Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 67 (1976)

Heft: 22

Artikel: Zur experimentellen Schutzraumbestimmung von Blitzfangstangen

Autor: Rühling, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915237

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: 08.07.2025

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

Zur experimentellen Schutzraumbestimmung von Blitzfangstangen

Von F. Rühling

621.316.933.1 : 621.316.98

Die Ähnlichkeit zwischen der einschlagentscheidenden Phase eines Abwärtsblitzes und dem Entladungsmechanismus bei positiver Schaltstoßspannung gibt Veranlassung, die Schutzwirkung einer Blitzfangstange im Labor zu analysieren. Es wird von Experimenten an einer 10-m-Stab–Platte-Funkenstrecke berichtet. Dabei wurde das Verhalten der Einschlagverteilung einer Modell-Blitzfangstange und eines Probestabes unter dem Einfluss der Geometrie der Anordnung und der Feuchte der Luft untersucht. Aus den Ergebnissen wird eine neue Methode der Schutzraumbestimmung abgeleitet, die entsprechend der konstanten Anzahl der Blitze pro km² eine konstante «Funkenflächendichte» über dem zu untersuchenden Schutzobjekt berücksichtigt, woraus eine denkbare Verbesserung der allgemeinen Gültigkeit von Schutzraumversuchen resultiert.

L'analogie entre le «stepped-leader» qui détermine le point exact de l'impact du coup de foudre et l'amorçage du choc de manœuvre positif donne lieu à l'étude de l'effet de protection d'un paratonnerre en laboratoire. Cette contribution présente des expériences dans un intervalle tige-plan de 10 m. La distribution des impacts sur un paratonnerre-modèle et sur une tige d'essai était étudiée ainsi que l'influence de la géometrie du circuit d'essai et celle de l'humidité de l'air. Les résultats conduisent à une méthode nouvelle pour prédéterminer la zone de protection d'un paratonnerre. Cette méthode tient compte d'une «densité d'étincelles» constante correspondant à un nombre constant de coups de foudre par km². On peut en conclure qu'une amélioration de la validité de la détermination expérimentale de la zone de protection devient possible.

1. Einführung

Die Schutzwirkung von Modell-Blitzfangstangen kann im Laboratorium in relativ kurzer Zeit bestimmt werden. Üblicherweise wird bei derartigen Modelluntersuchungen nur die einschlagentscheidende Vorentladungsphase der Blitzentladung nachgebildet. Als grundlegende Elektrodenanordnung kommt die Stab–Platte-Funkenstrecke in Frage. Die spannungsführende Stabelektrode wird dabei mit einer positiven Schaltstossspannung beaufschlagt [1][1]), deren Vorteile sich wie folgt zusammenfassen lassen:

– Ausbildung eines dem natürlichen Phänomen vergleichbaren Leitentladungskanals (Leader), dessen Vorwachsen zur Erde hin weitgehend unabhängig von geerdeten Elektroden erfolgt (Fig. 1),

– Abtasteffekt bezüglich geerdeter Elektroden, d. h. der Einschlag erfolgt unabhängig von der Lage der Hochspannungselektrode,

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

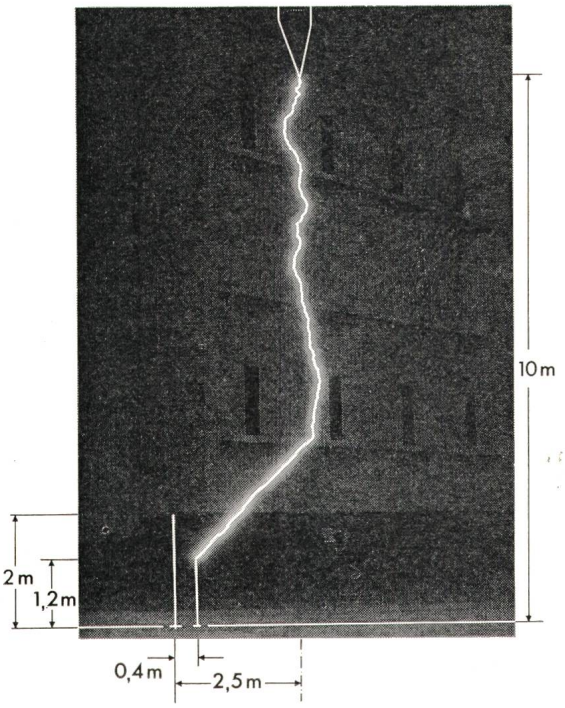

Fig. 1 Einschlag in einen Probestab

– Simulierbarkeit sogenannter Tiefeinschläge, wie sie in der Natur beobachtet werden (Fig. 2),

