

F. Schwab, Zürich

Berechnung der Schutzwirkung von Blitzableitern und Türmen

Berechnung der Schutzwirkung von Blitzableitern und Türmen

Von F. Schwab, Zürich

621.316.98

Ausgehend von der Ladung des Blitzkanals wird die letzte Schlagweite zwischen Blitzkopf und geerdetem Objekt berechnet. Daraus wird das Blitzeinzugsgebiet und die bezogene Einschlagshäufigkeit von Türmen bestimmt. Ferner wird die Schutzwirkung verschiedener Blitzableiteranordnungen und die zulässige Maschenweite von Faraday-Käfigen abgeleitet.

En partant de la charge du canal de la foudre, l'auteur calcule la dernière distance disruptive entre la tête de l'éclair et l'objet mis à la terre, ce qui permet de déterminer la zone de captation des éclairs et la fréquence des coups de foudre reçus par des tours. L'auteur en déduit en outre l'effet de protection de diverses dispositions de paratonnerres et la largeur de maille admissible de cages de Faraday.

Die früher aufgestellten Schutzraumtheorien über Blitzableiter stützten sich auf rein empirische Annahmen ohne physikalische Grundlagen und mussten, da sie keine befriedigende Resultate zeigten, immer wieder abgeändert werden. Der sog. Blitzschutzwinkel wurde mit der Zeit von 90° auf 45° , 30° und noch weiter herabgesetzt, ohne dass je ein vollständiger Blitzschutz erreicht wurde.

Physikalisch erwiesene Grundlagen, die die Schutzwirkung von Erdseilen, Blitzableitern und ähnlichen Anordnungen erfassten, wurden erst durch die Blitzforschung der letzten zwanzig Jahre geschaffen. In der Zeit konnte erstmals der Vorwachsmechanismus des Leitblitzes mittels der schnell rotierenden Boys-Kamera, in der der Film mit einer Geschwindigkeit von bis zu 50 m/s hinter dem Objekt vorbei bewegt wird, untersucht werden [1; 2] ¹⁾. Aus solchen Aufnahmen wurde ersichtlich, dass der Leitkanal ruckweise in Stufen von 10...100 m mit zeitlichen Ruhepausen von 40...120 μ s von der Wolke gegen Erde vorwächst. Der auf diese Weise entstandene Leitkanal entspricht einem geladenen elektrischen Leiter, genauer gesagt, einem hochionisierten Lichtbogenkanal. Sobald die mittlere Feldstärke zwischen Blitzkopf und Erde auf ca. 3 kV/cm angestiegen ist, kommt es zum Überschlag. Russische Messungen der 50-%-Überschlagsspannung grosser Abstände in Luft bei Wechselspannung ergaben an einer Spitzen-Spitzen-Anordnung einen Scheitelwert von 2,8 MV bei einem Abstand von 8,5 m [3]. Das ergibt eine mittlere Feldstärke von 3,3 kV/cm und kann mit einer Leitkanal-Blitzableiter-Anordnung verglichen werden. Diese Feldstärke und die Spannung des Blitzkanals bestimmen die letzte Schlagweite des Blitzes. In diesem Bereich gilt vermutlich noch das Gesetz der kürzesten Schlagweite, das durch tausende Versuche für Spannungen bis 1,5 MV mit einer Streuung kleiner als 3 % erwiesen wurde [4]. Der Einfluss der Form und des Ortes der Gegenelektrode ist gering: die Berechnung der elektrostatischen Feldänderung des homogenen Feldes über der Erde durch einen 50 m über dem Erdboden angeordneten geerdeten Leiter mit Hilfe der

