

Die dynamische Blitzkugel

Wahrscheinlichkeitsberechnung für Blitzeinschläge in Gebäude

Mithilfe des hier erstmalig der breiten Fachöffentlichkeit vorgestellten dynamischen Blitzkugelverfahrens will der Autor zeigen, dass sich bereits mit einer relativ kleinen Anzahl von Fangstangen ein hoch effizientes Fangeinrichtungssystem realisieren lässt. Verglichen mit dem in den Normen verankerten, klassischen Blitzkugelverfahren kann die Anzahl der Fangstangen mitunter signifikant reduziert werden. Es gilt natürlich, dass der Planer mit dem klassischen Blitzkugelverfahren stets auf der sicheren Seite liegt.

Die Autoren stellen ein dynamisches Blitzkugelverfahren vor, welches vorhandene und international anerkannte Ergebnisse, Zusammenhänge und Untersuchungen verwendet. Auf dieser Grundlage wurde ein numerisches Verfahren erarbeitet, das an den verschiedenen Punkten einer Gebäudeoberfläche die realen Einschlagwahrscheinlichkeiten berechnet. Wie erwartet sind die Ecken und Kanten eines Gebäudes deutlich stärker gefährdet als die flachen Dachebenen.

Die Planung der Fangeinrichtungen von Blitzschutzsystemen für bauliche Anlagen kann nach drei grundsätzlichen Verfahren durchgeführt werden, die in internationalen [1, 2] und nationalen [3, 4] Blitzschutz-Normen beschrieben sind:

- Blitzkugelverfahren (»elektrogeometrisches« Modell);
- daraus abgeleitet: Schutzwinkelverfahren;
- daraus abgeleitet: Maschenverfahren für ebene (Dach-)Flächen.

Klassisches Blitzkugelverfahren

Das Blitzkugelverfahren ist dabei die grundsätzliche Planungsmethode. Sie ist seit vielen Jahren bekannt, erprobt und bewährt [5]. Für unterschiedliche Anforderungen an ein Blitzschutzsystem werden vier Gefährdungspegel [3] und darauf basierend vier Blitzschutzklassen (I – II – III – IV) definiert [4]. Sie

unterscheiden sich hinsichtlich des Blitzkugelverfahrens im anzusetzenden Radius der Blitzkugel. Dieser beträgt, je nach Blitzschutzklasse, zwischen 20m und 60m. Der Radius der Blitzkugel ist also beim klassischen Blitzkugelverfahren ein fester Wert, nur abhängig von der Blitzschutzklasse.

Mit dem Blitzkugelradius werden unterschiedliche, kleinste Scheitelwerte von natürlichen Blitzentladungen abgedeckt, d. h. Blitzkugeln mit kleineren Radien können grundsätzlich noch das zu schützende Gebäude neben den Fangeinrichtungen, die nach [4] geplant sind, 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. Allerdings ist darin keine Information enthalten, wie wahrscheinlich jeweils der Blitzeinschlag an den einzelnen Stellen ist.

Betrachtet man ein einfaches, quaderförmiges Gebäude (Bilder 1 und 2), so erkennt man, dass durch die Positionierung der Blitzkugel jedem potenziellen Einschlagspunkt auf der waagerechten Dachfläche jeweils nur ein Mittelpunkt der Blitzkugel zugeordnet werden kann, während an den Dachkanten und -ecken die Blitzkugel um 90° »herumgerollt« werden kann. Dieses Herumrollen hat zur Folge, dass dem entsprechenden, potenziellen Einschlagspunkt auf der Dachkante, insbesondere aber der Dachecke wesentlich mehr Mittelpunkte der Blitzkugel zuzuordnen sind.

Basierend auf dem Blitzkugelverfahren sind aber sowohl das Flachdach, wie auch Dachkanten und -ecken potenzielle Einschlagspunkte, welche durch Fangeinrichtungen zu schützen sind. Diese Feststellung erfolgt also ohne Würdigung der Tatsache, dass der Einschlag in eine Dachkante und -ecke wesentlich wahrscheinlicher ist, als der in den inneren Bereich des Flachdachs.

