

Das dynamische elektro-geometrische Modell

Das dynamische elektro-geometrische Modell

Ein neues Verfahren zur detaillierten Berechnung der Einfangwirksamkeit von Fangeinrichtungen

A. Kern, Ch. Schelthoff, M. Mathieu; Jülich

Das Verfahren des dynamischen elektro-geometrischen Modells wird detailliert vorgestellt. Danach werden für Fangeinrichtungen, die gemäß des Blitzkugel-Verfahrens nach DIN EN 62305-3 [1] für die Schutzklassen I – II – III – IV dimensioniert sind, die realen Einfangwirksamkeiten bestimmt. Die berechneten realen Einfangwirksamkeiten und die Vorgaben nach der Normenreihe DIN EN 62305 [1][2][3] werden miteinander verglichen.

1 Grenzen des Blitzkugel-Verfahrens

Das Blitzkugel-Verfahren ist das für die meisten Anwendungsfälle blitzphysikalisch korrekte, seit Jahrzehnten erprobte Verfahren zur Planung der Fangeinrichtungen von Blitzschutzsystemen für bauliche Anlagen. Es ist weltweit anerkannt und z. B. in der DIN EN 62305-3 [1] normativ verankert und basiert auf dem elektro-geometrischen Modell. Für unterschiedliche Anforderungen an ein Blitzschutzsystem werden vier Blitzschutzklassen definiert, die sich im anzusetzenden Radius der Blitzkugel unterscheiden. Dieser beträgt zwischen 20 m und 60 m und ist ein fester Wert, der nur von der vorgegebenen Blitzschutzklasse abhängig ist.

Mit dem Blitzkugel-Radius werden unterschiedliche, kleinste Scheitelwerte von natürlichen Blitzentladungen abgedeckt. Das heißt, Blitzkugeln mit kleineren Radien können grundsätzlich das zu schützende Gebäude neben den Fangeinrichtungen berühren. Es können also noch stromschwächere Blitze dort einschlagen. Bei der Planung mit der Blitzkugel erhält man damit mögliche Blitzeinschlagstellen, an denen Fangeinrichtungen zu platzieren sind (Bild 1). Allerdings ist darin keine Information enthalten, wie wahrscheinlich jeweils der Blitzeinschlag an den einzelnen Stellen ist. Also ist auch keine direkte Angabe einer Einfangwirksamkeit möglich.

Für detaillierte Risikoabschätzungen nach DIN EN 62305-2 [2] kann dagegen die Wahrscheinlichkeit benötigt werden, mit der ein Blitzschutzsystem gegen direkte Blitzeinschläge wirksam ist, also die bauliche Anlage schützt. Dazu ist natürlich auch die Angabe einer Einfangwirk-

samkeit der Fangeinrichtungen sinnvoll. Das hier vorgestellte und angewandte Verfahren des dynamischen elektro-geometrischen Modells arbeitet im Gegensatz zum klassischen Blitzkugel-Verfahren nicht mit konstanten Radien. Vielmehr wird der Radius der Blitzkugel in einem numerischen Ansatz variiert.

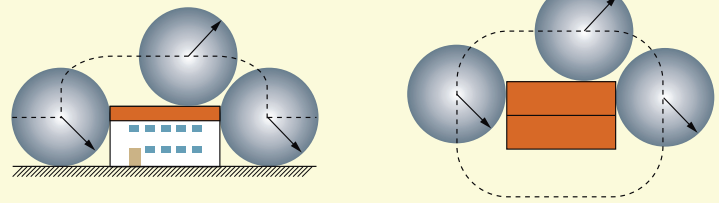
Es sei hier deutlich darauf hingewiesen, dass Fangeinrichtungen nicht immer nur nach den Kriterien der Einfangwirksamkeit positioniert

werden können. Ein Blitzschutzsystem hat üblicherweise noch andere Kriterien zu erfüllen. So kann beispielsweise aus Gründen des Blitzschutz-Potentialausgleichs, der ausreichenden Stromaufteilung oder der Reduzierung von magnetisch in Schleifen induzierten Spannungen auch die Aufstellung weiterer Fangeinrichtungen erforderlich sein [4]. Dieser Aspekt soll hier vollkommen außer Acht bleiben. Es wird nur die Einfangwirksamkeit von Fangeinrichtungen untersucht.