– Schlagweitenvergrösserung aufgrund des Minimums der elektrischen Durchschlagspannung für eine bestimmte Schlagweiten-Stirnzeit-Kombination.

Es muss freilich eingeräumt werden, dass eine Diskrepanz bezüglich der Polarität bestehen bleibt [2]: Während ca. 80 % aller Blitze aus Gewitterzellen mit überwiegend negativen Ladungszentren entstammen, wird die für die experimentellen Untersuchungen notwendige Energie einem positiv geladenen Kondensatorspeicher entnommen.

Neue Untersuchungen mit negativer Polarität [3] bei Schlagweiten bis zu 7 m, wozu eine Spannung von rund 3 MV notwendig war, zeigen, dass die Ausbildung einer kanalartigen Vorentladung mit einem weitverzweigten Kopf ebenfalls möglich ist. Allerdings scheinen gemäss dem derzeitigen Erkenntnisstand aufgrund der andersartigen physikalischen Bedingungen bei negativer Polarität die oben genannten Vorteile nahezu vollkommen verlorenzugehen.

Im Hinblick auf die Bedeutung des Schutzraumproblems hat die Electricité de France (EdF) im Rahmen der Arbeiten der Les Renardières Group [4] die Einrichtungen des Höchstspannungslaboratoriums in Les Renardières für die Durchführung der nachfolgend beschriebenen Versuche zur Verfügung gestellt.

2. Versuchseinrichtung

Die Versuchsanordnung bestand aus einer 10-m-Stab–Platte-Funkenstrecke mit kegelförmigem Abschluss der Hochspannungselektrode bei einem Krümmungsradius von 10 mm. Die Einzelheiten des Versuchskreises sind in [4] ausführlich beschrieben. Die Grundanordnung wird durch zwei auf die Platte aufgestellte Stangen mit halbkugeligem Abschluss ergänzt (Fig. 3). Die y-Richtung des dreidimensionalen Koordinatensystems wird zur Laborwand hin positiv und zum Generator hin negativ gezählt. Die höhere Stange (A) hat die Funktion einer Modell-Blitzfangstange; die kleinere Stange wird als Probestab zur Festlegung des mit einer bestimmten Einschlagwahrscheinlichkeit behafteten Schutzraumes benötigt.

Die Funkenstrecke wurde mit einem positiven Impuls der Form 500/10000 µs bei einer Spannungshöhe von $U_{50+2\sigma}$ beansprucht. Die Entladungsbahnen konnten durch Kameras, die in einem Winkel von 90° aufgestellt waren, registriert werden.