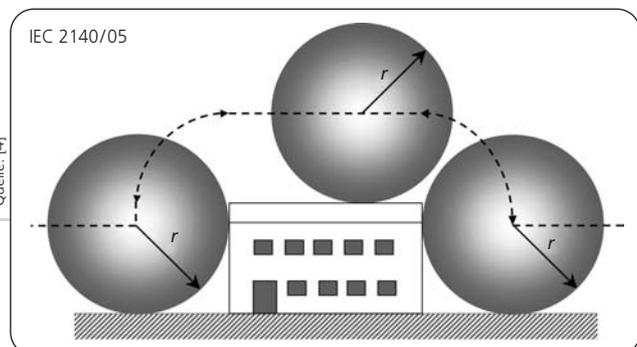


Bild 1: Mit Blitzkugelverfahren zu schützendes Gebäude (Blitzkugel mit dem Radius r) – Seitenansicht

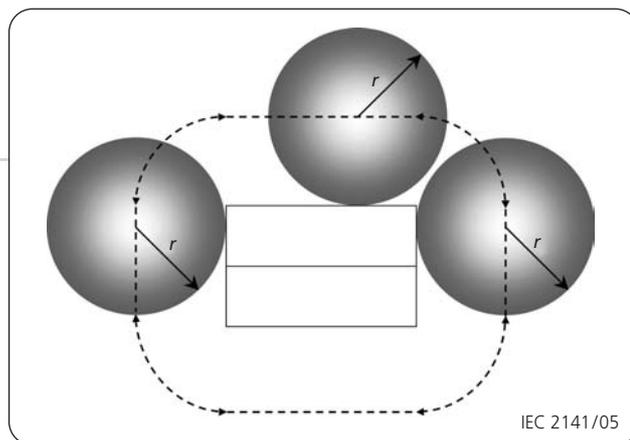


Bild 2: Mit Blitzkugelverfahren zu schützendes Gebäude (Blitzkugel mit dem Radius r) – Dachansicht

Die Dynamisierung des Blitzkugelverfahrens

Das hier vorgestellte Verfahren bezieht die Wahrscheinlichkeiten des Einschlags an einer ganz bestimmten Stelle mit ein. Damit können die einzelnen Gefährdungsbereiche besser verglichen werden. Die »dynamische Blitzkugel« arbeitet nun im Gegensatz zum »klassischen Blitzkugelverfahren« nicht mit konstanten Radien. Vielmehr wird hier der Radius der Blitzkugel variiert. Dabei werden die folgenden, in den Blitzschutznormen enthaltenen, blitzphysikalischen Grundlagen und mathematischen Überlegungen verknüpft:

In [3], Anhang A, Bild A.5 sind die Summenhäufigkeitsverteilungen der Blitzstrom-Scheitelwerte natürlicher Blitzentladungen gegeben (Bild 3). Herangezogen werden hier die Verteilungen der Blitzstrom-Scheitelwerte für die negativen Erstblitze (Kurven 1A/1B) und für die positiven Erstblitze (Kurve 3). Diese beiden Verteilungen werden gewichtet zu einer gemeinsamen Verteilung zusammengefasst, wobei gemäß [3] davon ausgegangen wird, 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.

Gemäß dem elektrogeometrischen Modell kann jedem Blitzstrom-Scheitelwert eine Länge der Enddurchschlagstrecke zugewiesen werden (siehe [3], Anhang A, Gleichung A.1):

