Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 56 (1965)

Heft: 17

Artikel: Berechnung der Schutzwirkung von Blitzableitern und Türmen

Autor: Schwab, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916397

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: 10.07.2025

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

Der Spritzbeton wurde genau profilgerecht eingebaut, auf eine Glättung aber wurde verzichtet, weil Arbeitskräfte und Zeit nicht ausreichten. Hiezu ist in den Schlussbemerkungen noch etwas zu sagen. Auf 142 m Länge waren auch die Ulmen so schadhaft, dass die ganze Auskleidung neu gespritzt werden musste. Die Einhaltung des Profiles wurde hier durch Stahl-Lehren sichergestellt. Als Bewehrung wurde Baustahlgitter eingebaut, wie auch sonst an grösseren Flächen in den Ulmen.

In der Erkenntnis, dass — auch wenn es gelang, bei der Instandsetzung einen Beton hoher Lebensdauer herzustellen — doch wieder Schäden grösseren Ausmasses am Altbeton auftreten können, wollte man diesmal eine grössere Transportöffnung schaffen, die leicht freigemacht werden kann. Abgesehen von den Kosten nimmt das Aufbrechen und Wiederherstellen eines Betonpfropfens zu viel wertvolle Zeit in Anspruch.

Man hat, wegen des dort geringeren Druckes und wegen der besseren Zufahrt beim Fenster I einen Verschluss aus vorgefertigten, vertikalen Stahlbetonbalken eingebaut, die sich auf einen bewehrten Rahmen aus Ortbeton abstützen, welcher in die ausgebrochene Öffnung eingebaut wurde. Die Balken sind untereinander und gegen den Rahmen mit Fugendehnkitt abgedichtet und durch eine Verschraubung an der Luftseite gegen das Auftreten von Schwingungen gesichert. Die lichte Durchfahrtöffnung von 2,00 × 2,10 m genügt für den Jenbacher Büffel sowohl, wie für Gleistransport. Die kleine Panzertür beim Fenster I blieb bestehen. Beim Fenster II wurde der Pfropfen unter Einbau der Panzertüre wieder betoniert. An beiden Pfropfen wurden von aussen Kontaktinjektionen durchgeführt.

Die Austrittstellen des gesammelten Bergwassers wurden bei Abschluss der Arbeiten bei kleinen Austritten verpfropft, an 15 grossen Austritten wurden Rückschlagventile eingebaut, welche bei Überwiegen des Stolleninnendruckes schliessen. Die verschiedenen Hilf-Pumpensümpfe und die erwähnten Hilfsdrainagen in der Sohle wurden im Zuge der Arbeiten so rasch als möglich geschlossen.

Während der Arbeiten wurden wiederholt an genau eingemessenen Stellen nach vorherigem Abschleifen Proben mit dem Schmidtschen Prüfhammer durchgeführt, welche sehr gute Werte lieferten.

Nun der Zeitablauf der Arbeiten:

Beginn Vorarbeiten und Baustelleneinrichtung	28. April 1963
Stollenentleerung	4. Juni 1963
Beginn der Spritzbetonarbeiten	13. Juni 1963
Ende der Spritzbetonarbeiten	2. September 1963
Abbau, Räumung und Reinigung innen bis	21. September 1963
Betonierung Stollenpfropfen bis	27. September 1963
Injizierung Stollenpfropfen bis	25. Oktober 1963
Übergabe des Stollens	31. Oktober 1963
Inbetriebnahme	5. November 1963
Abschluss Baustellenräumung	4. Dezember 1963

und die Leistungen:

Eingebauter Spritzbeton	1490 m³
Zu förderndes Abbruchmaterial und Rückprall	1260 m³
Verlegte Sohldrainage	980 m