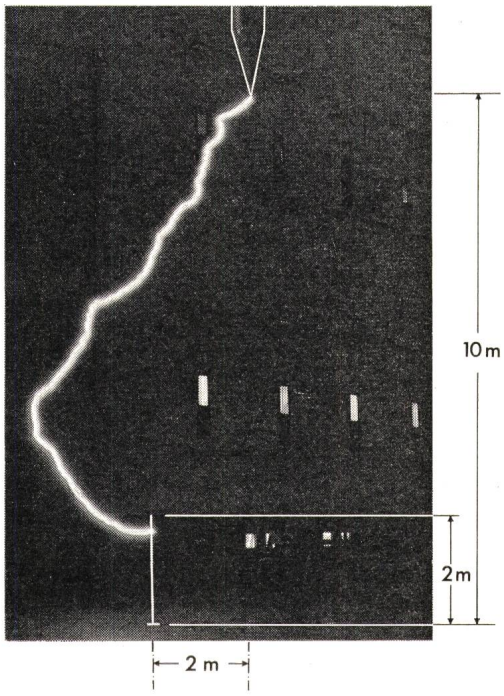

Fig. 2 Tiefeinschlag in eine Modell-Blitzfangstange

3. Einfluss der Geometrie

Der Einfluss der Geometrie des Versuchsaufbaues kann dadurch nachgewiesen werden, dass die in ihrem geometrischen Verhältnis gleiche Anordnung von Modell-Blitzfangstange und Probestab in verschiedenen Abständen von der Symmetrieachse der Stab–Platte-Grundanordnung aufgestellt wird. Die beiden Stäbe (Fig. 3) werden von $y_a = -5$ m nach $y_a = +5$ m bewegt, wobei ihr Abstand untereinander immer 1 m bleibt. Das Ergebnis ist in Fig. 4 wiedergegeben: die Wahrscheinlichkeit p_{a+p} von Einschlägen in beide Stäbe und die Wahrscheinlichkeit p_p von Einschlägen in den Probestab. Diese Wahrscheinlichkeiten wurden gemäss

$$p_{a+p} = \frac{N_a + N_p}{N_{total}} \text{ und} \tag{1}$$

$$p_p = \frac{N_p}{N_a + N_p} \tag{2}$$

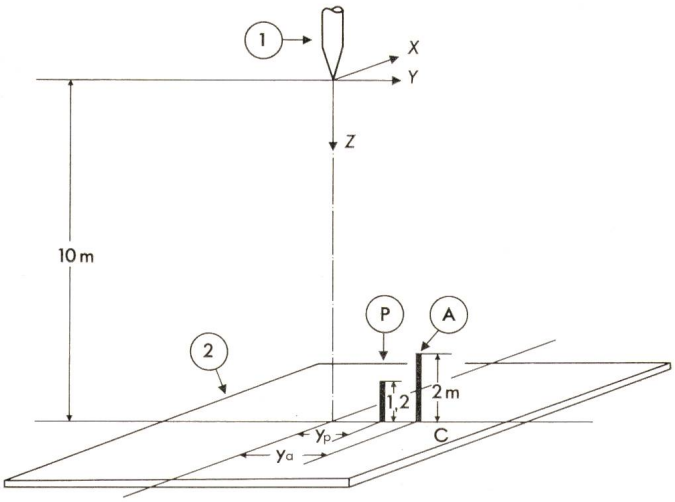

Fig. 3 Versuchsanordnung

1 Hochspannungselektrode
2 Bodenplatte
A Modell-Blitzfangstange
P Probestab

berechnet, wobei N_a, N_p und N_{total} die Anzahl der Einschläge in die Modell-Blitzfangstange, in den Probestab und in alle Elektroden angibt.

Jeder Punkt von Fig. 4 entspricht einer anderen Testserie; die Streuung zwischen einzelnen Serien kann demnach aus den verschiedenen Punkten bei einem konstanten Abstand y_a entnommen werden. Ein Grund hierfür resultiert aus der Tatsache, dass nur eine vergleichsweise geringe Anzahl Versuche während einer Testserie durchgeführt werden konnte. Anzustreben sind mehr als 200 auswertbare Einschläge [5].

Die Wahrscheinlichkeitskurven (Fig. 4) sind in bezug auf das Plattenzentrum unsymmetrisch. Dies weist auf den nicht vernachlässigbaren Einfluss der Geometrie des Versuchskreises hin, der in der üblichen Form einer Schleife aufgebaut war. In Übereinstimmung mit [5] stellt $p_{a+p} = 52\,\%$ den Maximalwert dar. Obgleich sich die Stäbe im Zentrum der Platte befinden, hat die Hälfte der Entladungen ihren Fusspunkt auf der Platte.

Trotz der grossen Unregelmässigkeiten der Leaderentwicklung führt die statistische Auswertung zu stetigen Kurven, die die Zuverlässigkeit der Einzelmessungen erhöhen. Aus Fig. 4 kann für die Wahrscheinlichkeiten die folgende Beziehung abgeleitet werden:

$$p_p + p_y = 100 - p_{a+p} \quad [\%] \tag{3}$$

wobei $p_y = f(y_a - y_p)$ ist. Für die untersuchte Anordnung ergab sich ein Wert p_y von ca. 40 %. Diese Beziehung vereinfacht die Registriertechnik, da nur mehr die auf die Platte auftreffenden Entladungen gezählt werden müssen.