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

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

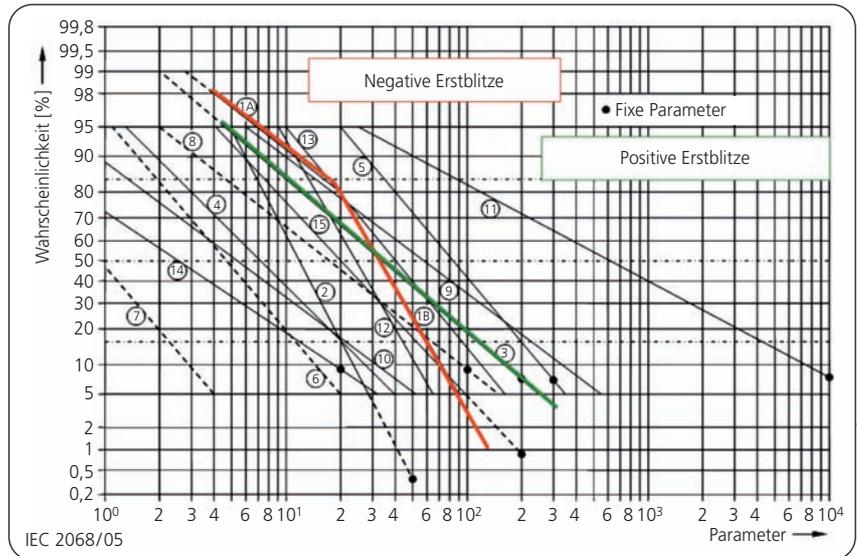


Bild 3: Summenhäufigkeitsverteilungen der Blitzstromparameter

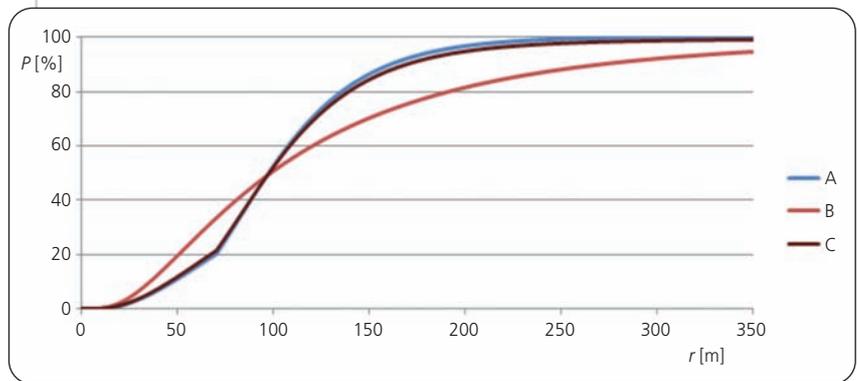


Bild 4: Summenhäufigkeitsverteilung der Blitzkugel-Radien nach (Gl. 1). Beispiel: Mit einem Radius der Blitzkugel von $r = 150\text{m}$ werden ca. 85 % aller natürlichen Blitzentladungen abgedeckt (Verteilung C). Lediglich 15 % aller Blitzentladungen weisen noch größere Blitzkugel-Radien auf

Aus den Summenhäufigkeitsverteilungen nach Bild 3 kann nun mit $r = 10 \cdot I^{0,65}$ die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Länge der Enddurchschlagstrecke und damit ein Radius der Blitz-

kugel berechnet werden. Bild 4 zeigt, mit welcher Wahrscheinlichkeit der gegebene Wert einen bestimmten Radius der Blitzkugel abdeckt. Das Diagramm enthält folgende Verteilungen:

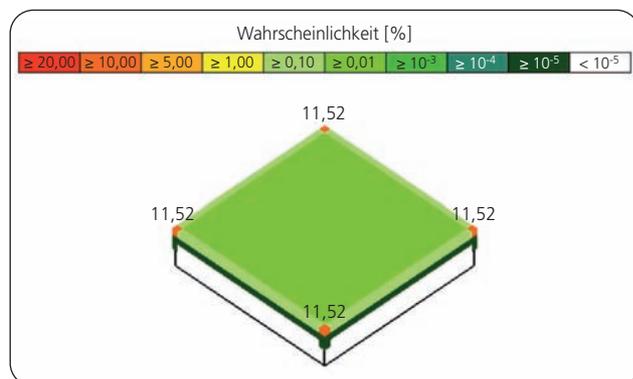


Bild 5: Einschlagwahrscheinlichkeit für Beispielgebäude 1 (Flachdach 40 m x 40 m, 10 m hoch) ohne Fangeinrichtungen

