Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 58 (1967)

Heft: 12

Artikel: Blitzmodellversuche und Ersatzschaltungen für Erdblitze

Autor: Wiesinger, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916261

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

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

Blitzmodellversuche und Ersatzschaltungen für Erdblitze [1])

Von *J. Wiesinger*, München

621.012.8 : 551.594.221

Es wird ein Überblick über die charakteristischen Blitzmodellversuche zur Ermittlung des Schutzraumes von Blitzableitern und Erdseilen gegeben und gezeigt, dass die Versuche, bei denen die Enddurchschlagstrecke zwischen dem Blitzkopf und der Erde durch eine Stossfunkenentladung nachgebildet wird, prinzipiell richtig sind. Trotzdem können bisher aus den Modellversuchen keine absolut zuverlässigen Angaben für die Schutzräume entnommen werden. Die Modellversuche, bei denen der Blitzstrom bzw. der Blitzfunkenkanal nachgebildet wird, lassen sich den natürlichen Verhältnissen sehr genau anpassen; somit ergeben sich auch quantitativ richtige Resultate. Die Nachbildung der durch Blitzeinschläge in Freileitungen entstehenden Stoßspannungen durch Stoßspannungsgeneratoren wird besprochen. Die wesentlichsten Ersatzschaltungen, die für die gesamte Blitzentladung zwischen Wolke und Erde sowie für bestimmte Teilabschnitte der Blitzentladung angegeben wurden, werden aufgezeigt und kritisch betrachtet.

L'exposé fournit un aperçu des essais de foudre sur maquette les plus caractéristiques, servant à la détermination du périmètre de protection des parafoudres et des fils de terre, et démontre que les essais, dans lesquels la distance de claquage entre la tête de foudre et la terre est imitée par une décharge à étincelle de choc, sont en principe justes. Jusqu'à présent ces essais sur maquettes ne peuvent néanmoins fournir des indications absolument sûres au sujet des périmètres de protection. Les essais sur maquettes imitant le courant de foudre, resp. le canal d'étincelles de la foudre, peuvent s'adapter très exactement aux conditions naturelles et fournir de ce fait des résultats également exacts du point de vue quantitatif. L'auteur discute l'imitation des tensions de choc survenant dans les lignes aériennes par suite de coups de foudre, imitation réalisée au moyen de générateurs à tension de choc. Les circuits équivalents essentiels, indiqués pour la décharge entière d'un coup de foudre survenant entre un nuage et la terre, ainsi que pour certaines parties de cette décharge, sont exposés et soumis à une analyse critique.

Einführung

Es ist sehr schwierig und zeitraubend, die natürlichen Blitze zu messen und statistisch zu erfassen. Deshalb wurde verschiedentlich versucht, durch Modellversuche im Laboratorium zusätzliche Informationen zu erhalten.

Im ersten Teil des Aufsatzes wird eine Reihe charakteristischer Modellversuche besprochen, die durchgeführt wurden, um den Schutzraum von Blitzableitern und Erdseilen zu ermitteln und um die Wirkungen des Blitzstromes festzustellen. Weiterhin wird die Nachbildung der durch Blitzeinschläge in Freileitungen entstehenden Stoßspannungen im Hochspannungslaboratorium diskutiert. Im zweiten Teil werden die wichtigsten elektrischen Ersatzschaltungen aufgezeigt, die für die gesamte Blitzentladung oder für bestimmte Entladungsabschnitte angegeben wurden.

1. Blitzmodellversuche

1.1 Modellversuche, um den Schutzraum von Blitzableitern und Erdseilen zu ermitteln

Die systematische Untersuchung von Blitzfangvorrichtungen mit Hilfe von Funkentladungen im Hochspannungslaboratorium setzte in den zwanziger Jahren ein, als man erkannt hatte, dass die Blitzentladung Ähnlichkeiten mit der Funkenentladung hat, obwohl sich die Schlagweiten und Spannungen in beiden Fällen um mehrere Zehnerpotenzen unterscheiden. Während einige Experimentatoren versuchten, die *gesamte* Entladestrecke von einigen km Länge zwischen der Wolke und der Erde durch die Funkenentladung nachzubilden, vertraten andere die Auffassung, dass nur die *Enddurchschlagstrecke* zwischen dem Blitzkopf und der Erde von einigen 10 bis einigen 100 m Länge durch die Funkenentladung darstellbar sei (Fig. 1). Im folgenden werden beide Auffassungen einander gegenübergestellt und diskutiert.