einfachen Spiegelung zeigt, dass in einem horizontalen Abstand von 50 m vom Leiter die Störung des Feldes schon weniger als 10 % beträgt. Im Hochspannungs-Laboratorium der ETH wurde im elektrolytischen Trog der Feldverlauf in der Umgebung der Blitzforschungsstation der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen auf dem Monte San Salvatore [1] ausgemessen, und zwar einmal ohne und einmal mit dem 70 m hohen Antennenturm der zuoberst die Blitzauffangnadel trägt. Fig. 1 zeigt einen schematischen Schnitt durch den Monte San Salvatore auf der Verbindungslinie der beiden Blitzauffangtürme mit dem gemessenen Feld. Die ausgezogenen Feldlinien entsprechen dem vorhandenen Feldbild mit dem Turm, die gestrichelten demselben ohne den Turm. Daraus ist ersichtlich, dass der Turm auf der Höhe von 60 m über dem Fusspunkt das Feldbild nur auf eine horizontale Distanz von etwa 60 m zu ändern vermag, auf einer Höhe von etwa 10 m sogar nur auf 25 m.

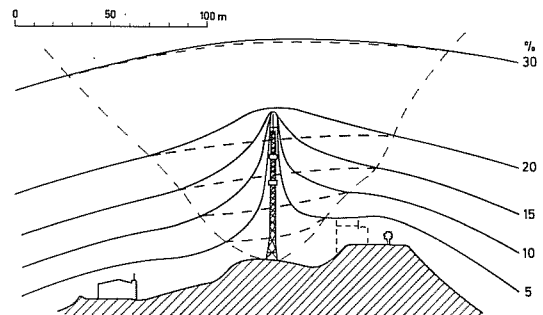


Fig. 1
Blitzforschungsstation Monte San Salvatore
Feldverlauf mit und ohne Blitzauffangturm. Wolkenhöhe 500 m über der Spitze vom Turm (das elektrische Feld der Wolke gegen Erde = 100 %)

Die elektrische Feldstärke zwischen Blitzkopf und Erde ist von der Grösse der Ladung im Blitzkanal und ihrer räumlichen Verteilung längs der Achse des Kanals abhängig. Über die Ladungsdichte q , also die auf die Längeneinheit bezogene

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Ladung Q des Kanals, gehen die Meinungen auseinander. *Golde* nimmt an, dass sie am Kopf am grössten ist und gegen die Wolke hin exponentiell abnimmt [5]. *Pierce* hingegen findet es wahrscheinlicher, dass die Ladungsdichte im mittleren Kanalteil am grössten sei [6]. Bei früheren Autoren lag das Ladungsmaximum in der Wolke. Für die Berechnung nimmt man daher am einfachsten eine konstante Ladungsdichte q über der ganzen Kanallänge l an:

$$q = \frac{Q}{l}$$

wobei Q die Gesamtladung des ganzen Kanals bedeutet. Durch die Ladung Q ist auch der Strom des Hauptblitzes gegeben:

$$Q = \hat{i} T$$

Nimmt man für die Halbwertszeit T den Wert $50 \mu\text{s}$ als konstant für alle Blitze an, so wird der Stromscheitelwert \hat{i} proportional der Ladung Q :

$$\hat{i} = 2 \cdot 10^4 Q$$

und man kann für jeden Stromscheitelwert \hat{i} die mittlere Feldstärke E_m bei allen Schlagweiten h berechnen.

Der Durchmesser d des zylinderförmigen Leitkanals variiert entsprechend der Ladung. Der Gradient der Feldstärke an dessen Oberfläche ist proportional q/r . Der Koronaeffekt vergrössert bei steigender Ladung den Radius r der Glimmhülle, bis an der Zylinderoberfläche eine Feldstärke von 20...30 kV/cm erreicht ist. Das entspricht ungefähr einem Meter Radius pro Coulomb Ladung. Mit Hilfe eines gespiegelten Leitkanals auf der gegenüberliegenden Seite der Erdoberfläche kann die Spannung des Leitkanals gegen Erde für vertikal vorwachsende Blitze gerechnet werden. In einem Abstand vom Blitzkopf kleiner als der Radius des Kanals gilt gegen Erde:

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{l} \ln \frac{l + \sqrt{d^2 + l^2}}{-l + \sqrt{d^2 + l^2}} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{l} \ln \frac{4h + 3l + \sqrt{d^2 + (4h + 3l)^2}}{4h + l + \sqrt{d^2 + (4h + l)^2}}$$

Q Ladung des Kanals [C];

d Durchmesser der Glimmhülle [m];

h Schlagweite [m];

l Länge des Kanals [m];

Im vorliegenden Fall ist aber d^2 gegen l^2 sehr klein, so dass folgende Vereinfachung möglich ist:

$$U = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{l} \ln \frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4h + l}{4h + 3l}}$$

Um die mittlere Feldstärke E_m zu erhalten, wird durch die Schlagweite h dividiert:

$$E_m = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{hl} \ln \frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4h + l}{4h + 3l}}$$

Der Anfang des Kanals innerhalb der Wolke, die sog. Gewitterzentrumshöhe H , wurde mit $1\frac{1}{2}$, 2, 3, 4 und 5 km über dem Erdboden angenommen, das heisst, $H = h + l = 1500, 2000, 3000, 4000$ und 5000 m. Die so gerechneten mittleren Feldstärken E_m sind in Funktion der Schlagweite h in Fig. 2 für $H = 3$ km für verschiedene Ladungen Q als Parameter aufgetragen.

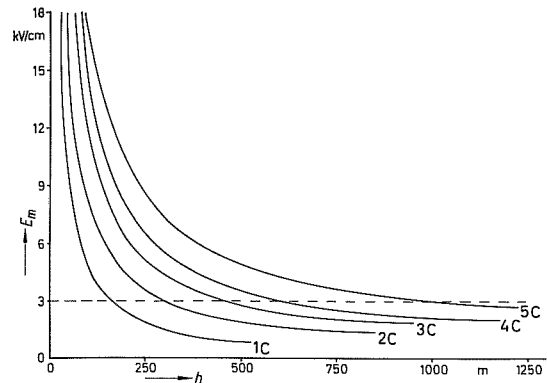


Fig. 2
Mittlere elektrische Feldstärke E_m unter dem Leitkanal in Funktion von dessen Höhe h über dem Erdboden für verschiedene Ladungen Q bei einer Gewitterzentrumshöhe H von 3 km

Diese Berechnungen zeigen, dass sich bei niedrigen Gewitterzentrumshöhen H grosse Ladungen und somit grosse Blitzstromscheitelwerte gar nicht aufbauen können, da die mittlere Feldstärke von 3 kV/cm vorher erreicht wird. Das bedeutet, dass grosse Ladungen mit relativ niedrigen Stromscheitelwerten, aber mit langen Halbwertszeiten als sog. Gleichstromblitze in die Erde schlagen. Die maximal möglichen Stromscheitelwerte \hat{i} betragen bei einer Gewitterzentrumshöhe $H = 1,5$ km 60 kA, bei $H = 2$ km 100 kA und bei $H = 3$ km 180 kA. Das erklärt jene Erfahrung, wonach stromstarke Blitze häufiger in der Ebene [10] als im Gebirge vorkommen. Die stromstärksten Blitze, die auf dem Monte San Salvatore gemessen wurden, hatten von total 653 registrierten Blitzen [11] (mit einer einzigen Ausnahme während 18 Jahren) eine Stromstärke von 105 kA.

Schneidet man die entsprechende Kurvenschar der fünf verschiedenen Gewitterzentrumshöhen H mit der Geraden $E_m = 3$ kV/cm, so bekommt man für jedes H die Abhängigkeit der Schlagweite h von der Ladung Q und somit auch vom Blitzstrom \hat{i} , wie dies in Fig. 3 für die fünf Gewitterzentrumshöhen $H = 1,5; 2; 3; 4$ und 5 km dargestellt wurde. Wenn die kritische mittlere Feldstärke von 3 kV/cm erreicht ist, entscheidet nur noch die räumliche Lage der geerdeten Objekte, welches vom Blitz getroffen wird. Dabei spielt es keine Rolle, ob diese Schlagweite durch eine Fangentladung vom geerdeten Objekt nach oben oder als letzte Stufe des nach unten vorwachsenden Blitzes überwunden wird. Zudem