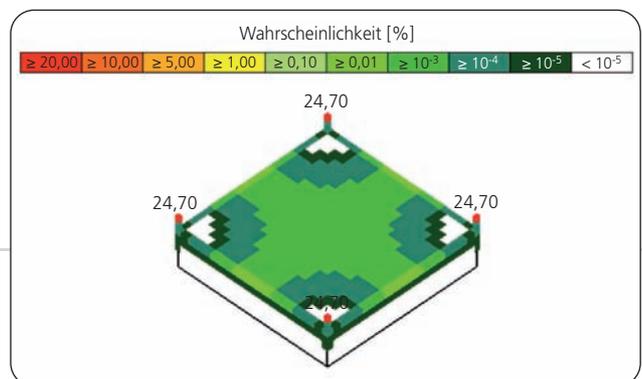


Bild 6: Einschlagwahrscheinlichkeit für Beispielgebäude 2 (Flachdach 40 m x 40 m, 10 m hoch) mit vier Fangstangen (4 m hoch) in den Ecken

- A: nur negative Erstblitze;
 - B: nur positive Erstblitze;
 - C: negative Erstblitze und positive Erstblitze im Verhältnis 90 % zu 10 %.
- Die gesamte Oberfläche der zu schützenden baulichen Anlage, einschließlich der Fangeinrichtungen des Blitzschutzsystems (z.B. Fangstangen), wird räumlich in Oberflächenpunkte diskretisiert. Der Raum oberhalb und seitlich neben der baulichen Anlage wird ebenfalls räumlich in Volumenpunkte diskretisiert. Mit einfachen geometrischen Überlegungen wird nun zu jedem Volumenpunkt der nächstgelegene Oberflächenpunkt ermittelt.

Auf das mathematische Verfahren soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Es liefert im Ergebnis konkrete Einschlagwahrscheinlichkeiten in die Oberflächenpunkte der zu schützenden baulichen Anlage sowie abschließende Wahrscheinlichkeitswerte, die auf die Gesamtwahrscheinlichkeit 100 % für die gesamte bauliche Anlage normiert werden.

Erste Anwendungsbeispiele

Als einfache Anwendungsbeispiele werden hier drei Grundgebäude definiert:

- Beispielgebäude 1) Einfaches Gebäude mit einer Dachfläche von 40 m x 40 m und einer Höhe von 10 m,
- Beispielgebäude 2) wie Beispielgebäude 1, dafür mit vier Fangstangen in den Dachecken,
- Beispielgebäude 3) wie Beispielgebäude 1, mit einer (zentralen) Fangstange in der Dachmitte.

Gebäude ohne Fangeinrichtung

Bild 5 zeigt das *Beispielgebäude 1* ohne Fangeinrichtungen bzw. mit einem vermaschten Fangeinrichtungsnetz für Flachdächer. Die Existenz einer solchen Fangeinrichtung beeinflusst die Einschlagwahrscheinlichkeit nicht. Die Berechnung zeigt, dass die aufsummierte Einschlagwahrscheinlichkeit für alle vier Dachecken einen Wert von ca. 46 % ergibt (je Ecke 11,5 %). Gemäß

dem klassischen Blitzkugelverfahren müsste ein Schutzsystem das Dach überall gleichermaßen gegen Blitzschläge schützen. Bild 5 zeigt jedoch, dass sich die Einschlagwahrscheinlichkeiten alles andere als gleichmäßig auf dem Dach verteilen. Dies wird insbesondere an den Dachecken deutlich.

Fangstangen an den vier Dachecken

Bild 6 zeigt das *Beispielgebäude 2*, welches auf dem Beispielgebäude 1 basiert, jedoch ist dieses durch vier Fangstangen (je 4 m hoch) in den Ecken geschützt. Betrachtet man nur die aufsummierten Werte für die vier Fangstangen, so ergibt sich in etwa eine Einschlagwahrscheinlichkeit von 99 % (je Fangstange 24,7 %).