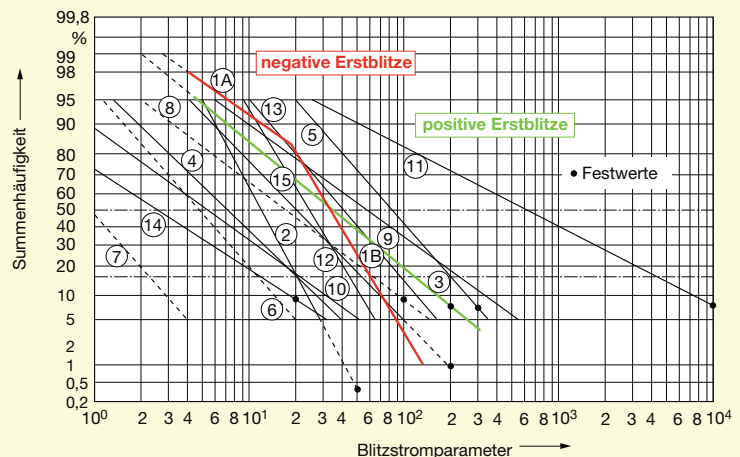
2 Dynamisch elektro-geometrisches Modell

Im Verfahren des dynamischen elektro-geometrischen Modells wird die Länge der Enddurchschlagstrecke (= Radius der Blitzkugel) variiert. Dabei werden die folgenden, in den Blitzschutznormen enthaltenen, blitzphysikalischen Grundlagen und mathematischen Überlegungen verknüpft [5][6]:

1. In DIN EN 62305-1 [3], Anhang A, Bild A.5, sind die Summenhäufigkeits-Verteilungen der Blitzstrom-Scheitelwerte natürlicher Blitzentladungen gegeben (Bild 2). Herangezogen werden hier die Verteilungen der Blitzstrom-Scheitelwerte für die negativen Erstblitze



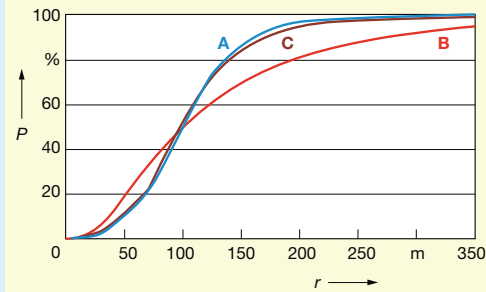
1 Mit Blitzkugel-Verfahren zu schützendes Gebäude (Blitzkugel mit Radius r) [1]
links: Seitenansicht; rechts: Dachansicht



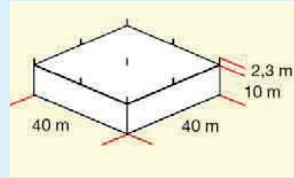
2 Summenhäufigkeits-Verteilung der Blitzstromparameter (aus DIN EN 62305-1 [3])

Autoren
Prof. Dr. Ing. Alexander Kern, FH Aachen, Campus Jülich, FB Energietechnik; Prof. Dr. rer. nat. Christof Schelthoff, FH Aachen, Campus Jülich, FB Medizintechnik und Technomathematik; M. Sc. Moritz Mathieu, FH Aachen, Campus Jülich, FB Medizintechnik und Technomathematik.