4. Einfluss der Feuchte

Ein anderer Grund für die Streuung der Einschlagwahrscheinlichkeiten rührt von der Änderung der Feuchte her. Die Auswertung der Durchschlagzeiten während verschiedener Versuchsperioden zeigte, dass diese in beachtenswertem Masse von der absoluten Feuchte H abhängig sind. Es ergab sich eine eindeutige Reduzierung der mittleren Durchschlagzeit $\overline{T}_B$ mit zunehmender Feuchte gemäss der näherungsweisen Beziehung

$$\overline{T}_B = 650 - 20\,H \tag{4}$$

(H in g/m³ und T_B in µs).

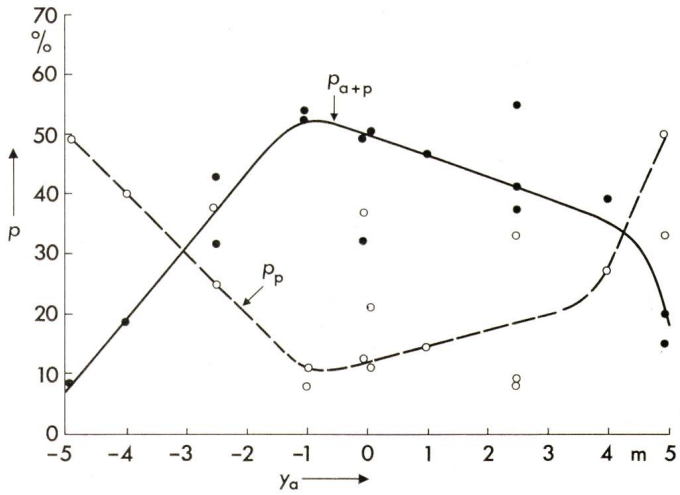

Fig. 4 Einschlagwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der seitlichen Verschiebung y_a der Modell-Blitzfangstange

p_{a+p} = Einschlagwahrscheinlichkeit beider Stäbe
p_p = Einschlagwahrscheinlichkeit des Probestabes

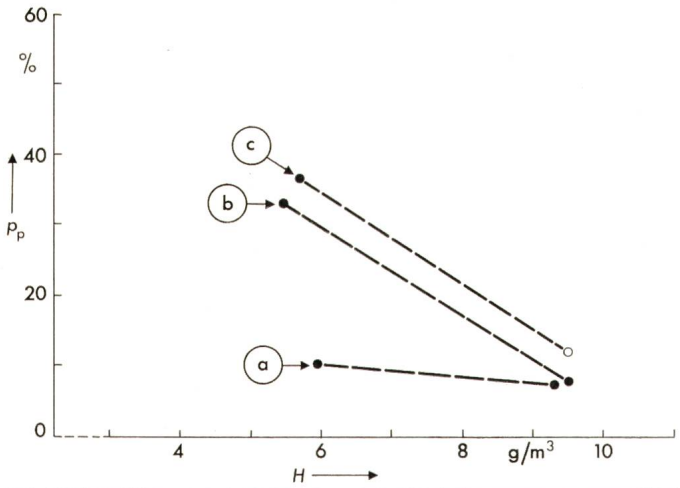

Fig. 5 Einfluss der absoluten Feuchte H auf die Einschlagwahrscheinlichkeit p_p des Probestabes
Anordnung a: $y_a = -1$ m, $y_p = 0$ m
Anordnung b: $y_a = 2{,}5$ m, $y_p = 1{,}5$ m
Anordnung c: $y_a = 0$ m, $y_p = 1$ m

Die Verringerung der Durchschlagzeit hat offenbar einen Einfluss auf die Verteilung der Einschläge, wie aus Fig. 5 tendenzmässig hervorgeht: Mit zunehmender Feuchte sinkt die Einschlagwahrscheinlichkeit p_p in den Probestab. Dieser Effekt kann derart gedeutet werden, dass durch die Verringerung der Durchschlagzeit die für das Abtasten der geerdeten Elektroden zur Verfügung stehende Zeit ebenfalls kürzer wird. Damit fällt die Einschlagentscheidung eher zugunsten der höheren Elektrode, der Modell-Blitzfangstange. Für eine quantitative Erfassung dieses Effektes sind allerdings eine weitaus grössere Anzahl von Versuchen notwendig.