Im Vergleich zu Bild 5 ist die immense Effektivität der Fangstangen deutlich zu sehen. Es wird dabei ein nahezu perfekter Schutz des Daches erreicht. Ein Blitzschutzsystem mit einer Einfangwahrscheinlichkeit von 99 % aller Blitze entspricht einem Blitz-

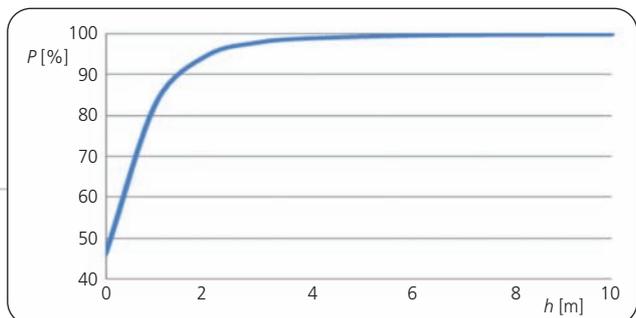


Bild 7: Beispielgebäude 2 – aufsummierte Einschlagwahrscheinlichkeit P in die vier Fangstangen abhängig von deren Höhe h

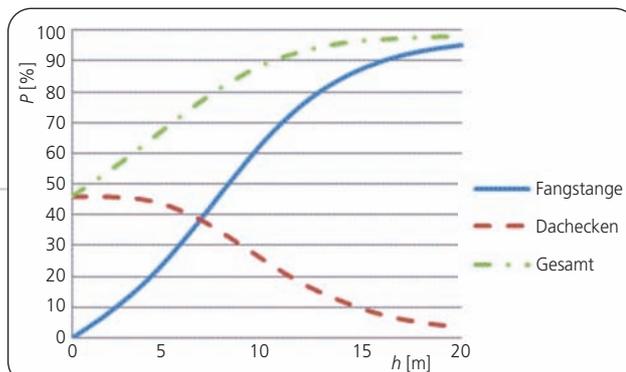


Bild 9: Beispielgebäude 3 – Einschlagwahrscheinlichkeiten P für eine Fangstange der Höhe h, für die Summe der vier Dachecken und als Gesamtwert für beide Bereiche zusammen

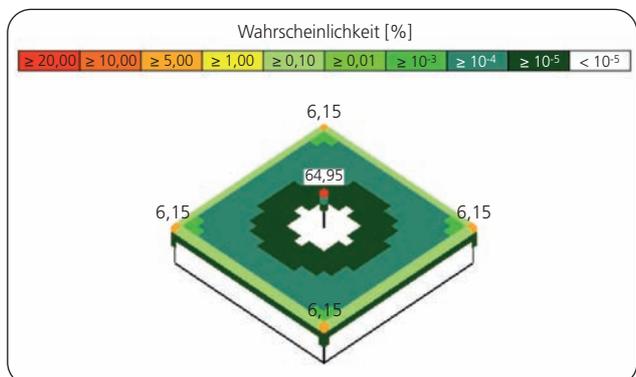


Bild 8: Einschlagwahrscheinlichkeit für Beispielgebäude 3 (Flachdach 40 m x 40 m, 10 m hoch) mit einer Fangstange in der Dachmitte

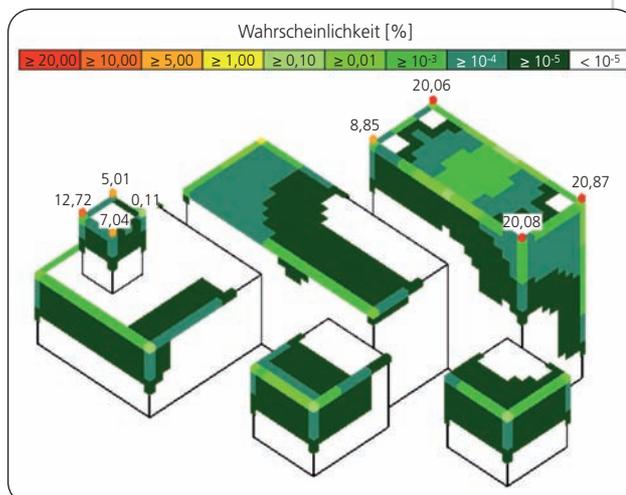


Bild 10: Beispiel einer Anordnung von Fangeinrichtungen (acht Fangstangen) an einer komplexen Gebäudegeometrie – Angabe der Einschlagwahrscheinlichkeiten

