/m})$$

Die Beschleunigung beträgt also:

$$b = i^2 \frac{l}{am} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \quad (\text{m/s}^2)$$

m/l Masse (kg/m)

Variable in dieser Gleichung ist primär der Strom (Zeitfunktion des Blitzstromes) und sekundär der Abstand a als Folge der Beschleunigung. Mit Hilfe der Grundgleichungen der Kinematik:

$$b = dv/dt$$

$$v = da/dt$$

lässt sich der Bewegungsablauf berechnen. Anstelle der direkten Lösung der Differentialgleichungen sei eine numerische Integration über den Beschleunigungsweg gewählt. Das Rechenprogramm zeichnet in dieser Darstellung die Drahtgeschwindigkeit in Funktion der Zeit auf. Die Rechnung wird abgeschlossen, wenn der Achsabstand der Drähte 4 mm beträgt, was einer Deformation von 0,5 mm/Draht entspricht, womit berücksichtigt wird, dass der Energieumsatz bei der Berührung der Drähte noch nicht ganz abgeschlossen ist.

Fig. 6 zeigt die Verhältnisse für Ströme der Funktion

$$i = \hat{I} \cdot e^{-t/\tau}$$

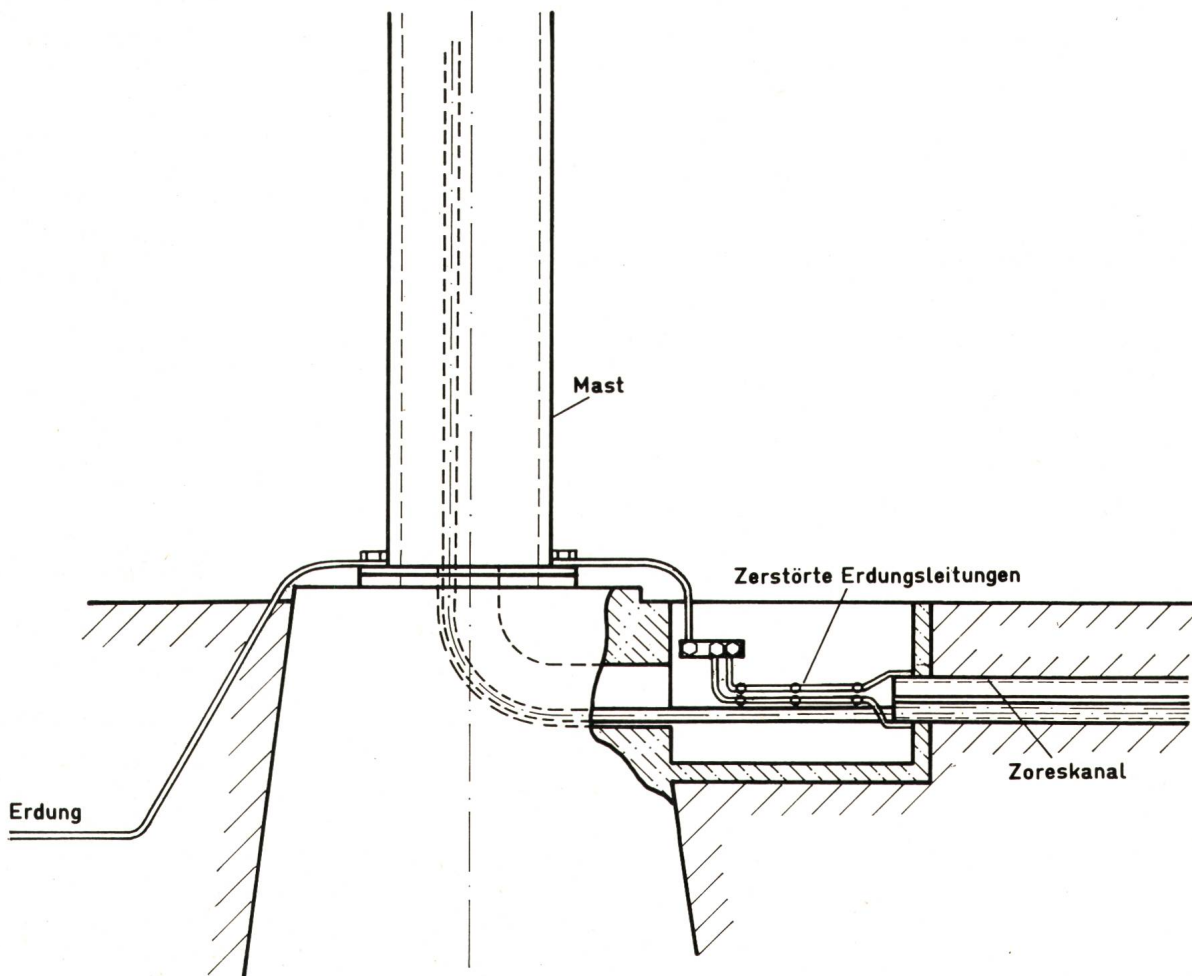


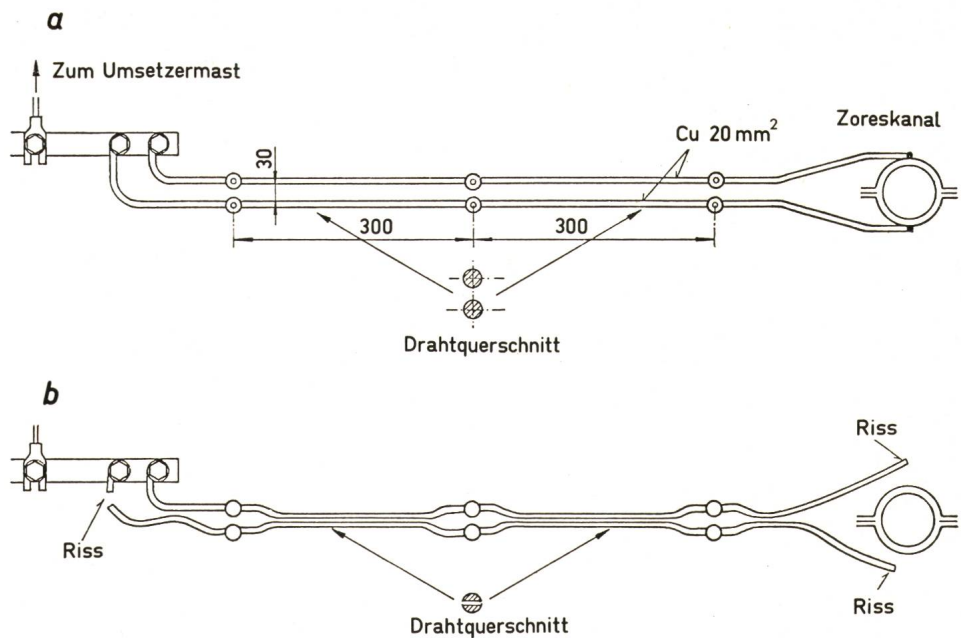
Fig. 1

Fundament des Umsetzermastes mit Kabelzuführung