Das dynamische elektro-geometrische Modell



3 Summenhäufigkeits-Verteilung der Blitzkugelradien r nach Gl. 1



4 Neun Fangstangen für einen Schutz der Dachfläche für Schutzklasse III ($d = 20 \text{ m}$) – erforderliche Mindesthöhe $h = 2,3 \text{ m}$

(Kurven 1A/1B) und für die positiven Erstblitze (Kurve 3). Diese beiden Verteilungen werden gewichtet zu einer gemeinsamen Verteilung zusammengefasst. Dabei wird gemäß [3] davon ausgegangen, dass 90 % der natürlichen Blitzentladungen negative Polarität aufweisen und nur 10 % positive Polarität. Aus diesen Verteilungen ergibt sich also die Wahrscheinlichkeit, dass ein natürlicher Erstblitz mindestens den zugeordneten Blitzstrom-Scheitelwert aufweist.

2. Gemäß des elektro-geometrischen Modells kann jedem Blitzstrom-Scheitelwert mit der (Gl. 1) eine Länge der Enddurchschlagstrecke zugewiesen werden (siehe [3], Anhang A, Gleichung A.1):

$$r = 10 \cdot I^{0,65} \quad (\text{Gl. 1})$$

r Länge der Enddurchschlagstrecke in m (= Radius der Blitzkugel)
 I Blitzstromscheitelwert in kA.

Aus den Summenhäufigkeits-Verteilungen nach Bild **2** kann nun mit (Gl. 1) die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Länge der Enddurchschlagstrecke und damit für einen Radius der Blitzkugel berechnet werden. Bild **3** zeigt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Radius der Blitzkugel durch

den gegebenen Wert abgedeckt ist. Das Diagramm enthält die folgenden Verteilungen:

- A: nur negative Erstblitze
- B: nur positive Erstblitze
- C: negative Erstblitze und positive Erstblitze im Verhältnis 90 % zu 10 %.

Beispiel: Mit einem Radius der Blitzkugel von $r = 150 \text{ m}$ werden ca. 85 % aller natürlichen Blitzentladungen abgedeckt (Verteilung C). Lediglich 15 % aller Blitzentladungen haben noch größere Blitzkugel-Radien.

- 3.** Die gesamte Oberfläche der zu schützenden baulichen Anlage einschließlich der Fangeinrichtungen des Blitzschutzsystems (z. B. Fangstangen) wird räumlich diskretisiert (Oberflächenpunkte). Eine Diskretisierungsweite von wenigen Metern ist hier üblicherweise ausreichend.
- 4.** Der Raum oberhalb und seitlich neben der baulichen Anlage wird ebenfalls räumlich und mit der gleichen Diskretisierungsweite diskretisiert (Volumenpunkte).
- 5.** Mit einfachen geometrischen Überlegungen wird zu jedem Volumenpunkt der nächstgelegene Oberflächenpunkt ermittelt. Die Entfernung zwischen einem Volumenpunkt und einem Oberflächenpunkt entspricht der Länge der Enddurchschlagstrecke und damit

dem Radius einer Blitzkugel. Für diesen Radius (bzw. dem zugehörigen Radius-Intervall entsprechend der räumlichen Diskretisierung) kann gemäß Schritt 1 und Schritt 2 ein Intervall des Blitzstrom-Scheitelwerts und damit ein Wahrscheinlichkeitswert für den Blitzschlag zugeordnet werden. Dieser Wahrscheinlichkeitswert wird dem nächstgelegenen Oberflächenpunkt zugeordnet. Dieser Schritt wird für alle Volumenpunkte wiederholt.

- 6.** Da ein Oberflächenpunkt der nächstgelegene Punkt zu verschiedenen Volumenpunkten sein kann (mit unterschiedlichen Radien), müssen für jeden Oberflächenpunkt alle Wahrscheinlichkeitswerte nach Schritt 5 aufaddiert werden. Die Summe ergibt die konkrete Einschlagwahrscheinlichkeit in diesen Oberflächenpunkt. Im speziellen Fall, dass von einem Volumenpunkt zwei oder mehr Oberflächenpunkte die gleiche Entfernung haben, wird die Wahrscheinlichkeit in diesen Oberflächenpunkte einzuschlagen, gleichmäßig auf diese aufgeteilt. Abschließend werden die Wahrscheinlichkeitswerte auf die Gesamtwahrscheinlichkeit 100 % für die gesamte bauliche Anlage normiert.