Am 21. Juli 1964, also 8½ Monate nach Inbetriebnahme ergab sich die erste Möglichkeit einer Stollenbegehung. Diese zeigte den einwandfreien Zustand des Spritzbetons; nur war, wie zu erwarten, die oberste Zementhaut abgetragen. Das Korn sass fest im Mörtel. An Überlappungen der Spritzung zeigten sich stellenweise kleine Abblätterungen, jedoch waren die anstehenden Ränder sehr fest. Eine Schlammschicht oder ein Algenbelag war noch nicht aufgetreten. Im Altbeton in der Fahrspur des Büffels fanden sich einige Löcher. Diese Schadenstellen sind wahrscheinlich durch die Einwalzung beim Fahrbetrieb so verdichtet gewesen, dass man sie nicht erkannt hat. Das strömende Wasser aber (bei Vollast 3,8 m/s Geschwindigkeit), hat sie freigelegt. Gelegentlich einer durch eine Maschinenabstellung gegebenen Betriebspause konnten diese Schäden plombiert werden.

Ein nicht erwartetes Ergebnis hatten die bei Abschaltversuchen durchgeführten Messungen der Stollenrauhigkeit. Es zeigte sich, dass der Druckhöhenverlust im gesamten Stollen fast jene Werte erreichte, welche 1951 bei Bestand der grossen Schäden gemessen worden waren. Bei einer Betriebswassermenge von 24 m³/s betrug der Druckhöhenverlust

	1951	23,3 m
nach der Reparatur	1952	18,5 m
im Januar	1964	22,0 m

Dies, obwohl jede Profilverengung vermieden werden konnte, und das Kreisprofil genau eingehalten wurde. Offenbar ist die Oberflächenrauhigkeit des Spritzbetons von so grossem Einfluss. Es bleibt abzuwarten, ob die Bildung einer dünnen Schlammschicht eine Besserung bringt. Wenn nicht, dann war es falsch, auf eine Glättung der Oberfläche zu verzichten.

Adresse des Autors:
K. Nägerl, dipl. Ingenieur, Prokurist der Oberösterreichischen Kraftwerke AG, Bahnhofstrasse 6, Linz (Österreich).

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 letz-

ten 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 μs 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-%-Überschlagspannung 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.

33'929-939

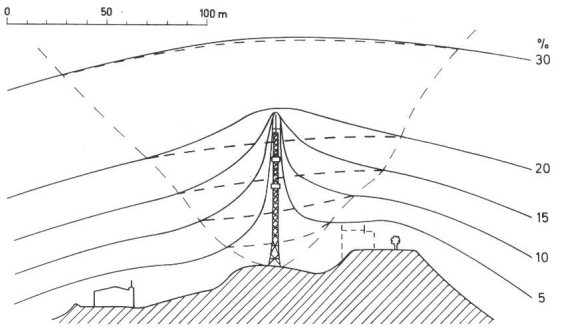

Fig. 1
Blitzforschungsstation Monte San Salvatore
Feldverlauf mit und ohne Blitzauffangturm. Wolkenhöhe 500 m über der Spitze vom Turm (das elektrische Feld der Wolke gegen Erde = 100 %)

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

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 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 μs 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:

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{l} \ln \frac{l + \sqrt{d^2 + l^2}}{-l + \sqrt{d^2 + l^2}} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{l} \ln \frac{4h + 3l + \sqrt{d^2 + (4h + 3l)^2}}{4h + l + \sqrt{d^2 + (4h + l)^2}}$$

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:

$$U = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{l} \ln \frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4h + l}{4h + 3l}}$$

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

$$E_m = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{h\,l} \ln \frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4h + l}{4h + 3l}}$$

Der Anfang des Kanals innerhalb der Wolke, die sog. Gewitterzentrumshöhe H, wurde mit 1½, 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