1.1.1 Nachbildung der gesamten Entladestrecke zwischen Wolke und Erde

In den Jahren von 1926 bis 1941 simulierten *Peek* [1] [2]), *Zalleski* [2], *Wagner, McCann, Maclane* [3] und *Lear* [4] die Enddurchschlagstrecke des Erdblitzes durch eine Funkenentladung, um u. a. den Schutzraum von Blitzableitern und Blitzauffangstangen längs Freileitungen zu ermitteln. Die Wolke wurde hiebei durch eine Platten-, Zylinder- oder Spitzenelektrode nachgebildet, die Blitzableiter wurden durch Stäbe, die auf eine geerdete Platte aufgesetzt wurden, dargestellt. Ein Beispiel für diese Versuchsaufbauten zeigt Fig. 2.

Über die zu verwendende Modellspannungsart war man sich nicht einig; an die die Wolke nachbildende Hochspan-

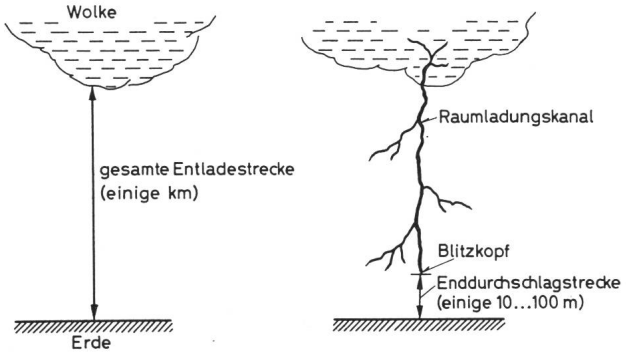

Fig. 1
Zur Definition des Erdblitzes

[1]) Erweiterte Fassung eines auf der Jahreshauptversammlung des Ausschusses für Blitzableiterbau e.V. am 18. Mai 1967 in Braunschweig gehaltenen Referates.

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

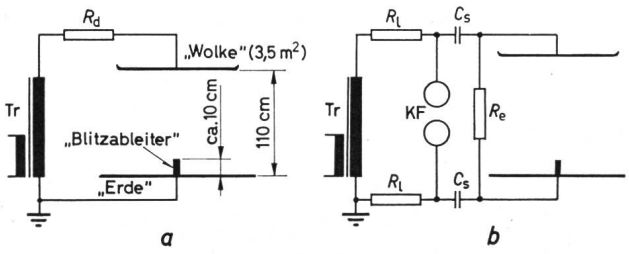

Fig. 2
Prinzip einer von Peek 1926 angegebenen Schaltung zur Schutzraumbestimmung
a Wechselstromentladung; *b* Impulsentladung
C_s Stosskapazität; *KF* Kugelfunkenstrecke; R_d Dämpfungswiderstand; R_e Entladewiderstand; R_l Ladewiderstand; *Tr* Transformator

nungselektrode wurde Wechselspannung, Gleichspannung oder positive Stoßspannung verschiedener Impulsform gelegt.

1.1.2 Nachbildung der Enddurchschlagstrecke zwischen Blitzkopf und Erde

In den Jahren von 1937 bis 1940 machten *Schwaiger* [5; 6], *Ziegler* [7], *Matthias* [8] und *Burkhardtsmaier* [9] Modelluntersuchungen über den Schutzraum von Blitzfangvorrichtungen. 1954 wurden diese Experimente von *Drechsler* [10] nochmals aufgenommen, um die Blitzeinschlaggefährdung von Holzmastleitungen zu ermitteln. Die Experimentatoren bildeten bei ihren Versuchen mit der Hochspannungselektrode nicht mehr die Wolke, sondern den Blitzkopf, d. h. den Kopf des vorwachsenden Raumladungskanales nach. Die Hochspannungselektrode wurde bei allen Versuchen mit einer Stoßspannung (z. B. 0,5|50-Welle, U_{max} = 1,8 MV bei *Schwaiger*) beansprucht.