Beim heute gebräuchlichen Normtyp ist das Kabel bis direkt zur Einführung in den Stahlmast von einem elektrisch durchverbundenen Stahlrohr umgeben

Fig. 2
Verbindungsleitung zwischen Umsetzermast
und Zoreskanal

- a Anordnung der Drahtverbindung
im Neuzustand
b Deformationen durch den Blitzstrom



worin τ , die Zeitkonstante, aus der Rückenhalbwertszeit T_2 , wie folgt berechnet wird:

$$\tau = \frac{T_2}{\ln 2} = 1,4427 T_2$$

Die Berechnung wurde durchgeführt für $T_2 = 100, 250, 500 \mu\text{s}$ und für $T_2 = \infty$ (Gleichstrom) als Grenzfall für extrem lange Stöße. Die Endgeschwindigkeit kann dem Endpunkt der Kurven, deren Parameter der Totalstrom in beiden Drähten ist, entnommen werden.

Die Rechnung zeigt, dass bei einer Halbwertszeit von $100 \mu\text{s}$ ein Stromschieitelwert von weit über 400 kA für die Verformung nötig gewesen wäre,

$$\text{bei } T_2 = 250 \mu\text{s}: \hat{I} = 350 \text{ kA}$$

$$\text{bei } T_2 = 500 \mu\text{s}: \hat{I} = 300 \text{ kA}$$

Eine weitere Vergrößerung der Halbwertszeit bringt keine wesentliche Verringerung des Stromschieitelwertes mehr; sogar ein dauernd fließender Gleichstrom würde noch eine Stromamplitude von 240 kA bedingen.