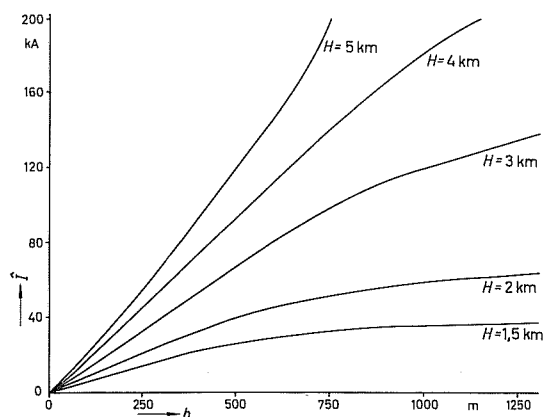


Fig. 3
Schlagweite h in Funktion des Blitzstromes I für verschiedene Gewitterzentrumshöhen H

kann in Fig. 3 die Spannung zwischen Blitzkopf und Erde herausgelesen werden, indem für jedes Q das entsprechende h mit 3 kV/cm multipliziert wird.

Man erkennt, dass besonders bei niedrigen Gewitterzentrumshöhen H die Schlagweiten h auch für relativ kleine Blitzströme sehr gross werden. Das erklärt die Tatsache, dass man mit Hilfe der Boys-Kamera nur selten den Ruckstufen-Mechanismus aus der Nähe photographieren kann. Wenn der Blickwinkel der Kamera nicht extrem gross ist, bekommt man nur sehr stromschwache Blitze auf den Film, die eventuell schon zu schwach leuchten, um die Emulsion schwärzen zu können.

Als nächstes muss der geometrische Ort aller Punkte mit gleichen Distanzen von allen möglichen Lagen des Blitzkopfes zu dem gefährdeten Objekt (Turm, Haus oder Freileitung [7]) und zur Erde gesucht werden, um die Blitzeinschlagsgrenze fest zu legen. Zeichnet man im Falle des Blitzeinfallturmes 1 der Blitzmessstation am Monte San Salvatore nach Fig. 4 den geometrischen Ort aller Punkte gleicher Distanz zum Turm wie zur Erde ein, so erkennt man, dass die so konstruierte Kurve mit der Kurve der Reichweite der Störung des Feldes auf dem San Salvatore durch den Turm 1 nach Fig. 1 praktisch zusammenfällt. Nun werden mit Hilfe

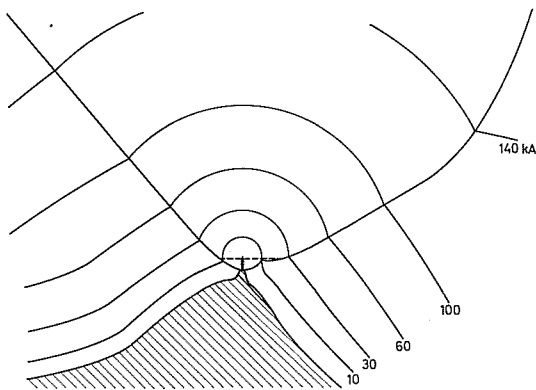


Fig. 4
Blitzeinzugsgebiet des Turmes 1 der Blitzforschungsstation am Monte San Salvatore

der Fig. 3 für verschiedene Blitzstromstärken die entsprechenden Schlagweiten h eingezeichnet, zum Beispiel für eine Gewitterzentrumshöhe H von 3 km , woraus die in Fig. 4 eingezeichneten Halbkreise und Kurven entstehen. Auf diesen Halbkreisen und Kurven muss sich ein Blitzkopf mit der entsprechenden Ladung Q , bzw. dem Strom \hat{i} entscheiden, wohin er einschlägt. Alle Blitze mit der Ladung Q bzw. der Stromstärke \hat{i} , die beim vertikalen vorwachsen den entsprechenden Kreis mit dem Parameter \hat{i} oberhalb der Grenzkurve treffen, werden in den Turm einschlagen, alle unterhalb der Grenzkurve befindlichen Blitzköpfe in den Berg.