Schwaiger nahm an, dass bei Freileitungen die unter einem Erdseil befindlichen Leiterseile dann am meisten gefährdet seien, wenn sich der Blitzkopf in Erdseilhöhe und in einem seitlichen Abstand vom Erdseil gleich der Erdseilhöhe befindet. Aus dieser Annahme ergibt sich der Versuchsaufbau nach Fig. 3. Der hierbei ermittelte Schutzraum eines Erdseiles wird durch einen Viertelzylinder begrenzt.

Drechsler setzte bei seinen Experimenten — in Anlehnung an die gegen Ende der zwanziger Jahre von der Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen eV gegebenen Empfehlungen — die Blitzkopfhöhe gleich der doppelten Freileitungsmasthöhe, *Matthias* dagegen nahm die Blitzkopfhöhe als 8...10mal der Höhe der untersuchten Blitzfangvorrichtung an. Wie zu erwarten ist, ergaben sich je nach Voraussetzung unterschiedliche Schutzräume.

Provoost stellte auf der Internationalen Blitzschutzkonferenz 1963 eine geometrische Beziehung zwischen dem Schutzraumwinkel und der angenommenen Blitzkopfhöhe auf. *Golde* [11] konnte nachweisen, dass die Blitzkopfhöhe vor dem Enddurchschlag abhängig von der Ladung und dem Scheitelwert des Blitzstromes ist.

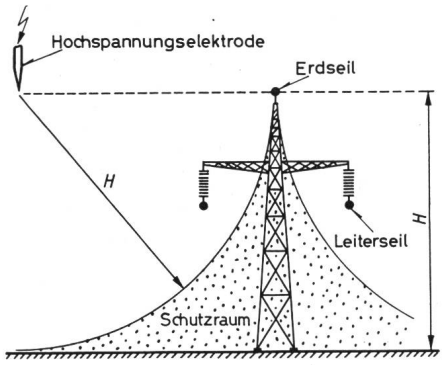

Fig. 3
Prinzip des von Schwaiger 1937 angegebenen Versuchsaufbaus zur Schutzraumbestimmung
H Mastkopfhöhe = Erdseilhöhe

1.1.3 Bemerkungen zu den Modellversuchen zur Schutzraumbestimmung

Die Untersuchungen des Entladungsmechanismus einer Stab-Plattenfunkenstrecke mit einer Schlagweite von 280 cm von *Stekolnikov* und *Shkilyov* [12] haben gezeigt, dass die Blitzentladung zwischen Wolke und Erde sehr verschieden von der Entladung einer Funkenstrecke grosser Schlagweite ist. Somit kann nach dem heutigen Stand der Erkenntnisse die gesamte Entladestrecke zwischen Wolke und Erde durch eine Funkenentladung nicht nachgebildet werden; hiezu wäre, wie *Toepler* schon 1907 festgestellt hat, eine Gleitentladung wesentlich geeigneter.

Die Entladungen von Funkenstrecken zeigen aber — wie sich insbesondere auf Grund der Untersuchungen von *Wagner* und *Hileman* [13] nachweisen lässt — viele Analogien zu der Enddurchschlagphase der Blitzentladung zwischen dem Blitzkopf und der Erde. Die Modelluntersuchungen, bei denen nur der Enddurchschlag nachgebildet wird, sind also als qualitativ richtig zu bezeichnen. Allerdings muss bedacht werden, dass der Blitzkopf eine gasförmige Elektrode darstellt.

Zu den verwendeten Modellspannungen ist zu sagen, dass es wahrscheinlich nicht richtig ist, an die die Enddurchschlagstrecke nachbildende Funkenstrecke eine Stoßspannung üblicher Form (z. B. 1,2|50-Normstoßspannung) zu legen. Um den richtigen zeitlichen Verlauf der Modellspannung ermitteln zu können, wäre es notwendig, die bei den natürlichen Blitzen auftretende Änderung der Feldstärke an der Erde unmittelbar vor der Enddurchschlagphase zu ermitteln und hieraus auf den Anstieg der Spannung zwischen dem Blitzkopf und der Erde, der vielleicht ähnlich dem Anstieg einer Langwelle sein könnte, zu schliessen. Weiterhin sollte die Überlagerung des durch die Wolkenladung gegebenen Gleichspannungsfeldes beachtet werden.