Als wahrscheinlicher Wert kann daher in den beiden Drähten ein Strom von total

$$\hat{I} = 300 \text{ kA bei } T_2 = 500 \mu\text{s}$$

angenommen werden. Der Blitzstrom, der zum Teil über die lokale Erdung in den Boden floss, war noch höher.

Interessant sind noch folgende Daten, die dem Summenstrom von 300 kA im Zeitpunkt 0 entsprechen (Abstand 30 mm):

$$\text{Beschleunigungskraft: } F = 150000 \text{ N/m (15 t/m)}$$

$$\text{Beschleunigung: } b = 843000 \text{ m/s}^2$$

Wie Fig. 6 zeigt, steigt die Beschleunigung (und natürlich auch die Kraft) gegen das Ende des Beschleunigungsweges sogar auf annähernd den 3-fachen Wert, also auf über 200000-fache Erdbeschleunigung. Der Weg von 13 mm wird in einer Zeit von $170 \mu\text{s}$ zurückgelegt.

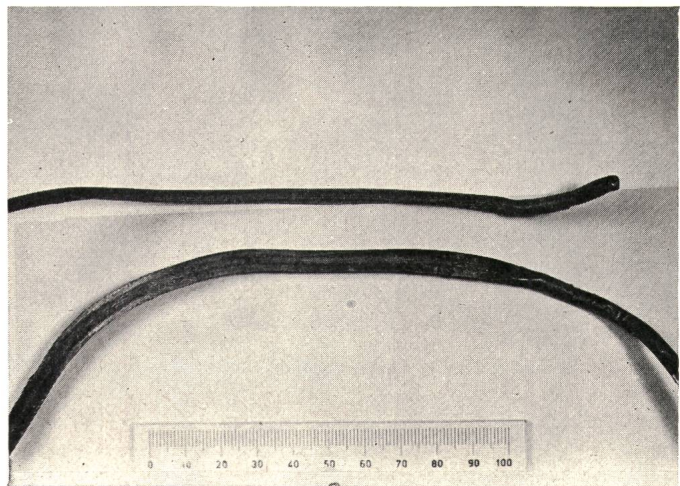


Fig. 3
Deformation der zwei parallelgeführten Drähte durch den hohen Blitzstrom
Die zwei um 90° zueinander verdreht aufgenommenen Drähte zeigen Art und Ausmass der Verformung. Im rund gebliebenen Abschnitt waren die Leiter in Stützen festgeklemmt

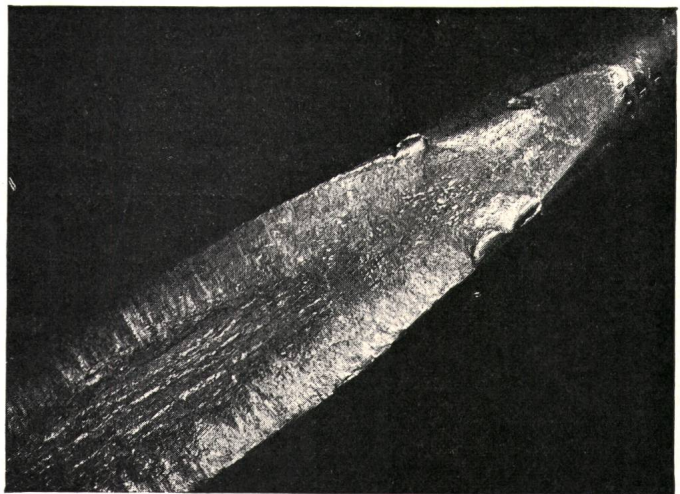


Fig. 4
Detailaufnahmen des Überganges vom runden in den breitgeschlagenen Teil

5. Laborversuche

Mit einem Leistungs-Stossgenerator (9 kV, 434 μF) wurden zwei in 20 mm Achsabstand angeordnete Drähte von je 20 mm² Querschnitt mit einem Strom in Form einer gedämpften Schwingung von 5,5 kHz mit einem Scheitelwert der ersten Halbwelle von 130 kA belastet. Dabei wurden beide Drähte von einem Durchmesser von 5 mm auf 4,8 mm abgeplattet. Nach Fig. 5 entspricht das einer Energie von etwa 125 Ws/m.