Es stellt sich nun die Frage, welchem Blitzeinzugsgebiet der 70 m hohe Turm für jede Blitzstromstärke entspricht. Alle Turmeinschläge unterhalb der horizontalen Geraden in der Fig. 4 fallen weg, da die Blitze, die nicht in die Nadel einschlagen, für die Messung verloren sind. Wird nun die oben beschriebene Konstruktion für mehrere andere Schnitte, d. h. vertikale Ebenen mit anderen Richtungen, durch den Turm 1 ausgeführt, so bekommt man eine räumliche Darstellung der Blitzeinzugsgebiete oder Wirkungsquerschnitte der verschiedenen Blitzstromstärken aller Blitze die in die Auf-

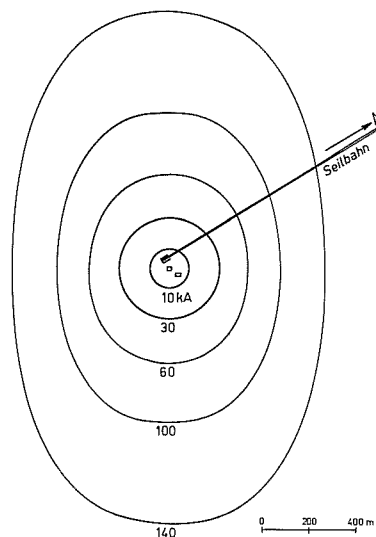


Fig. 5
Wirkungsquerschnitte bei einer Gewitterzentrumshöhe von $H = 3 \text{ km}$ am Turm 1 der Blitzforschungsstation am Monte San Salvatore

fangnadel einschlagen. In Fig. 5 sind diese Wirkungsquerschnitte für fünf Blitzstromstärken bei einer Gewitterzentrumshöhe von $H = 3 \text{ km}$ im Grundriss gezeichnet. Das Einzugsgebiet für 60 kA -Blitze ist z. B. $0,424 \text{ km}^2$, für 140 kA -Blitze aber schon $2,2 \text{ km}^2$. Wenn man die Blitzhäufigkeit in Funktion der Stromstärke für ein bestimmtes Gebiet angeben will, muss man die Turmeinschlaghäufigkeiten mit diesen Faktoren korrigieren: Auf die gleiche Einzugsfläche in der Ebene bezogen, aber ohne Turm, gibt es in Wirklichkeit z. B. ca. $5,2$ mal mehr 60 kA -Blitze als 140 kA -Blitze, als dies in der Turmeinschlagsstatistik verschiedener Stromstärken zum Ausdruck kommt.

Neuere Messungen mit negativer Stoßspannung an Porzellanstützer zeigen eine Verflachung der Überschlagskurve in Richtung eines asymptotischen Wertes im Bereiche von 2000 kV Stoßspannung [8]. Es scheint, dass um diesen Spannungswert herum die Schlagweite fast beliebig gross werden kann. Wenn dies stimmt, so wäre es im Falle des

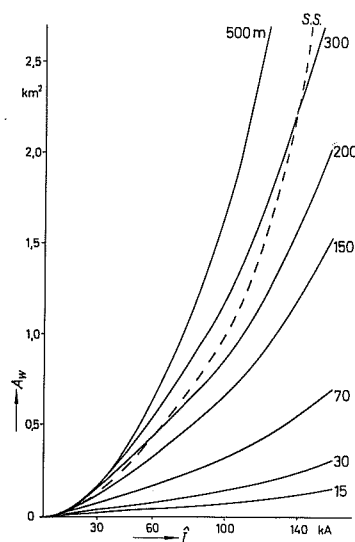


Fig. 6
Wirkungsquerschnitte A_w verschiedener Turmhöhen in der Ebene in Funktion der Blitzstromstärke I bei einer Gewitterzentrumshöhe H von 3000 m
S. S. Kurve des Turmes 1 der Messstation am Monte San Salvatore

Turmes am Monte San Salvatore möglich, dass negative Blitze von weiter her in den Turm schlagen können als dies nach den vorhergehenden Überlegungen zu erwarten wäre.