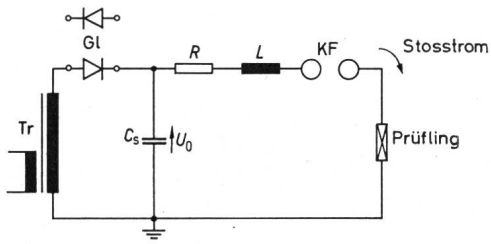

Fig. 4
Prinzipschaltung eines Stoßstromgenerators
C_s Stosskapazität; *Gl* Gleichrichter; *KF* Kugelfunkenstrecke; *L* Induktivität; *R* Ohmscher Widerstand; *Tr* Transformator; U_0 Ladespannung der Stosskapazität

Aus den bisher durchgeführten Modellversuchen im Hinblick auf eine Schutzraumbestimmung können sicherlich nur Tendenzen ersehen aber keine absolut zuverlässigen Daten erwartet werden. Das gleiche gilt auch für die Modellversuche zur Ermittlung des Einschlagortes als Funktion der Bodenbeschaffenheit, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

1.2 Modellversuche, um den Blitzstrom oder den Blitzfunkenkanal nachzubilden

Durch langjährige Messungen u. a. von *Berger* auf dem Monte San Salvatore ist der zeitliche Verlauf des Blitzstromes an der Einschlagstelle bekannt. Diesen Blitzstrom kann man sehr genau nachahmen mit Hilfe eines Stoßstromgenerators, bei dem eine aufgeladene Kondensator-

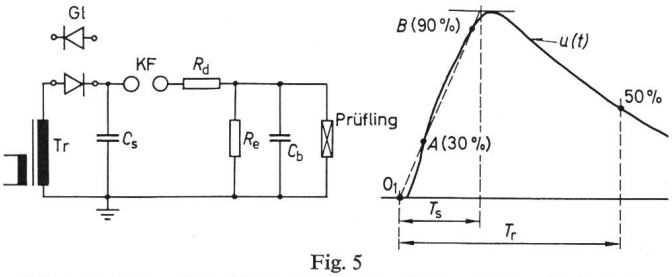

Fig. 5
Prinzipschaltung eines Stoßspannungsgenerators, zeitlicher Verlauf der Stoßspannung
C_b Grundbelastungskapazität; C_s Stosskapazität; *Gl* Gleichrichter; *KF* Kugelfunkenstrecke; R_d Dämpfungswiderstand; R_e Entladewiderstand; *Tr* Transformator; T_r Rückenhalbwertzeit; T_s Stirnzeit

batterie über einen Widerstand und eine Induktivität auf einen Prüfling entladen wird (Fig. 4). Als erster hat *Bellaschi* [14...16] in den Jahren 1934 bis 1941 blitzähnliche Stoßströme erzeugt, wobei er — für viele Untersuchungen berechtigt — den unipolaren Blitzstrom durch einen Schwingstrom ersetzte. *Frühauf* [17] ermittelte aus den vorhandenen Blitzstrommessungen 1961 einen «Normalblitz» (Scheitelwert des Stoßstromes: —35 kA, Stirnzeitkonstante: 1,5 µs, Rückenzeitkonstante: 49 µs) und gab die Schaltung und den Aufbau eines Generators an, mit dem ein solcher Stoßstrom erzeugt werden kann. Mit diesem Generator wurden u. a. thermische, explosive und elektrodynamische Wirkungen des Blitzstromes untersucht.