5. Einzugsvolumen

Aus den Untersuchungen an der 10-m-Funkenstrecke geht hervor, dass im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit von Schutzraumversuchen die Geometrie der Anordnung und die Feuchte der Luft zu berücksichtigen sind. Die üblicherweise bei derartigen Versuchen durchgeführte Auswertung der verschiedenen Einschlagwahrscheinlichkeiten kann jedoch die Einflüsse nur feststellen, wie z. B. die Asymmetrie des Versuchsaufbaues. Der Idealfall wäre zweifelsohne die Symmetrie, die sich jedoch in einer Laborhalle kaum realisieren lässt.

Die im folgenden beschriebene Methode soll symmetrischen Bedingungen Rechnung tragen. Hierzu ist es zunächst notwendig, die einzelnen Entladungskanäle durch Raumkoordinaten zu beschreiben. Diese Arbeit kann mit Hilfe einer Rechenmaschine automatisch erfolgen, indem die Spur des Entladungskanals auf dem Filmnegativ mit einem Kurvenanalysator abgetastet wird [4].

In Fig. 6 sind die sich aus den Koordinaten ergebenden Schnittpunkte der Entladungsbahnen und der horizontalen Ebene $z = 5$ m als Punkte und Kreise eingezeichnet, wobei die Achse der Modell-Blitzfangstange (A) den Bezugspunkt darstellt. Trotz der unterschiedlichen Anordnungen gemäss den Messpunkten der Fig. 6 lässt sich eine bemerkenswerte Trennung von Einschlägen in die Blitzfangstange oder in die Bodenplatte feststellen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die durch Probestabeinschläge hervorgerufenen Schnittpunkte weggelassen. Diese konzentrieren sich innerhalb der sichelförmigen Fläche, die durch den gestrichelten Kreis abgegrenzt wird. Die Trennung zwischen den beiden Arten von Einschlägen in Fig. 6 kann durch einen Kreis mit dem Radius $r = 2{,}74$ m erfolgen. Durch die Auswertung der Schnittpunkte bei unterschiedlichen Höhen von z können ähnliche Kreise gefunden werden, deren Radius durch die empirische Gleichung

$$r = 1{,}9 \sqrt[3]{h} \tag{5}$$

(Einheiten in m) beschrieben wird. Dabei ist h die Koordinate in vertikaler Stabrichtung mit dem Ursprung entweder an der Spitze der Modell-Blitzfangstange oder an derjenigen des Probestabes.

Durch diese Abhängigkeit wird ein Einzugsvolumen festgelegt, innerhalb dessen jedes Vorwachsen eines Leitentladungskanals zu einem Einschlag in den zugehörigen geerdeten Stab führt. Die Gültigkeit dieses Paraboloids höherer Ordnung (Fig. 7) erstreckt sich bis zur ungefähren Mitte der Funkenstrecke. Darüber beginnt der Einfluss der Hochspannungselektrode. Im sich überlappenden Gebiet der beiden Kreise herrscht eine Mischverteilung der Einschläge.

6. Konstante «Funkenflächendichte»

Um die Einschlagwahrscheinlichkeit p_p des Probestabes zu erhalten, ist es Voraussetzung, sich auf eine in bezug auf die Fangstangenachse symmetrische Einschlagverteilung zu beziehen. Aufgrund des Geometrieeinflusses – ein Feuchteeinfluss konnte hier nicht signifikant festgestellt werden – ergibt sich eine unterschiedliche Verteilung der Schnittpunkte der Entladungsbahnen und einer horizontalen Ebene über der Modell-Fangstange. Es bietet sich an, diese Ebene in Sektoren einzuteilen, deren Radius aus Gl. (5) berechnet und deren Zentriwinkel mit φ bezeichnet wird. In einem genügend kleinen Sektor mit dem Zentriwinkel $d\varphi$, dem die Einschlagwahrscheinlichkeit ∂p_s zugeordnet ist, kann angenommen werden, dass die auf die Flächeneinheit bezogene Anzahl der Schnittpunkte konstant ist. Diese Häufigkeit, die sogenannte «Funkenflächendichte» innerhalb eines Sektors gilt für jede symmetrische Anordnung. Die Asymmetrie kann demnach durch Integration