Der Strom (Fig. 7) wurde durch folgende Gleichung dargestellt und in das Rechenprogramm eingegeben:

$$i = \hat{I}_0 e^{-t/\tau} \cdot \sin \omega t \quad (\text{Teilstrom in 1 Draht})$$

Bezieht man sich auf den Scheitelwert der ersten Halbwelle, so erhält man den Ausdruck:

$$i = \hat{I} e^{kt} \cdot e^{-t/\tau} \cdot \sin 2\pi f t$$

darin sind für den Prüfstrom:

$$\hat{I} = 65000 \text{ A (pro Draht)}$$

$$f = 5500 \text{ Hz}$$

$$\tau = 324,7 \mu\text{s}$$

Die Geschwindigkeit eines Drahtes in Funktion der Zeit ist der Fig. 8 zu entnehmen. Das v/t -Diagramm zeigt auch, in welchem Mass der Draht durch die einzelnen Halbwellen be-

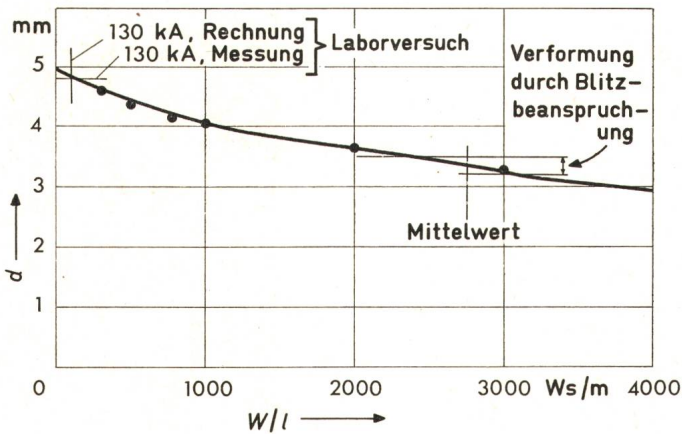


Fig. 5
Deformation eines Cu-Drahtes von $d=5$ mm Durchmesser bei einem Schlagversuch
 W/l Energie pro Längeneinheit

schleunigt wird. Zum Vergleich sind die Geschwindigkeitsdiagramme für 110 und 150 kA Totalstrom ebenfalls berechnet. Geschwindigkeits- und Stromkurve enden im Zeitpunkt des Zusammenpralls. Die Endgeschwindigkeit und die entsprechende Energie pro m Draht betragen:

130 kA	30,5 m/s	82,8 Ws/m
110 kA	21,2 m/s	40 Ws/m
150 kA	39,3 m/s	139,6 Ws/m

Der im Fallgewichtversuch ermittelte Wert für die Verformungsenergie liegt damit höher als dem Rechenwert für 130 kA entspricht; der Vergleich der Werte in Fig. 5 zeigt aber, dass es schwierig sein dürfte, aus der vom niedrigsten Messpunkt bei 300 Ws/m auf Null extrapolierten Kurve eine bessere Übereinstimmung zu finden. Man darf daher aus dem Laborversuch nicht schliessen, dass zur gemessenen Deformation ein etwas höherer Strom gehört als berechnet wird.

6. Diskussion der Resultate

Die Deformation der zwei Kupferleiter zwischen Mast und Zoreskanal des Fernsehumsetzers Eggwil gestattet die Berechnung des in diesen Leitern geflossenen Anteils des Blitzstromes. Bei einer Halbwertszeit von 250 μs würde der Scheitelwert