Mit Hilfe des im Stoßstromlabor erzeugten Lichtbogenkanals kann auch der durch den Blitzstrom geschaffene Funkenkanal erforscht werden. Es interessieren z. B. die Temperatur und der Durchmesser des Blitzkanales sowie seine Wiederverfestigung nach dem Blitzstromende. Zur Analyse des Verhaltens des Blitzkanales bei Mehrfachblitzentladungen im gleichen Kanal in einem zeitlichen Abstand von einigen 10 bis einigen 100 ms, wurden von *McCann, Clark* [18] und dem Autor «Doppelstoßgeneratoren» eingesetzt. Hiebei wird einer Funkenstrecke zunächst ein blitzähnlicher Stoßstrom aufgeprägt und dann nach einer bestimmten Pausenzeit erneut eine Spannung einstellbarer Amplitude an die Funkenstrecke gelegt, die gegebenenfalls eine zweite Entladung bewirkt. Eine ausführliche Darstellung findet sich in dem Aufsatz «Stoßstromionisierte Funkenstrecken» [19].

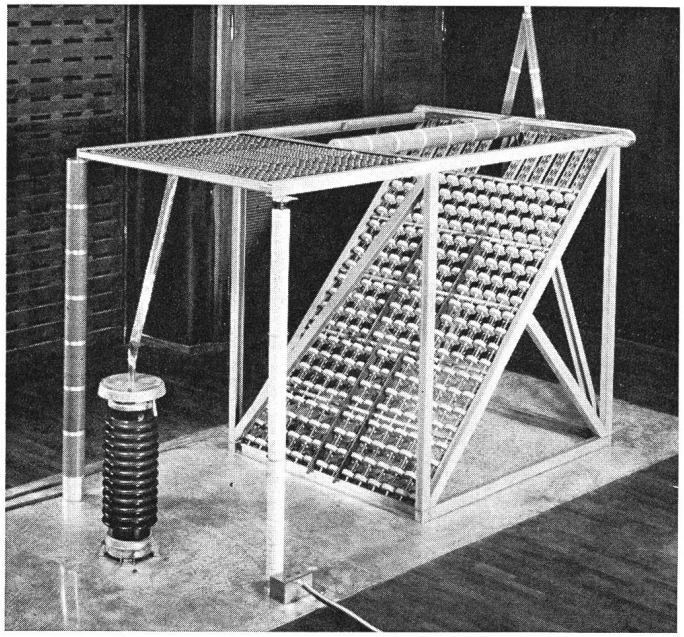

Fig. 6
800-kV-Steilimpulsgenerator von Kärner
Länge 2,6 m; Breite 1,4 m; Höhe 1,7 m; Gewicht ca. 300 kg

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich Modellversuche mit Stoßströmen den natürlichen Verhältnissen sehr genau anpassen lassen und dass deshalb auch quantitativ richtige Ergebnisse erwartet werden können.

1.3 Nachbildung von Stoßspannungen, die durch Blitzeinschläge in Freileitungen entstehen

Der Blitzstrom ist in der Regel ein etwa exponentiell ansteigender und exponentiell abfallender Stromimpuls. Fliesst der Blitzstrom in eine Freileitung, so entsteht eine Stoßspannung, die etwa den gleichen zeitlichen Verlauf wie der Blitzstrom hat und sich entlang der Leitung ausbreitet. Um die Wirkungen dieser Stoßspannungen auf die elektrischen Anlagenteile untersuchen und die Isolation entsprechend koordinieren zu können, werden im Laboratorium künstliche Stoßspannungen mit Stoßspannungsgeneratoren erzeugt (Fig. 5). Diese Stoßspannungen sind u. a. in den

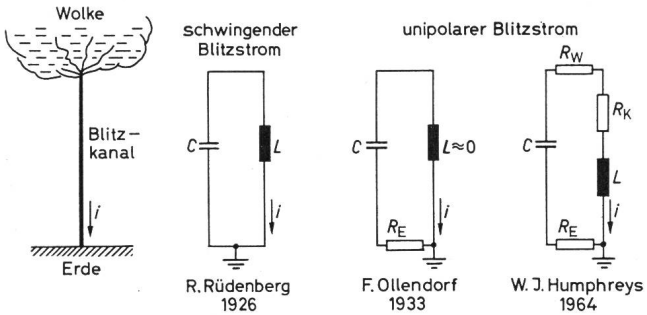

Fig. 7
Ersatzschaltungen für die Blitzentladung zwischen Wolke und Erde
i Blitzstrom; *C* Kapazität; *L* Induktivität des Blitzkanals; R_E Erdwiderstand; R_K Widerstand des Blitzkanals; R_W Wolkenwiderstand

VDE-Vorschriften 0433/Teil 3 genormt: sie haben eine Stirnzeit von 1,2 µs und eine Rückenhalbwertzeit von 50 µs.