schutzsystem der Klasse I. Zusätzlich gilt es zu berücksichtigen, dass die vier Fangstangen ihre Arbeit umso effizienter verrichten können, je höher die Blitzstrom-Scheitelwerte werden. Es können nur relativ geringe Blitzströme das Innere des Daches erreichen, welche in der Realität dann auch nur eine schwache zerstörerische Wirkung ausüben können.

Werden diese vier Fangstangen nach dem klassischen Blitzkugelverfahren untersucht, und wird angenommen, dass die Blitzschutz-Klasse I zugrunde zulegen ist (Blitzkugel-Radius 20m), berühren die Blitzkugeln, ausgehend von einer Fangstange in der Ecke, das Dach bereits in einem Abstand von 12m. Folglich müssten große Bereiche des Daches (annähernd 1200m², entsprechend 75% des Daches) mit weiteren Fangeinrichtungen (Fangstangen oder Fangleitungen) geschützt werden. Die Information, dass die Wahrscheinlichkeit eines Blitzeinschlags in diese zusätzlichen Fangeinrichtungen gerade einmal ca. 1% beträgt, fehlt im klassischen Planungsverfahren.

Abschließend wird die Höhe der Fangstangen an den vier Dachecken

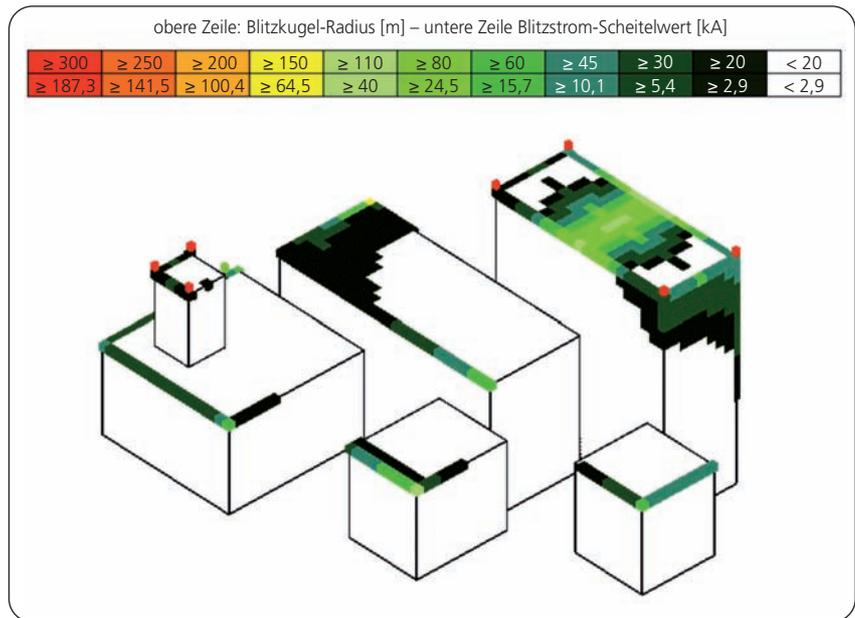


Bild 11: Beispiel einer Anordnung von Fangeinrichtungen (acht Fangstangen) an einer komplexen Gebäudegeometrie – Angabe der maximalen Blitzkugelradien und der maximalen Blitzstrom-Scheitelwerte

zwischen 0m und 10m variiert. Wie in **Bild 7** zu sehen ist, schlagen bereits bei einer Höhe von 2m 95% aller Blitze in die Fangstangen ein. Ab einer Höhe

von 4m ist die Einfangwahrscheinlichkeit größer 99%, so dass noch höhere Fangstangen keine merkliche Verbesserung mehr erbringen.