Im weiteren zeigt es sich, dass die Grösse der Wirkungsquerschnitte für die verschiedenen Blitzstromstärken stark von der Höhe der Türme und der Blitzableiter abhängen. In Fig. 6 sind die Wirkungsquerschnitte für eine Gewitterzentrumshöhe H von 3 km in Funktion der Blitzstromstärken für verschiedene Turmhöhen aufgetragen, wobei angenommen wurde, dass die Türme in der Ebene stehen. Die gestrichelte Kurve entspricht dem Turm 1 auf dem Monte San Salvatore, dessen Fusspunkt 630 m über dem Spiegel des Luganersees steht. Der Einfluss des Berges ist relativ klein: Der 70 m hohe Turm auf dem Berg entspricht ungefähr einem 250 m hohen Turm in der Ebene.

Interessiert man sich dafür, wie die Häufigkeitskurve der maximalen Stromwerte des Monte San Salvatore-Turmes [1] bei einem gleich hohen Turm in der Ebene verlaufen würde, muss man mit Hilfe der Fig. 4 und der Fig. 6 das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte beider Fälle für jede Blitzstromstärke bestimmen und mit der Anzahl Blitze der betreffenden Stromstärke der Monte San Salvatore-Statistik multiplizieren. Die resultierende Summenkurve der maximalen Stromwerte

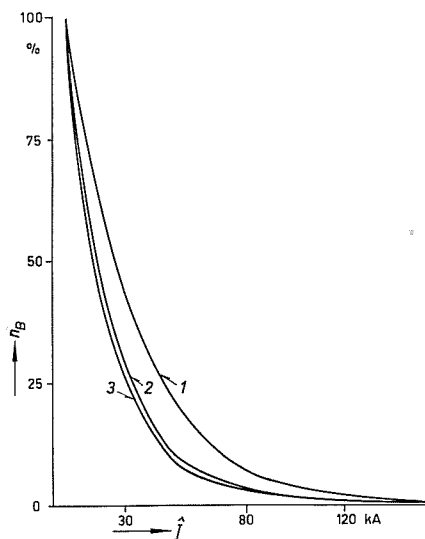


Fig. 7

Häufigkeit der maximalen Stromstärke I aller Blitze in Prozenten der totalen Blitzzahl n_B
 1 Turm am Monte San Salvatore; 2 70-m-Turm in der Ebene;
 3 30-m-Turm in der Ebene

ist in Fig. 7 aufgezeichnet, wobei die Kurve 1 diejenige des San Salvatore [11], Kurve 2 die entsprechende Häufigkeitskurve des gleichen 70 m hohen Turmes in der Ebene und Kurve 3 dasselbe für einen 30 m hohen Turm, z. B. für einen 150-kV-Freileitungsmast in der Ebene, darstellt. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass in der Ebene zusätzlich wenige sehr stromstarke Blitze dazu kommen, die auf dem Monte San Salvatore wegen der niedrigeren Gewitterzentrumshöhe nicht einschlagen.