Für viele Untersuchungen scheint aber nach neueren Erkenntnissen eine Beanspruchung mit genormten Stoßspannungen, die z. B. bei 600 kV Scheitelwert nur eine Spannungssteilheit von 0,5 MV/µs aufweisen, nicht auszureichen; *Berger* und *Vogelsanger* [20] haben nämlich in den letzten Jahren festgestellt, dass bei multiplen Blitzen Stromsteilheiten bis zu 80 kA/µs möglich sind. Als Folge können bei direkten Einschlägen in Freileitungen oder Schaltanlagen örtlich begrenzte, sehr rasch ansteigende, keilwellenförmige Stoßspannungen bis zu einigen 10 MV/µs auftreten [21]. Werden diese Keilwellen durch Überspannungsableiter in ihrer Amplitude begrenzt, entstehen Stoßspannungen, deren Stirnzeiten bei einigen 10 ns liegen können.

Derartig rasch ansteigende Stoßspannungen lassen sich mit herkömmlichen Stoßspannungsgeneratoren nicht realisieren. Am Institut für Hochspannungstechnik der TH München wurde deshalb von *Kärner* [22] ein Steilimpulsgenerator erstellt, der bei einer maximalen Spannung von 800 kV Stirnsteilheiten bis zu 50 MV/µs erzeugen kann. Den Aufbau dieses Generators, der als «Nachkreis» zusammen mit einem 1-MV-Stoßgenerator herkömmlicher Bauform betrieben wird, zeigt Fig. 6.

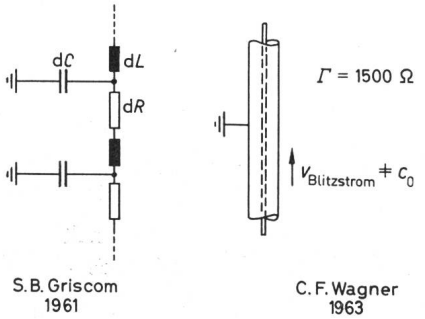

Fig. 8
Ersatzschaltungen für den Blitzkanal
c_0 Lichtgeschwindigkeit; dC Teilkapazität gegen Erde; dL Teilinduktivität; dR Teilwiderstand; Γ Wanderwellenwiderstand

2. Ersatzschaltungen für Erdblitze

Verschiedentlich wurde versucht, die Blitzentladung in einem elektrischen Ersatzschaltbild darzustellen. So haben 1926 *Rüdenberg* [23], 1933 *Ollendorf* [24] und 1964 *Humphreys* [25] die Blitzentladung zwischen Wolke und Erde durch einen Serieresonanzkreis beschrieben (Fig. 7). Hiezu wurde das elektrische Feld zwischen der Gewitterwolke und der Erde durch eine geladene Kapazität und der Blitzkanal durch eine u. U. widerstandsbehaftete Induktivität dargestellt. Aus den Ersatzschaltungen lässt sich der Blitzstrom berechnen. Nach *Rüdenberg* ergibt sich ein — inzwischen als nicht existent erkannter — schwingender Blitzstrom, nach *Ollendorf* und *Humphreys* bei überkritischer Bedämpfung des Serieresonanzkreises ein unipolarer Blitzstrom.