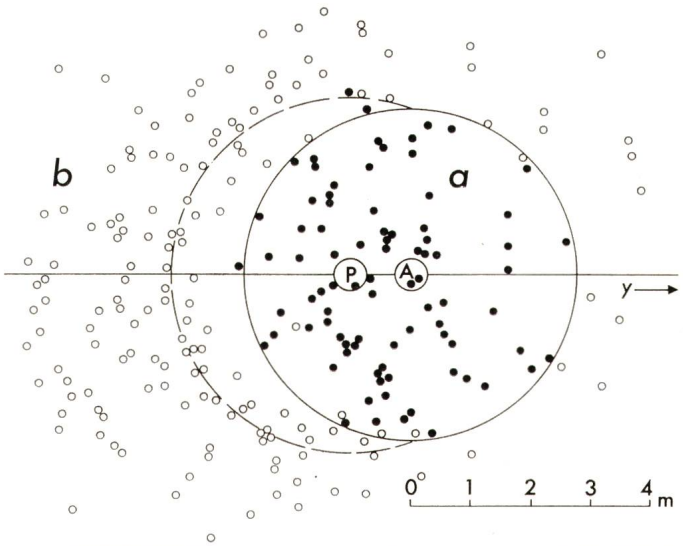

Fig. 6 Trennungskreis der Schnittpunkte der Entladungsbahnen und der Ebene $z = 5$ m für Einschläge in die Modell-Blitzfangstange (a) und die Bodenplatte (b)

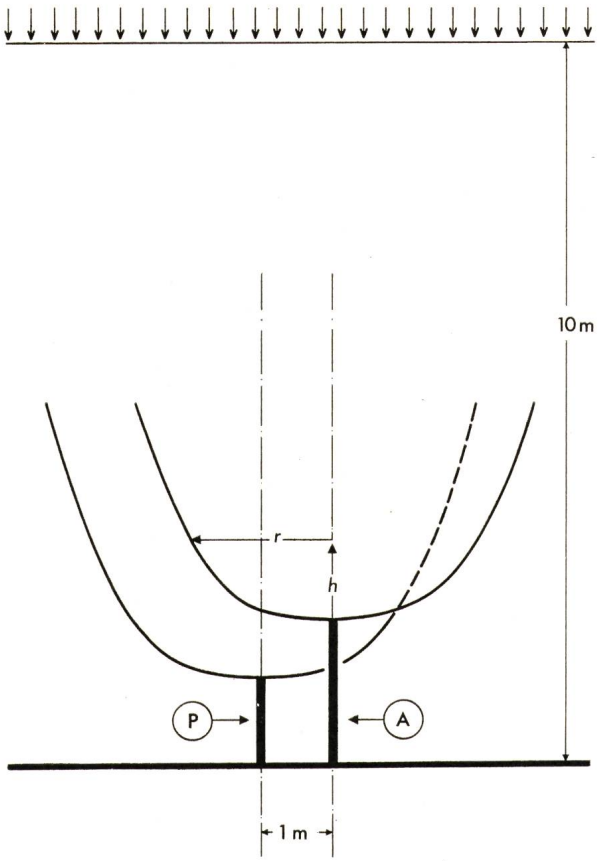

Fig. 7 Einzugsvolumen für Einschläge in die Stäbe
A Modell-Blitzfangstange
P Probestab

über den gesamten Umfang der Kreisfläche berücksichtigt werden. Für die gesuchte Einschlagwahrscheinlichkeit in den Probestab ergibt sich dann

$$p_p = \int_0^{2\pi} \frac{\partial p_s}{\partial \varphi} \, d\varphi. \qquad (6)$$