Ebenfalls von Interesse sind die Anzahl Einschläge n pro Jahr in verschieden hohe Türme. Dazu müssen die Wirkungsquerschnitte A_w der verschiedenen Blitzstromstärken I mit den entsprechenden Häufigkeiten der Maximalwerte der Ströme multipliziert werden. Unter der Annahme, dass ein Blitz pro km^2 und pro Jahr zur Erde schlägt, sind in Fig. 8

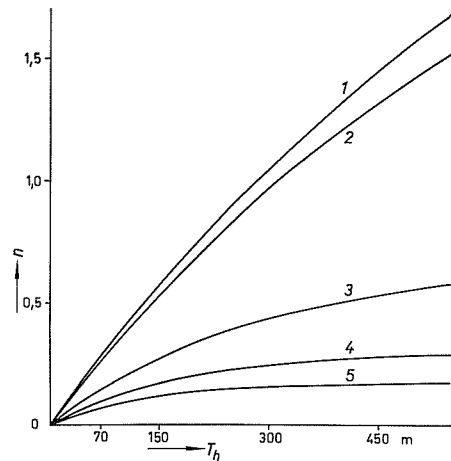


Fig. 8

Anzahl Einschläge n pro Jahr in Türme in der Ebene in Funktion der Turmhöhe T_h bei einem Blitz pro km^2 und pro Jahr

Kurve Nr.	1	2	3	4	5
Gewitterzentrumshöhe H [km]	1,5	2	3	4	5
Maximaler Blitzstrom I [kA]	60	100	180	180	180

die Anzahl Einschläge n pro Jahr in der Ebene für verschiedene Gewitterzentrumshöhen H in Funktion der Turmhöhe T_h dargestellt worden.

Auf ähnliche Weise kann die Schutzwirkung von Blitzableitern auf Gebäuden untersucht werden. In Fig. 9 wurde wieder zuerst der geometrische Ort aller Punkte mit gleichem Abstand zu einem Haus und zum Erdboden gesucht, der ungefähr durch eine Parabel gegeben ist. Dann wird der geometrische Ort aller Punkte mit gleichem Abstand zum Blitzableiter und zum Haus gesucht, und zwar gilt Kurve 3 für einen einfachen Firstdraht, Kurve 2 für eine 2,5 m hohe und Kurve 1 für eine 12,5 m hohe Blitzableiterstange. Dann wurden nach Fig. 2 wieder für alle Blitzstromstärken die entsprechenden Schlagweiten eingezeichnet, und zwar für den schlimmsten Fall, das heisst für eine Gewitterzentrumshöhe von 5 km. Alle Blitzköpfe ausserhalb (rechts) der Parabel schlagen in die Erde, alle Blitzköpfe oberhalb (links) der Kurven 1, 2 bzw. 3 in den Blitzableiter. Als die das Ge-

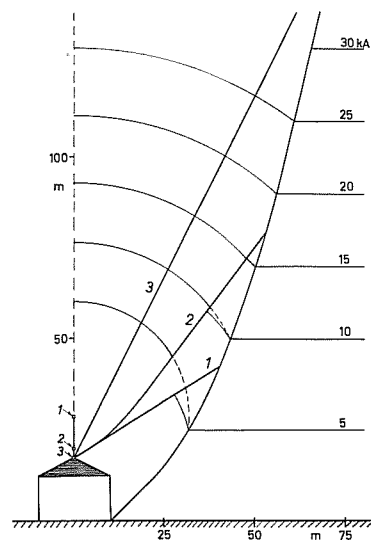


Fig. 9

Einfacher Blitzableiter
 Bezeichnungen siehe im Text

bäude gefährdende Zone bleibt die Fläche zwischen der Parabel und den entsprechenden Kurven 1...3. Man sieht, dass mit zunehmender Höhe der Stange die Gefährdung kleiner wird, dass aber immer noch, auch bei der 12,5 m hohen Blitzableiterstange bis zu 8 kA starke Blitze ins Gebäude einschlagen können. Auch mit sehr hohen Blitzableiterstangen wird kein genügender Schutz erreicht; erst die Anordnung von mehreren Leitungen bringt besseren Erfolg. Fig. 10 zeigt ein Gebäude mit drei einfachen Dachleitungen pro Dachfläche, das damit für alle vertikalen Blitze über 0,7 kA blitzsicher sein sollte.