Ein differenziertes Ersatzschaltbild für den Blitzkanal wird von *Griscom* [26] und *Wagner* [27] in den Jahren um 1960 angegeben. Der von der Wolke zur Erde vorgeschobene Raumladungskanal, den der lichtstarke Erdblitz entlädt, wird von *Griscom* durch *R-C-L*-Glieder nachgebildet, von *Wagner* durch eine Wanderwellenleitung (Fig. 8). Man hatte erkannt, dass sich der Raumladungskanal, der aus einem gut leitenden Kern mit einigen mm Durchmesser sowie einer Koronahülle mit einigen m Durchmesser und einer Ladung von einigen 100 µC/m besteht [28], nicht mit Lichtgeschwindigkeit in den stromstarken Blitzkanal umbilden kann. Vielmehr läuft die Entladewelle nur mit einer Geschwindigkeit zwischen 10 und 50 % der Lichtgeschwindigkeit in dem Raumladungskanal nach oben. Die Vorwachsgeschwindigkeit ist dadurch gegeben, wie schnell sich der leitende Kern im Raumladungskanal in den Blitzkanal umbilden, und wie schnell die in der Koronahülle gespeicherte Ladung dem Blitzkanal durch eine Unzahl kleiner Plasmakanäle zugeführt werden kann.

Auf ein von *Griscom* [29] angegebenes Ersatzschaltbild aus Wellenwiderständen und Kapazitäten, mit dem die Mastspitzenspannung beim Blitzeinschlag errechnet werden soll, sei nur am Rande hingewiesen.

Eine vom Autor angegebene Ersatzschaltung [19] zur Abschätzung der maximal möglichen Blitzstromsteilheit, die beim Enddurchschlag auftritt, zeigt Fig. 9. Es lässt sich nachweisen, dass die maximale Stromsteilheit durch den Quotienten aus der Spannung an der Enddurchschlagstrecke U und der Induktivität des Blitzkanales in dieser Strecke L bestimmt wird; sie ergibt sich zu 200 kA/µs.

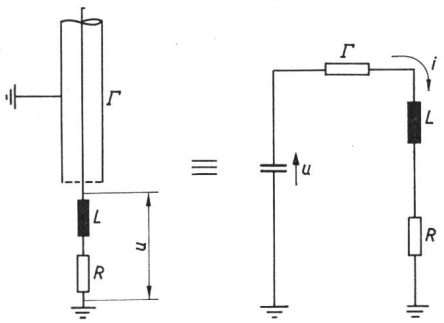

Fig. 9
Ersatzschaltung für die Enddurchschlagstrecke
i Blitzstrom; L Induktivität des Blitzkanales in der Enddurchschlagstrecke; R Widerstand des Blitzkanals in der Enddurchschlagstrecke; u Spannung an der Enddurchschlagstrecke; Γ Wanderwellenwiderstand des Raumladungskanals

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Ersatzschaltungen nur zur Abschätzung einzelner Grössen und Grenzwerte der Blitzentladung dienen können. Die aus vielen Einzelphasen bestehende Blitzfunkenentladung (Vorwachsen des Raumladungskanals, Enddurchschlag, Entladung des Raumladungskanals durch den Blitzstrom) lässt sich aber nicht exakt mit konzentrierten Elementen oder Wanderwellenleitungen nachbilden. Die Ersatzschaltungen für die Erdblitze können ebenso wie etwa die Modellversuche zur Schutzraumbestimmung nur Hilfsmittel für die Blitzforschung sein, sie können aber keinesfalls die schwierigen und zeitraubenden Messungen der natürlichen Blitze entbehrlich machen.

Literatur

[1] *F. W. Peek:* Abridgment of Lightning. A Study of Lightning Rods and Cages, with Special Reference to the Protection of Oil Tanks. J. AIEE 45(1926)12, S. 1246...1254.

[2] *A. M. Zalesski:* Recherches sur modèles relatives à la protection des lignes et des sousstations contre les décharges de la foudre. Rapport CIGRE No. 317, 1935,

[3] *C. F. Wagner, G. D. McCann* and *G. L. MacLane:* Shielding of Transmission Lines. Trans. AIEE 60(1941)6, S. 313...328.

[4] *C. F. Wagner, G. D. McCann* and *C. M. Lear:* Shielding of Substations. Trans. AIEE 61(1942)2, S. 96...100.

[5] *A. Schwaiger:* Die Blitzanfälligkeit von Leitungsanlagen. E u. M 55(1937)31, S. 369...375.

[6] *A. Schwaiger:* Über den Schutzwert der Erdseile. ETZ 58(1937)19, S. 507...508.

[7] *A. Schwaiger* und *H. Ziegler:* Die Blitzschutzwirkung von Erdseilen bei elektrischen Leitungsanlagen. Mitteilungen der Rosenthal-Isolatoren GmbH 23(1939).