Hinzuweisen ist darauf, dass für das Verfahren des dynamischen elektro-geometrischen Modells ausschließlich der geometrische Abstand zwischen dem Volumenpunkt und dem Oberflächenpunkt herangezogen wird. Jegliche Feldüberhöhung an exponierten Stellen der Oberfläche (z. B. Fangstangen-Spitzen, Gebäudedach-Ecken) wird vernachlässigt, da angenommen wird, dass sie nur in unmittelbarer Umgebung der exponierten Stellen auftreten und damit die Anfangsbedingungen für den Enddurchschlag nicht wesentlich beeinflussen. Aus diesem Grunde kann der Ansatz des dynamischen elektro-geometrischen Modells als sehr konservativ gelten.

Das dynamische elektro-geometrische Modell

3 Untersuchungen an einem Referenzgebäude

Für die Untersuchungen wird ein einfaches Gebäude mit einer ebenen quadratischen Dachfläche von 40 m x 40 m und einer Höhe von 10 m herangezogen. Für das Dach soll ein Schutz gegen direkte Blitzeinschläge auf der Basis von Fangstangen errichtet werden. Variiert werden

- die Schutzklasse des Blitzschutzsystems (I – II – III – IV) bzw. die zugehörigen Radien der Blitzkugel r (20 m – 30 m – 45 m – 60m)
- und die Abstände der in Quadraten angeordneten Fangstangen d (5 m – 10 m – 20 m – 40 m).

Die erforderliche Höhe der Fangstangen h ergibt sich dann aus dem maximal erlaubten Durchhang p gemäß:

$$p = r - \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{2}} \quad (\text{Gl. 2})$$

- r Radius der Blitzkugel (= Länge der Enddurchschlagstrecke)
- d Abstand der Fangstangen (Seitenlänge der Quadrate, die von den Fangstangen gebildet werden).

Für den Fall, dass keine weiteren Dachaufbauten zu schützen sind, gilt $h = p$. Bild 4 zeigt ein Beispiel der Ausführung dieser Fangeinrichtungen. Tafel 1 gibt alle Mindesthöhen der Fangstangen wieder, die für die jeweilige Kombination von Schutzklasse des Blitzschutzsystems bzw. Radius der Blitzkugel und Abstand der Fangstangen erforderlich sind. Der Fall der Schutzklasse I mit nur vier Fangstangen an den vier Dachecken, d. h. $d = 40$ m, ist nicht normgerecht; er fehlt deshalb konsequenterweise auch in der Tafel. In der Tafel 2 sind weiterhin noch die Einfangwirksamkeiten W_1 für die einzelnen Schutzklassen angegeben, wie sie sich aus DIN EN 62305-1 [3] ergeben. Dieser Normenteil legt zwar direkt keine Einfangwirksamkeiten fest; diese stecken aber implizit in

Tafel 1 Mindesthöhe h [in m] in Abhängigkeit von der Schutzklasse des Blitzschutzsystems bzw. des Radius der Blitzkugel r und des Abstands der Fangstangen d

Schutzklasse	Blitzkugelradius r in m	Abstand der Fangstangen d in m				Einfangwirksamkeit [3] W_1 in %
		5	10	20	40	
I	20	0,3	1,3	5,9	—	99
II	30	0,2	0,9	3,6	20	97
III	45	0,15	0,6	2,3	10	91
IV	60	0,1	0,4	1,7	7,1	84

den in [3] genannten „kleinsten Scheitelwerten“. Die Wirksamkeit eines Blitzschutzsystems wird bestimmt durch:

- Die Dimensionierungs-Wirksamkeit (engl. sizing efficiency) dokumentiert, dass Komponenten des Blitzschutzsystems bei Überschreiten bestimmter Wirkungsparameter von Blitzströmen diesen nicht mehr standhalten können, also zerstört werden. Dies geschieht bei sehr hohen Blitzstromparametern.
- Die Einfang-Wirksamkeit (engl. interception efficiency) drückt aus, dass ein Blitzschutzsystem einen bestimmten Prozentsatz natürlicher Blitzentladungen nicht mehr einfängt. Dies ist in [3] vereinfacht mit dem Unterschreiten bestimmter, „kleinster“ Blitzstrom-Scheitel-

werte festgeschrieben. Die Einfang-Wirksamkeit bezieht sich dabei natürlich nur auf die Fangeinrichtungen eines Blitzschutzsystems. Werden beide Wirksamkeiten nach DIN EN 62305-1 [3] überlagert, ergeben sich daraus die Werte der Schadenswahrscheinlichkeit P_B für ein Blitzschutzsystem zur Verringerung physikalischer Schäden gemäß DIN EN 62305-2 [2] (Tafel 2).

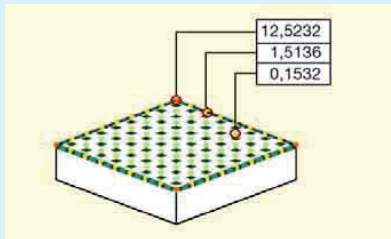
4 Reale Einfangwirksamkeit des betrachteten Modells

Für die sich gemäß Tafel 1 ergebenden 15 Fälle wurden die numerischen Berechnungen nach dem dynamischen elektro-geometrischen Modell durchgeführt. Tafel 3 gibt die Einfangwirksamkeiten W_2 für die berechneten 15 Fälle an (zur besseren Vergleichbarkeit mit Tafel 1 in ähnlicher Anordnung). Die Werte gelten für alle jeweils vorhandenen Fangstangen in Summe. Das heißt, die auf 100 % fehlenden Anteile sind die Fangfehler, die zwischen den Fangstangen noch das Dach selbst treffen. Die Bilder 5 bis 6 zeigen für vier Beispiele das Ergebnis graphisch, jeweils für eine Schutzklasse (SkI.) und einen Abstand d der Fangstangen. Dabei sind sehr gut die unterschiedlichen Einfangwirksamkeiten für eine Fangstange an der Dachecke, der Dachkante und der Dachmitte zu erkennen.

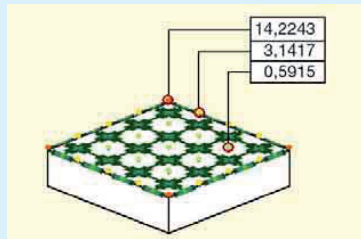
Tafel 2 Zusammenhang zwischen Wirksamkeiten und Schadenswahrscheinlichkeit in der Normenreihe DIN EN 62305-1 bis 4

Gefährdungspegel (LPL) [3] bzw. Schutzklasse des Blitzschutzsystems (LPS) [1]	IV	III	II	I
Dimensionierungs-Wirksamkeit [3]	0,95	0,95	0,98	0,99
Einfang-Wirksamkeit [3]	0,84	0,91	0,97	0,99
Überlagerte (Gesamt-)Wirksamkeit	0,80	0,90	0,95	0,98
Schadenswahrscheinlichkeit P_B [2]	0,20	0,10	0,05	0,02

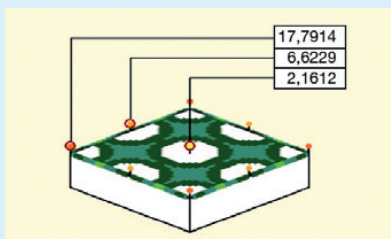
Das dynamische elektro-geometrische Modell