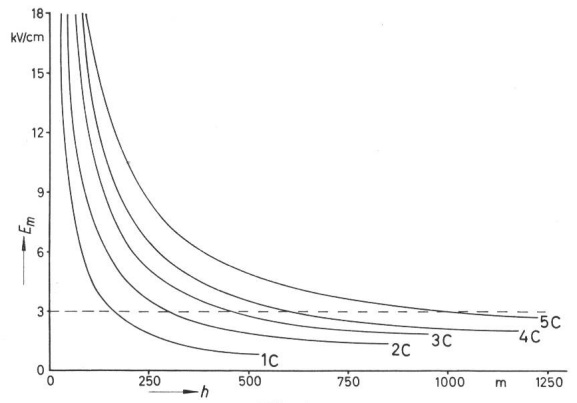

Fig. 2
Mittlere elektrische Feldstärke E_m unter dem Leitkanal in Funktion von dessen Höhe h über dem Erdboden
für verschiedene Ladungen Q bei einer Gewitterzentrumshöhe H von 3 km

mittleren Feldstärken E_m sind in Funktion der Schlagweite h in Fig. 2 für $H = 3$ km für verschiedene Ladungen Q als Parameter aufgetragen.

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 niederen 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

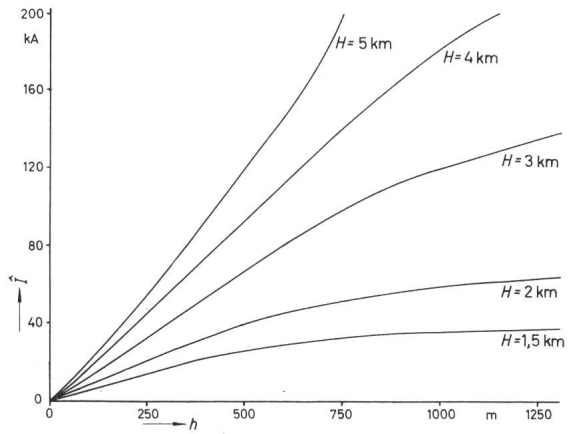

Fig. 3
Schlagweite h in Funktion des Blitzstromes $\hat{i}$ für verschiedene Gewitterzentrumshöhen H

vom geerdeten Objekt nach oben oder als letzte Stufe des nach unten vorwachsenden Blitzes überwunden wird. Zudem 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 Blitzauffangturmes 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

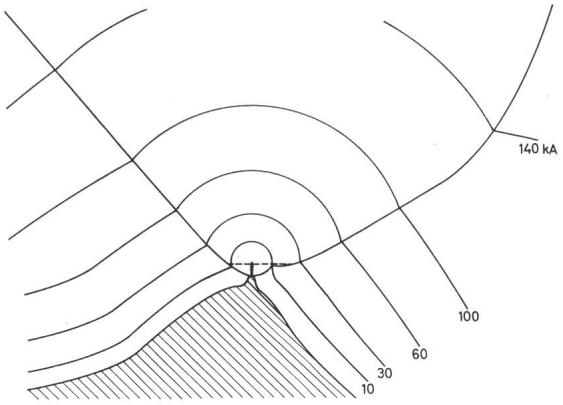

Fig. 4
Blitzeinzugsgebiet des Turmes 1 der Blitzforschungsstation am Monte San Salvatore

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 Darstel-

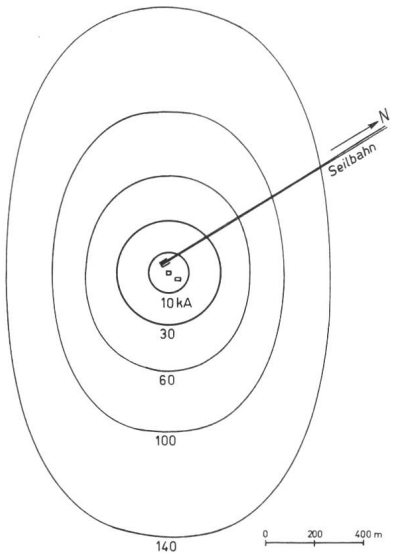

Fig. 5
Wirkungsquerschnitte bei einer Gewitterzentrumshöhe von $H = 3$ km am Turm 1 der Blitzforschungsstation am Monte San Salvatore

lung der Blitzeinzugsgebiete oder Wirkungsquerschnitte der verschiedenen Blitzstromstärken aller Blitze *die in die Auffangnadel einschlagen.* In Fig. 5 sind diese Wirkungsquerschnitte für fünf Blitzstromstärken bei einer Gewitterzentrumshöhe von $H = 3$ km im Grundriss gezeichnet. Das Einzugsgebiet für 60-kA-Blitze ist z. B. 0,424 km², für 140-kA-Blitze aber schon 2,2 km². 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. 5,2mal 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