Wendet man diese Methode auf die Schnittpunkte von Fig. 6 an, wobei diejenigen der Probestabeinschläge zu ergänzen sind, so ergibt sich eine berechnete, auf symmetrische Bedingungen bezogene Einschlagwahrscheinlichkeit $p_{p,sym}$ von 13 %. Dieser Wert stimmt gut mit der in Fig. 4 dargestellten gestrichelten Kurve in der Nähe von $y_a = 0$, wo die Versuchsanordnung fast symmetrisch war, überein. Die übrigen Messpunkte können durch diese Methode ebenfalls auf $p_{p,sym}$ bezogen werden, woraus der Schluss zu ziehen ist, dass der Schutzraum unabhängig von der Grösse der seitlichen Verschiebung y_a zwischen Modell-Blitzfangstange und Symmetrieachse der Stab-Platte-Anordnung bestimmt werden kann. Dadurch ist eine Verallgemeinerung der Gültigkeit von Schutzraumversuchen erreichbar.

7. Ausblick

Wenngleich das Mass der Ähnlichkeit zwischen der einschlagentscheidenden Phase eines Abwärtsblitzes und einer Stoßspannungsentladung im Labor unterschiedlich beurteilt wird, werden experimentelle Untersuchungen zur Schutzraumfrage immer von Bedeutung sein, solange die Blitzforschung den Vorwachs- und Einschlagmechanismus nicht genauer zu erklären vermag.

Es ist daran zu denken, dass Modelluntersuchungen ein wertvolles Hilfsmittel insbesondere dann darstellen, wenn es sich um den Schutz grossflächiger Anlagen handelt. So werden beispielsweise westeuropäische Freiluft-Schaltanlagen in zunehmendem Masse durch Blitzfangstangen geschützt, wie dies in der UdSSR seit langem der Fall ist [6]. Anderseits kann den deutschen Vorschriften nur die Empfehlung eines Schutzwinkels von ca. 33° für einen ausreichenden Erdseilschutz elektrischer Anlagen entnommen werden [7].

Bei der Durchführung von Modellversuchen ist es notwendig, die im vorliegenden Aufsatz aufgezeigten Einflussgrössen auf die Verteilung von Einschlägen zu berücksichtigen, um eine realistische Transformation auf die natürlichen Verhältnisse zu erreichen.

Dazu sei abschliessend bemerkt, dass es der Blitzforschung einerseits und der Erforschung des Durchschlages langer Funkenstrecken bei negativer Polarität anderseits vorbehalten sein wird, zukünftig zur Klärung der Schutzwirkung von Blitzfangstangen und ähnlichen Auffangvorrichtungen beizutragen.

Literatur

[1] *F. Rühling:* Modelluntersuchungen über den Schutzraum und ihre Bedeutung für Gebäudeblitzableiter. Bull. SEV 63(1972)10, S. 522...528.

[2] *F. Rühling:* Der Schutzraum von Erdseilen. ETZ-A 94(1973)10, S. 604...609.

[3] *G. Gruber* e. a.: Contribution à l'étude des grandes étincelles en polarité négative. In: Internationales Symposium Hochspannungstechnik, 9. ... 13. September 1975, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich. Zürich, SEV, 1975; Bd. 2, S. 519...523.

[4] Recherches sur l'amorçage des grands intervalles d'air aux Renardières. Résultats de 1973. Electra –(1974)35, p. 49...156.

[5] *E. M. Bazelian* and *Y. A. Sadikhova:* On long spark channel orientation. Eletričestvo –(1973)3, p. 63...66.

[6] Instruktionen über den Schutz vor Überspannungen in elektrotechnischen Drehstromanlagen 3–500 kV. Eletričeskie Stancii –(1964)8, S. 93...96.

[7] Leitsätze für den Schutz elektrischer Anlagen gegen Überspannungen. VDE-Vorschrift 0675/9.57.

Adresse des Autors

Dr.-Ing. *F. Rühling*, Oberingenieur am Lehrstuhl
und Laboratorium für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Universität München, Arcisstrasse 21, D-8000 München 2.