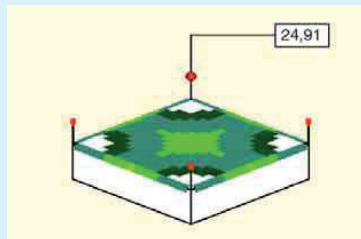
5 **Einfangwirksamkeiten [in %] für Skl. I**
(Abstand der Fangstangen $d = 5$ m,
Höhe $h = 30$ cm)
**99,97 % der Blitzeinschläge erfolgen
in die 81 Fangstangen**



6 **Einfangwirksamkeiten [in %] für Skl. II** ($d = 10$ m, $h = 90$ cm)
**99,92 % der Blitzeinschläge erfolgen
in die 25 Fangstangen**



7 **Einfangwirksamkeiten [in %] für Skl. III** ($d = 20$ m, $h = 2,3$ m)
**99,81 % der Blitzeinschläge erfolgen
in die neun Fangstangen**



8 **Einfangwirksamkeiten [in %] für Skl. IV** ($d = 40$ m, $h = 7,1$ m)
**99,65 % der Blitzeinschläge erfolgen
in die vier Fangstangen**

Es ist festzustellen, dass die realen Einfangwirksamkeiten nach Tafel 3 wesentlich höher sind als die in [3] genannten Einfangwirksamkeiten nach Tafel 1. Um dies nochmals vereinfacht zu dokumentieren, werden in Tafel 4 die nach Tafel 1 prognostizierten Fangfehler der Fangstangen $(1 - W_1)$ den realen Fangfehlern $(1 - W_2)$ nach Tafel 3 gegenübergestellt. Mit den Verhältnissen der Fangfehler $(1 - W_1) / (1 - W_2)$ wird also dargestellt, um welchen Faktor F die nach DIN EN 62305-3 [1] geplanten Fangstangen hinsichtlich ihrer Einfangwirksamkeit besser bzw. effektiver sind, als in der Normenreihe selbst vorgegeben. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese Werte für den Faktor F noch von der Geometrie der baulichen Anlage (Länge, Breite, Höhe, Dachneigung, Dachaufbauten usw.) abhängen. Das heißt, die in Tafel 4 angegebenen Werte gelten nur für das konkrete Beispieldach, sie sind also keinesfalls allgemeingültig für die einzelnen Schutzklassen eines LPS.

5 Zusammenfassung

Beim vorgestellten dynamischen elektro-geometrischen Modell werden vorhandene und in internationalen Normen anerkannte Ergebnisse, Zusammenhänge und Untersuchungen verwendet. Auf dieser Grundlage wurde ein numerisches Verfahren erarbeitet, mit dem die realen Einschlag-Wahrscheinlichkeiten an den verschiedenen Punkten eines Gebäudes berechnet werden können. Wie erwartet sind die Ecken und Kanten eines Gebäudes deutlich stärker gefährdet als die flachen Dachebenen.

Tafel 3 **Einfangwirksamkeit W_2 [in %] nach dem dynamischen elektro-geometrischen Modell in Abhängigkeit von der Schutzklasse des Blitzschutzsystems und des Abstands der Fangstangen d**

Schutzklasse	5	10	20	40
I	99,97	99,97	99,96	—
II	99,92	99,92	99,93	99,74
III	99,83	99,84	99,81	99,79
IV	99,53	99,56	99,64	99,65

Das dynamische elektro-geometrische Modell kann grundsätzlich für beliebige Geometrien einer baulichen Anlage angewendet werden. Es gibt neben den Einfang-Wirksamkeiten auch die maximal auftretenden Scheitelwerte der Blitzströme an, die an den unterschiedlichen Stellen einer baulichen Anlage einschlagen können.