Fangstange in der Dachmitte

Bild 8 zeigt das *Beispielgebäude 3*, welches allein durch eine zentrale Fangstange in der Dachmitte geschützt wird. Trotz der Höhe der Fangstange von 10m liegt die Einschlagswahrscheinlichkeit in die Fangstange bei nur 65%. Die vier Ecken des Daches weisen eine aufsummierte Wahrscheinlichkeit von etwa 24% auf (6,1% je Ecke).

Variiert man nun wieder die Höhe dieser einzelnen Fangstange, wird eine Einfangwahrscheinlichkeit von 50% bei einem Wert von ca. 8m erreicht (**Bild 9**). Erst wenn die Fangstange eine Höhe von unrealistischen 20m erreicht hat, schlagen ca. 95% aller Blitze dort ein. Werden nun die Ecken mit berücksichtigt, kann die Wirksamkeit deutlich verbessert werden. Platziert man zusätzlich zu einer 10m hohen Fangstange in der Dachmitte in den Ecken noch kleine Fangstangen, erreicht die Einfangwahrscheinlichkeit über 91% – was den Anforderungen eines Blitzschutzsystems der Klasse III entspräche. Im Gesamtergebnis ist der Schutz durch kurze Fangstangen in den Ecken eines Daches wesentlich effektiver, als der Schutz durch eine hohe Fangstange in der Dachmitte.

Komplexe Gebäude

Das Verfahren lässt sich auch auf beliebige Gebäudegeometrien übertragen. **Bild 10** zeigt ein Gebäude mit komplexer Geometrie (Längen, Breiten und Höhen jeweils in m). Es soll angenommen werden, dass für das Gebäude die Blitzschutzklasse III erforderlich ist. Dafür gilt eine Einfangwahrscheinlichkeit von 91%, d.h. 91% aller Blitzeinschläge auf dem Gebäude müssen von Fangeinrichtungen eingefangen werden. **Bild 10** zeigt dafür eine mögliche Lösung. Mit nur acht Fangstangen (vier an jeder Ecke des höchsten Gebäudeblocks rechts hinten, weitere vier an jeder Ecke des Dachaufbaus links vorne, Höhe jeweils 2m) werden sogar ca. 94% aller Blitzeinschläge eingefangen.

In Ergänzung dazu zeigt **Bild 11** die maximalen Blitzkugelradien und die maximalen Blitzstrom-Scheitelwerte, die an den unterschiedlichen Stellen des Gebäudes noch auftreten können. Hierbei sind besonders die ungeschützten Bereiche des Gebäudes von Interesse. Es zeigt sich, dass wieder nur relativ »kleine«, also stromschwache Blitze neben den Fangeinrichtungen einschlagen. Diese Blitze führen damit im

Einschlagfall auch nur zu geringen Schäden.

Zieht man die Informationen der Bilder 10 und 11 gemeinsam heran, kann die Einschlagwahrscheinlichkeit der Fangeinrichtungen einfach und schnell weiter verbessert werden. Vier zusätzliche Fangstangen an den vier noch ungeschützten Ecken des Gebäudes, an denen die Einschlagwahrscheinlichkeit noch Werte $> 0,1\%$ aufweist, und zwei weitere Fangstangen auf der mittleren Dachachse des höchsten Gebäudeblocks rechts hinten, wo gemäß **Bild 11** noch mit Blitzstrom-Scheitelwerten $> 40\text{kA}$ zu rechnen ist, erhöhen die gesamte Einschlagwahrscheinlichkeit auf über 99%. Dies würde sogar die Anforderungen der Blitzschutzklasse I erfüllen.

Es sei abschließend darauf hingewiesen, dass die nach dem dynamischen Blitzkugelverfahren geplanten Fangeinrichtungen nur nach dem Kriterium der Einschlagwahrscheinlichkeit positioniert werden. Ein Blitzschutzsystem kann aber auch andere Kriterien zu erfüllen haben [6]. So kann z.B. aus Gründen des Blitzschutz-Potentialausgleichs, der ausreichenden Stromaufteilung oder der Reduzierung von magnetisch in Schleifen induzierten Spannungen die Aufstellung weiterer Fangeinrichtungen erforderlich sein.