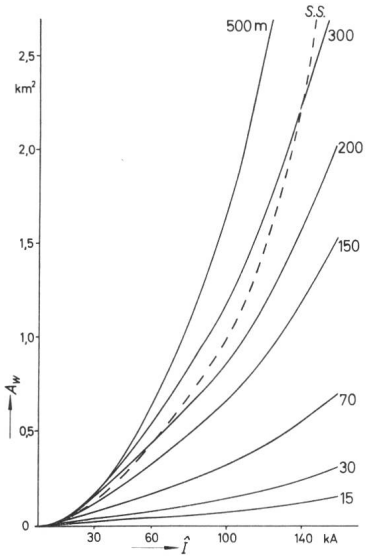

Fig. 6
Wirkungsquerschnitte A_w verschiedener Turmhöhen in der Ebene in Funktion der Blitzstromstärke $\hat{I}$ bei einer Gewitterzentrumshöhe H von 3000 m
S. S. Kurve des Turmes 1 der Meßstation am Monte San Salvatore

Spannungswert herum die Schlagweite fast beliebig gross werden kann. Wenn dies stimmt, so wäre es im Falle des 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

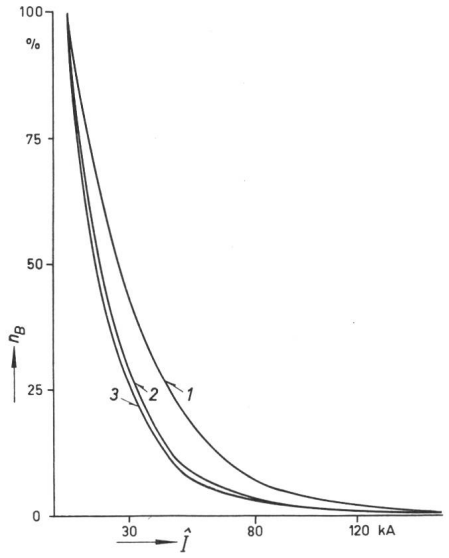

Fig. 7
Häufigkeit der maximalen Stromstärke $\hat{I}$ aller Blitze in Prozenten der totalen Blitzzahl n_B
1 Turm am Monte San Salvatore; *2* 70-m-Turm in der Ebene; *3* 30-m-Turm in der Ebene

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 $\hat{i}$ mit den entsprechenden Häufigkeiten der Maximalwerte der

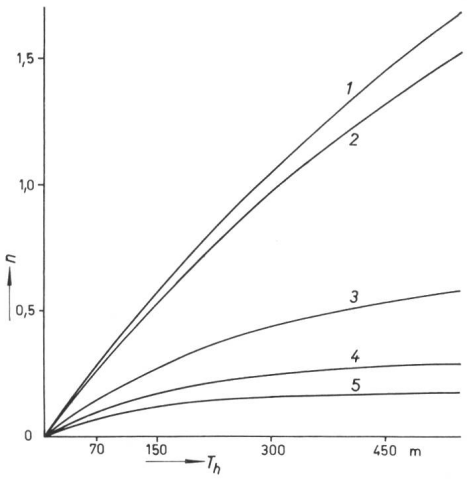

Fig. 8
Anzahl Einschläge n pro Jahr in Türme in der Ebene in Funktion der Turmhöhe T_h bei einem Blitz pro km² und pro Jahr

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

Ströme multipliziert werden. Unter der Annahme, dass *ein* Blitz pro km² und pro Jahr zur Erde schlägt, sind in Fig. 8 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 Gebäude 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.