Armierete Betonbauten können auf wirtschaftliche Art zu Faraday-Käfigen ausgebildet werden [7]. In diesem Fall interessiert man sich für die nötige Enge der Maschen der

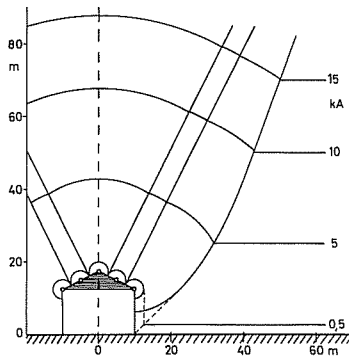


Fig. 10
Gebäude-Blitzableiter
mit 3 Dachleitungen pro Dachfläche

Armierungseisen. In Fig. 11 ist die zulässige Maschenweite eines Faraday-Käfigs in Funktion des Blitzstromes aufgetragen, ebenfalls für den schlimmsten Fall, das heisst, für eine Gewitterzentrumshöhe von 5 km. In den Decken von armierten Betonbauten haben die Armierungseisen im Durchschnitt einen Abstand von 15 cm und sind an allen Kreuzungspunkten mit Drähten verbunden. Nach Fig. 11 sieht man, dass solche Gebäude als blitzsicher gelten können.

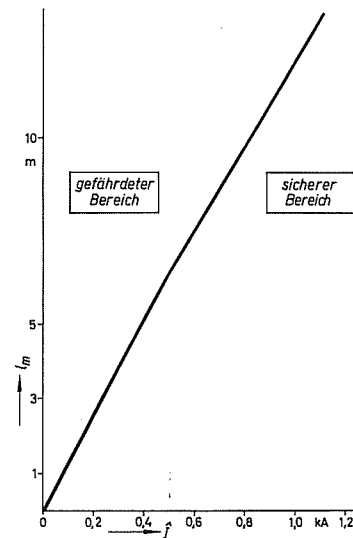


Fig. 11
Schutzwirkung eines Faraday-Käfigs
Zulässige Maschenweite l_m in Funktion des Blitzstromes I

Literatur

- [1a] K. Berger: Die Messeinrichtungen für Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 46(1955)5, S. 193...201.
- [1b] K. Berger: Resultate der Blitzmessungen der Jahre 1947—1954 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 46(1955)9, S. 405...424.
- [2] D. J. Malan and B. F. J. Schonland: The Electrical Processes in the Intervals between the Strokes of a Lightning Discharge. Proc. Roy. Soc. London Sect. A 206(1951)1085, S. 145...163.
- [3] G. N. Aleksandrov, M. V. Kostenko und I. F. Polovoi: Zur Frage der Aussichten einer Spannungserhöhung bei elektrischen Übertragungs-Freileitungen. Električestvo 11(1962)11, S. 20...25.
- [4] A. Schwaiger: Elektrische Leitungen. Praktische Berechnung. Leibniz München 1948.
- [5] R. H. Golde: The Frequency of Occurrence and the Distribution of Lightning Flashes to Transmission Lines. Trans AIEE 64(1945)—, S. 902...910.
- [6] E. T. Pierce: Some Topics in Atmospheric Electricity. Pergamon-Press Oxford 1958.

- [7] F. Schwab: Blitzsichere Freileitungen. Bull. SEV 55(1964)3, S. 87...90.
- [8] H. Kappeler: Durchführungen für extrem hohe Spannungen. Bull. SEV 55(1964)11, S. 545...553, speziell Diskussionsbeitrag H. Kläy, S. 552.
- [9] K. Berger: Wirtschaftlicher Blitzschutz armierter Betonbauten. Schweiz. Bauztg. 80(1962)12, S. 195...197.
- [10] H. Baatz: Blitzschlag-Messungen in Freileitungen. ETZ 72(1951)7, S. 191...198.
- [11] 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.

Adresse des Autors:

F. Schwab, dipl. Ingenieur ETH, Hochspannungs-Laboratorium der ETH, Gloriastrasse 35, 8006 Zürich.