Schlussbemerkungen

Mithilfe des dynamischen Blitzkugelverfahrens wird gezeigt, dass bereits mit einer relativ kleinen Anzahl von Fangstangen ein hoch effizientes Fangeinrichtungssystem realisiert werden kann. Vergleicht man dieses Verfahren mit dem klassischen Blitzkugelverfahren, wie es in [4] beschrieben ist, so kann die Anzahl der Fangstangen deutlich reduziert werden. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass das Blitzkugelverfahren sehr konservativ aufgebaut ist und dem Planer von Blitzschutzsystemen nur alle möglichen Stellen für einen Einschlag aufzeigt, jedoch keine Bewertung durch eine Einschlagwahrscheinlichkeit dazu zu liefert. Andererseits bedeutet dies, dass man mit dem klassischen Blitzkugelverfahren stets auf der »sicheren Seite« liegt [3].

Mit dem dynamischen Blitzkugelverfahren steht dem Planer nun eine Methode zur Verfügung, mit dem gerade bei geometrisch komplexen Gebäuden die Fangeinrichtungen, d.h. insbesondere Fangstangen, sehr zielge-

richtet dort platziert werden können, wo sie auch gebraucht werden. Der Einsatz vieler, zum Teil unnötiger Fangstangen lässt sich vermeiden. Das eingesparte Kapital kann ggf. in andere Schutzmaßnahmen (z.B. Überspannungsschutzeinrichtungen) investiert werden.

Die Ergebnisse der hier dargestellten Untersuchungen können schließlich auch helfen, ein verbessertes Verständnis zu erhalten bezüglich der Frage: »Wie wirksam sind eigentlich nicht konventionelle Fangeinrichtungen – sprich: ESE-AT(= Early Streamer Emission)-Fangeinrichtungen?« ESE-Befürworter argumentieren häufig, dass sich die Funktionalität des Verfahrens doch direkt aus der hohen Anzahl an installierten Systemen und der (angeblich) geringen Anzahl von Fangfehlern ableiten lasse. Die geringe Anzahl von Fangfehlern ist jedoch verständlich, wenn man sich die Installationen von ESE-Fangeinrichtungen ansieht. Es sind eben hohe Fangstangen, die an den höchsten Stellen der Gebäude platziert

MEHR INFOS

Fachbeitrag zum Thema

Blitzschutz nach anerkannten Regeln der Technik – Blitzschutzexperten diskutieren am runden Tisch, »de« 23–24/2009, S. 26 ff.

werden, also dort, wo auch grundsätzlich hohe Einschlagwahrscheinlichkeiten für stromstarke Blitzentladungen bestehen. Dort wirken sie gemäß der aktuellen Auffassung des internationalen Normenkomitees IEC TC81 ebenso wie klassische (Franklin-)Fangstangen [7], auch ohne dass eine wirksame Vorionisation, also ein Blitztrigger-Effekt, einsetzt. Man könnte sie also wohl auch einfach durch Franklin-Fangstangen ersetzen, ohne den Schutz zu verschlechtern.

Literaturverzeichnis

[1] IEC 62305-1:2006-01, Protection against lightning – Part 1 – General principles

- [2] IEC 62305-3:2006-01, Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard
- [3] DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1):2006-10, Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze
- [4] DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3):2006-10, Blitzschutz – Teil 3, Schutz von baulichen Anlagen und Personen
- [5] Hasse, P.; Wiesinger, J.; Zischank, W.: Handbuch für Blitzschutz und Erdung, Pflaum Verlag München, 5. Auflage 2006, ISBN 3-7905-0931-0
- [6] Wettingfeld, J.; Kern, A.; Krämer, H.-J.; Thormählen, R.: International anerkannte Blitzschutznormen – Ausgewogener und sicherer Schutz, »de« 13–14/2009, S. 30 ff.
- [7] IEC 81/337/CDV (IEC 62305-3 Ed. 2):2009-09, Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard.

Prof. Dr.-Ing. Alexander Kern,
Prof. Dr. rer. nat. Christof Schelthoff,
Moritz Mathieu,
FH Aachen, Campus Jülich