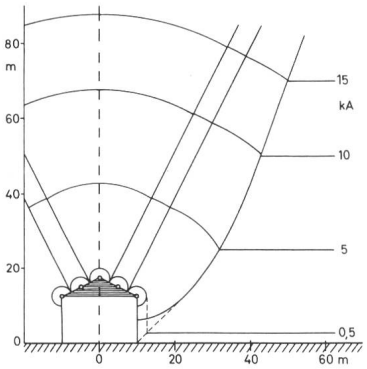

Fig. 10
Gebäude-Blitzableiter
mit 3 Dachleitungen pro Dachfläche

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

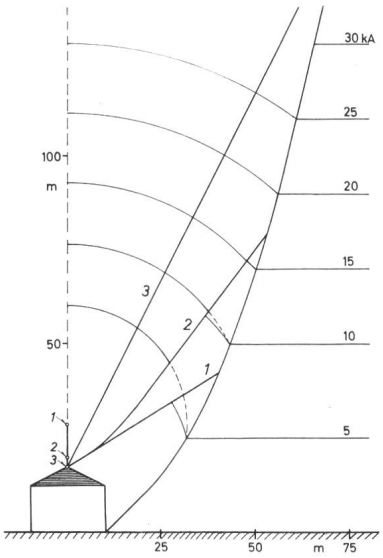

Fig. 9
Einfacher Blitzableiter
Bezeichnungen siehe im Text

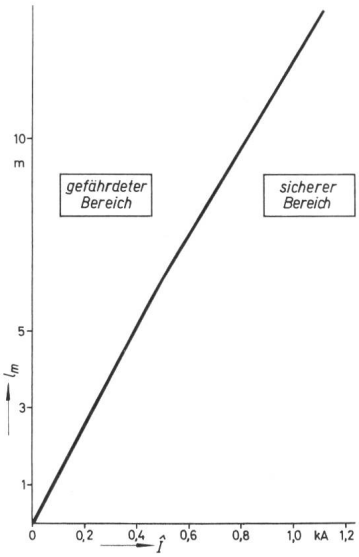

Fig. 11
Schutzwirkung eines Faraday-Käfigs
Zulässige Maschenweite l_m in Funktion des Blitzstromes $\hat{I}$

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. Elektritschestwo 11(1962)11, S. 20...25.

[4] *A. Schwaiger:* Elektrische Leitungen. Praktische Berechnung. Leibniz München 1948.

[5] *R. H. Golde:* The Frequency of Occurence 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:* Blitzeinschlag-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.

Gleichrichtertechnik im Bahnbetrieb

Lokomotiven und Triebwagen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 28. April 1965 in Zürich,

von *J. F. Knobloch,* Genève

621.314.21 : 621.33

1. Rückblick

Schon seit den ersten Versuchen der Bahnelektrifizierung bestand ein verständliches Interesse, die Fahrleitungen direkt aus dem Landesnetz mit Industriefrequenz zu speisen. In der Schweiz wurden bereits 1904 Versuche auf der Strecke Seebach–Wettingen durchgeführt, die jedoch schliesslich zu Gunsten eines Einphasensystems reduzierter Frequenz wieder aufgegeben wurden.

In Deutschland wurde die Höllentalbahn im Jahre 1935—1936 zu Versuchszwecken mit 50 Hz elektrifiziert, nachdem die Ungarischen Staatsbahnen bereits mit dem Kando-System auf der Strecke Budapest–Hegyeshalom den Betrieb aufgenommen hatten. Das Kando-System besteht aus einem Einphasen-Mehrphasen-Synchronumformer und polumschaltbaren Asynchronmotoren als Triebmotoren. Bei den fünf Versuchslokomotiven der Höllentalbahn wurde übrigens das erste Mal ein deutlicher Akzent zu Gunsten der Gleichrichterlokomotiven spürbar.