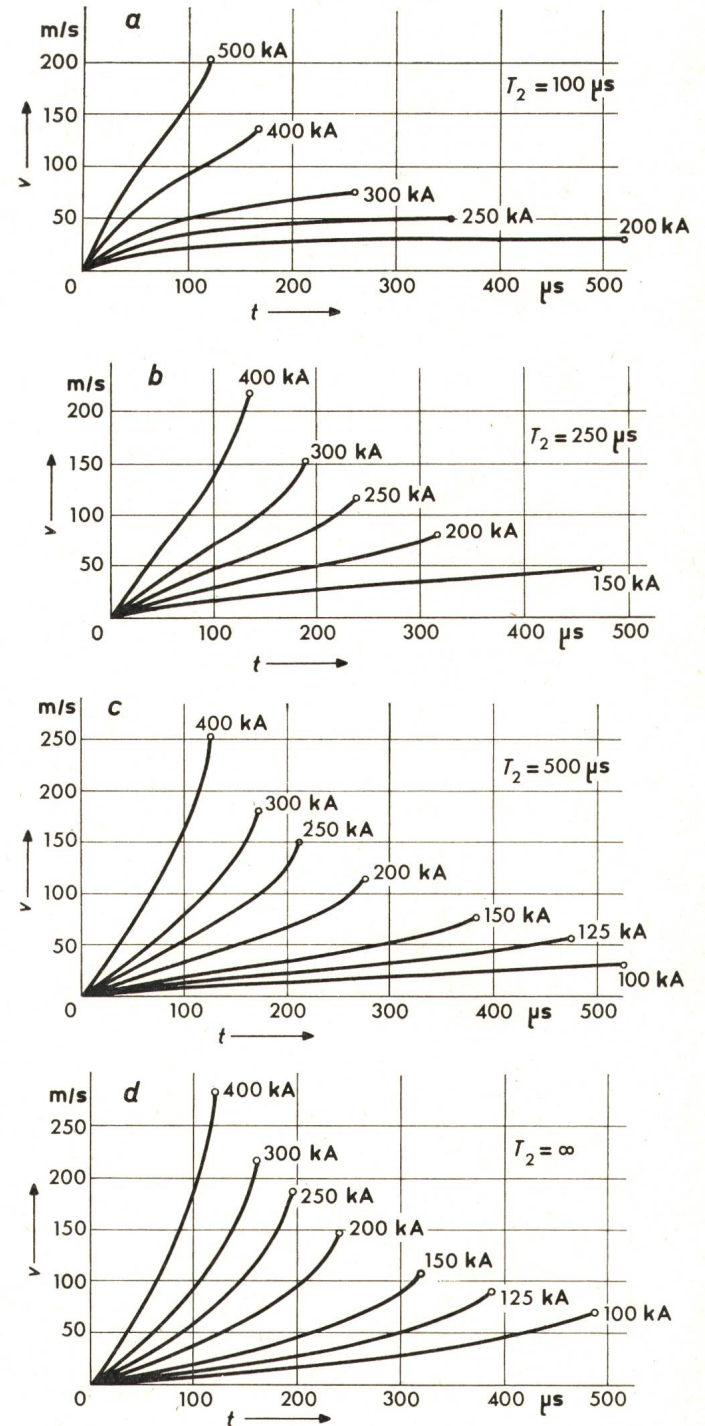


Fig. 6
Geschwindigkeit v stromdurchflossener Drähte durch den Blitzstrom
Drahtquerschnitt 20 mm², Achsabstand 30 mm

Die vom Rechner gezeichneten Kurven zeigen die Geschwindigkeit eines Drahtes in Funktion der Zeit bei einem exponentiell abklingenden Strom mit der Halbwertszeit T_2 . Parameter ist der Scheitelwert des Gesamtstromes

Der Endpunkt der Kurven entspricht dem Zusammenprall der Drähte

- a $T_2 = 100 \mu\text{s}$
- b $T_2 = 250 \mu\text{s}$
- c $T_2 = 500 \mu\text{s}$
- d $T_2 = \infty$