[8] *A. Matthias:* Modellversuche über Blitzeinschläge. ETZ 58(1937)32, S. 881...883, Nr. 34, S. 928...930 + Nr. 36, S. 973...976.

[9] *A. Matthias* und *W. Burckhardtsmaier:* Der Schutzraum von Blitzfangvorrichtungen und seine Ermittlung durch Modellversuche. ETZ 60(1939)23, S. 681...687 + Nr. 24, S. 720...726.

[10] *E. Drechsler:* Die Blitzeinschlaggefährdung von Freileitungen im Modellversuch. Deutsche Elektrotechnik 8(1954)5, S. 182...187.

[11] *R. H. Golde:* Theoretische Betrachtungen über den Schutz von Blitzableitern. ETZ-A 82(1961)9, S. 273...277.

[12] *I. S. Stekolnikov* and *A. V. Shkilyov:* New Data on Negative Spark Development and its Comparison with Lightning. In: Gas Discharge and the Electricity Supply Industry. London, Butterworth 1962, S. 27...37

[13] *C. F. Wagner* and *A. R. Hileman:* Surge Impedance and its Application to the Lightning Stroke. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 80(1962)58, S. 1011...1022.

[14] *P. L. Belaschi:* Heavy Surge Currents. Generation and Measurement. Electr. Engng. 53(1934)1, S. 86...94.

[15a] *P. L. Bellaschi:* Lightning Strokes in Field and Laboratory. Part I. Electr. Engng. 54(1935)8, S. 837...843.

[15b] *P. L. Bellaschi:* Lightning Strokes in Field and Laboratory. Part II. Electr. Engng. 56(1937)10, S. 1253...1260.

[15c] *P. L. Bellaschi:* Lightning Strokes in Field and Laboratory. Part III. Electr. Engng. 60(1941)–, S. 1248...1256.

[16] *P. L. Bellaschi:* Stossvorgänge in der Natur und im Versuchsfeld. (Referat von 15b) ETZ 59(1938)6, S. 154.

[17] *G. Frühauf:* Modellmessungen mit Blitzströmen. ETZ-A 82(1961)9, S. 265...272.

[18] *G. D. McCann* and *J. J. Clark:* Dielectric-Recovery Characteristics of Large Air Gaps. Trans. AIEE 62(1943)1, S. 45...52.

[19] *J. Wiesinger:* Stoßstromionisierte Funkenstrecken. Bull. SEV 57(1966)4, S. 139...149.

[20] *K. Berger* und *E. Vogelsanger:* Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.

[21] *J. Wiesinger:* Absinken der elektrischen Festigkeit von Funkenstrecken bei steilen Stoßspannungen. Bull. SEV 58(1967)3, S. 113...118.

[22] *H. Kärner:* Die Erzeugung steilster Stoßspannungen hoher Amplitude. Dissertation Technische Hochschule München 1967.

[23] *R. Rüdenberg:* Elektrische Schaltvorgänge: 2. Auflage. Berlin, Springer 1926.

[24] *F. Ollendorf:* Versuch einer Theorie der Blitzsäule. Arch. Elektrotechn. 27(1933)3, S. 169...184.

[25] *W. J. Humphreys:* Physics of the Air. Chapter 18: Lightning. 3. Auflage. New York, Dover Publications, 1964.

[26] *C. F. Wagner* and *A. R. Hileman:* The Lightning Stroke. Part II. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 80(1961)56, S. 622...642. (Discussion S. B. Griscom).

[27] *C. F. Wagner:* Der Blitz und sein Einfluss auf das Verhalten von Freileitungen. ETZ-A 84(1963)16, S. 517...530.

[28] *C. F. Wagner* and *A. R. Hileman:* The Lightning Stroke. Part II. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 80(1961)56, S. 622...642.

[29] *S. B. Griscom:* The Prestrike Theory and other Effects in the Lightning Stroke. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 77(1958)–, S. 919...933.

Adresse des Autors:
Dr.-Ing. *Johannes Wiesinger*, Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München, Arcisstrasse 21, D-8 München 2.