Die Erfahrungen auf der Höllentallinie zeigten, dass der Quecksilberdampfgleichrichter noch nicht die erforderliche Reife zur Verwendung auf Triebfahrzeugen erreicht hatte. Das pumpenlose Hg-Gefäss befand sich zu diesem Zeitpunkt noch im Entwicklungsstadium.

Weiterhin sind die Versuche der SNCF zu erwähnen, welche in den Jahren 1950—1955 den sog. «Etoile de Haute Savoie» mit 50 Hz elektrifizierten. Unter den Versuchslokomotiven befand sich lediglich eine Gleichrichterlokomotive ausgerüstet mit Ignitron-Gefässen.

Als die SNCF im Jahre 1954 für die Elektrifizierung des Nord-Ost-Netzes das Einphasensystem mit 50 Hz wählte, stand der Gleichrichter noch an letzter Stelle der zur Kraftübertragung gewählten Lösungen. Bei der ersten Bestellung von 142 Lokomotiven für dieses Netz waren nur deren 5 mit Gleichrichtern vorgesehen. Bei der Weiterentwicklung der 50-Hz-Einphasenlokomotiven zeigte sich jedoch bald eine deutliche Tendenz zu Gunsten der Gleichrichterlokomotive, die schliesslich zur vollständigen Eliminierung aller anderen Übertragungssysteme für 50 Hz führte.

2. Gegenwärtiger Entwicklungsstand der Quecksilberdampf-Ventile für Triebfahrzeuge

Das *Ignitron* hat während der ersten Etappe wesentlich zum Erfolg der Gleichrichterlokomotive beigetragen. Im Jahre 1958 waren in der ganzen Welt von ca. 1000 Gleichrichter-Triebfahrzeugen 60 % mit Ignitron-Gefässen ausgerüstet. Das Ignitron ist bekanntlich ein einanodiges Quecksilberdampfgefäss mit Zündstiftsteuerung und einem Wasserkreislaufsystem zur Vorheizung und Kühlung der Gefässe. Heute wird jedoch praktisch das Anwendungsgebiet des Ignitrons vom Siliziumgleichrichter beherrscht.

Das *Excitron,* als pumpenloser Quecksilberdampfgleichrichter mit Steuergittern, flüssiger Hg-Kathode und Edelgasfüllung, hat in dem vergangenen Jahrzehnt seine Reife für den Lokomotivbetrieb unter Beweis stellen können. Die dabei erreichten, wichtigsten Merkmale sind:

Grosse Überlastbarkeit,
Temperaturunempfindlichkeit über einen sehr grossen Bereich,
Sofortige Betriebsbereitschaft,
Luftkühlung, und vor allem die
Stufenlose Steuerbarkeit mittels der Steuergitter.

Das zweianodige Gefäss bietet ausserdem die Vorteile des kontinuierlich brennenden Kathodenlichtbogens und der schnelleren Deionisation des Anodenraumes durch die Pumpwirkung des kommutierenden Lichtbogens auf das Plasma.

Der schweizerischen Industrie bot sich im Jahre 1958 durch die ersten Mehrsystem-Lokomotiven der Baureihe Ee 3/3 II, welche die SBB für den Systemwechsel zwischen dem Bahnhof Basel SBB und dem Elsässer Bahnhof beschaffte, eine erste Gelegenheit, ihre Technik im Lande zu erproben.

Drei Lösungen kamen dabei zur Ausführung:

1. Direktmotoren für $16^2/_3$ Hz und 50 Hz mit Schütze-Steuerung,
2. Gleichstrommotoren gespeist von einanodigen Excitron-Gleichrichtern und Niederspannungsschaltwerk,
3. Gleichstrommotoren gespeist von zweianodigen Excitron-Gleichrichtern und Spannungsregelung durch Gittersteuerung.

Der zweianodige Gleichrichter, der speziell für die Traktion entwickelt wurde, fand dabei erstmalig Anwendung.