t Zeit; T_2 Ruckenhalbwertszeit

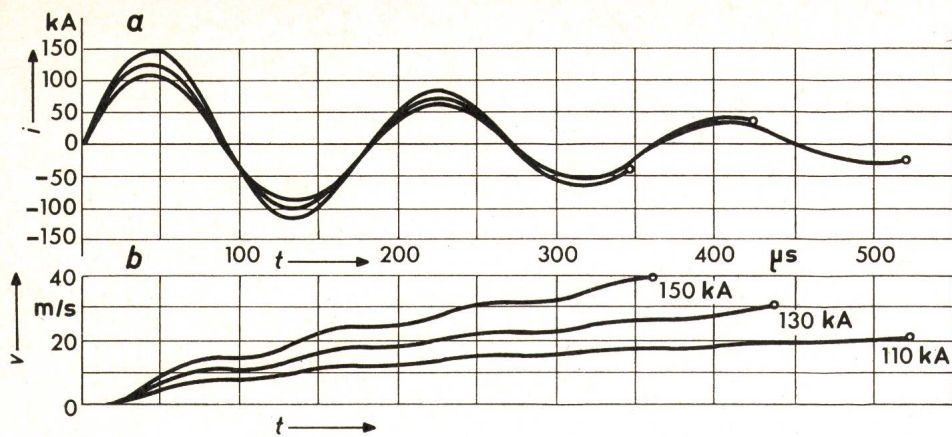


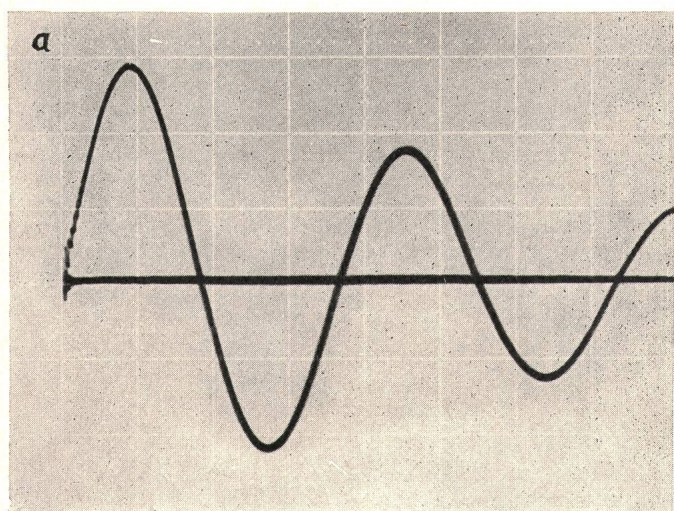
Fig. 8
Geschwindigkeit stromdurchflossener
Drähte beim Laborversuch mit dem Strom
nach Fig. 7

Drahtquerschnitt 20 mm^2
Achsabstand 20 mm

a Strom i (kA)

b Drahtgeschwindigkeit v (m/s)

Der Versuch wurde mit einem Scheitelwert von 130 kA durchgeführt; die beiden andern Fälle zeigen den Einfluss des Stromes auf das Rechenergebnis für die Geschwindigkeit



350 kA betragen, bei $500 \mu\text{s}$ Halbwertszeit 300 kA . Dieses Wertepaar stellt den wahrscheinlichsten Fall dar, noch längere Halbwertszeiten entsprechen nur noch einer geringfügigen Reduktion des Scheitelwertes.

Nach der Auswertung der Abwärtsblitze auf dem Monte San Salvatore liegt die Wahrscheinlichkeit für 300 kA Scheitelwert bei etwa $0,5\%$ aller Blitze, die Stossladung von etwa 215 C entspricht einer Wahrscheinlichkeit von etwa 1% . Die Daten des Stromes entsprechen einem extrem starken positiven Blitz. Blitze aus negativen Wolken sind bedeutend schwächer. Dabei ist zu beachten, dass der Blitzstrom noch stärker war als der gemessene Teilstrom; der Unterschied dürfte aber nicht bedeutend sein.

An der bestehenden Teilnehmerkabelanlage, die mit einem kurzen geschützten Teilstück zum Umsetzer verlängert wurde, entstanden 4 Fehlerstellen. Die Schäden an den technischen Ausrüstungen des Umsetzers waren unbedeutend.

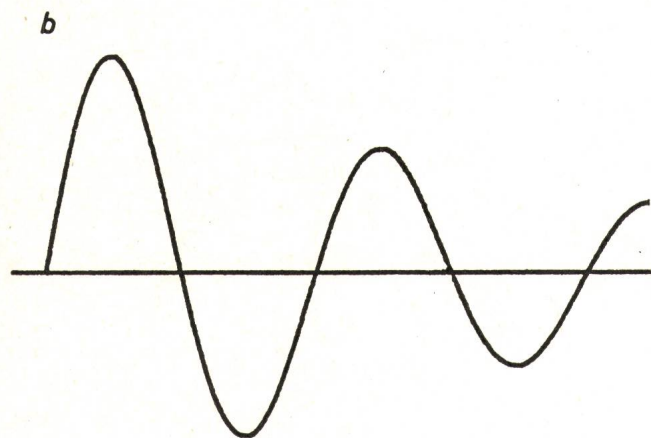


Fig. 7

Laborversuch mit einem Leistungstossgenerator

a Oszillogramm des Stromes

b Nachbildung des Stromoszillogramms mit dem Rechner

Adresse des Autors:

Hans Meister, Adjunkt, Abteilung Forschung und Entwicklung der Generaldirektion PTT, 3000 Bern 29.