Mit Hilfe des dynamischen elektro-geometrischen Modells wird gezeigt, dass die Einfang-Wirksamkeiten von Fangstangen, die mit dem klassischen Blitzkugel-Verfahren nach DIN EN 62305-3 [1] geplant werden, wesentlich höher sind, als in der Normenreihe selbst angegeben [2][3]. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass das Blitzkugel-Verfahren konservativ aufgebaut ist und dem Planer von Blitzschutzsystemen nur alle möglichen Stellen für einen Einschlag aufzeigt, jedoch keine Bewertung durch eine Einschlagshäufigkeit direkt dazu liefert. Andererseits bedeutet dies jedoch auch, dass man mit dem klassischen Blitzkugel-Verfahren stets auf der „sicheren Seite“ liegt.

Will man die realen Einfangwirksamkeiten für eine konkrete Anordnung von Fangeinrichtungen ermitteln, so kann diese Berechnung jederzeit mit dem dynamischen elektro-geometrischen Modell erfolgen. Schließlich können die dargestellten Ergebnisse auch dazu beitragen, ein besseres Verständnis der „Wirksamkeit“ von nicht-konventionellen Fangeinrichtungen (ESE-AT = Early Streamer Emission Fangeinrichtungen) zu erhalten. Die Wirksamkeit von ESE-Fangeinrichtungen wird häufig empirisch begründet: Aus der hohen Anzahl von installierten Systemen und der (angeblich) geringen Anzahl von Fangfehlern lasse sich doch die sehr gute Funktionalität direkt ableiten.

Die geringe Anzahl von Fangfehlern ist jedoch verständlich, wenn man die Installationen von ESE-Fangeinrichtungen genauer betrachtet: Es sind eben hohe Fangstangen, die an den höchsten Stellen der Gebäude platziert werden. Also dort, wo auch grundsätzlich hohe Einfangwirksamkeiten für stromstarke Blitzentladungen bestehen. Dort wirken sie gemäß der Auffassung des internationalen Normenkomitees IEC TC 81 und der internationalen Wissenschaftlichen Gemeinschaft (CIGRE, ICLP) ebenso wie klassische (Franklin-)Fangstangen [1][3], ohne dass eine wirksame Vorionisation, also ein Blitztrigger-Effekt,

Tafel 4 **Verhältnis der Fangfehler $F = (1 - W_1) / (1 - W_2)$ nach dem dynamischen elektro-geometrischen Modell in Abhängigkeit von der Schutzklasse des Blitzschutzsystems und des Abstands der Fangstangen d**

Schutzklasse	5	10	20	40
I	33	33	25	—
II	37	37	43	11
III	53	56	47	43
IV	34	36	44	45

einsetzt. Man könnte sie also, wie die Untersuchungen mit dem dynamischen elektro-geometrischen Modell zeigen, wohl auch durch einfache Franklin-Fangstangen ersetzen und hätte damit den Schutz nicht verschlechtert.

Literatur

- [1] DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) Ed.2: 2011-10: Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen.
- [2] DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2): 2006-10: Blitzschutz – Teil 2: Risikomanagement.
- [3] DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1) Ed.2: 2011-10: Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze.
- [4] Wettingfeld, J.; Kern, A.; Krämer, H.-J.; Thormählen, R.: International anerkannte Blitzschutznormen; Ausgewogener und sicherer Schutz. de, Heft 13-14/2009.
- [5] Kern, A.; Schelthoff, C.; Mathieu, M.: Die dynamische Blitzkugel; Wahrscheinlichkeitsberechnung für Blitzeinschläge in Gebäude. de 13-14/2010.
- [6] Kern, A.; Schelthoff, C.; Mathieu, M.: Detaillierte Berechnung der Einfangwirksamkeiten von Fangeinrichtungen mit einem dynamischen elektro-geometrischen Modell. 9. VDE/ABB-Blitzschutztagung, Neu-Ulm, 2011.