

# Planung von Fangeinrichtungen mit dem dynamischen elektro-geometrischen Modell - Mögliche praktische Anwendungen

## Design of air-terminations using the dynamic electro-geometrical model - Possible practical applications

Prof. Dr.-Ing. Alexander Kern, FH Aachen, Campus Jülich, Deutschland, [a.kern@fh-aachen.de](mailto:a.kern@fh-aachen.de)

Dr.-Ing. Ralph Brocke, DEHN + SÖHNE GmbH + Co.KG., Neumarkt, [Ralph.Brocke@dehn.de](mailto:Ralph.Brocke@dehn.de)

### Kurzfassung

Die Einfangwirksamkeit (en: interception efficiency IE) ist der wichtigste Parameter, um die Wirksamkeit eines Fangeinrichtungssystems zu zeigen. Die IE kann mit dem dynamischen elektro-geometrischen Modell (DEGM), einem numerischen Verfahren, berechnet werden. Das Modell beruht ausschließlich auf international akzeptierten Modellen, Parametern, Ableitungen und Zusammenhängen, die in der Standard-Reihe DIN EN 62305 (VDE 0185-305) beschrieben sind. Bislang wurden mit dem DEGM die IE für Fangstangen berechnet.

In diesem Beitrag werden mögliche weitergehende Anwendungen des DEGM diskutiert. Basierend auf einem realen Beispiel werden zwei Methoden vorgestellt und analysiert: (1) Ein konservativer Ansatz beruht auf einer Vergleichsrechnung. Dazu wird zunächst für ein Fangeinrichtungssystem, das vollständig nach DIN EN 62305-3 geplant ist, eine detaillierte Berechnung der IE vorgenommen (der Wert ist üblicherweise deutlich besser, als gemäß DIN EN 62305-1 erwartet). Dieser Wert wird dann als Referenz oder Ziel für ein „optimiertes“ Fangeinrichtungssystem herangezogen, das mit dem DEGM geplant wird. Diese zweite „optimierte“ Version eines Fangeinrichtungssystems muss dabei nicht alle Planungsgrundsätze gemäß DIN EN 62305-3 erfüllen. Sie weist aber den gleichen Wert für die IE auf. (2) Ein progressiver Ansatz geht dagegen einfach vom Wert der IE aus, wie er nach DIN EN 62305-1 erwartet wird. Dieser IE-Wert soll dann mit einem mit DEGM geplanten Fangeinrichtungssystem sichergestellt werden.

### Abstract

Interception efficiency (IE) is the most important parameter to show the effectiveness of air-termination systems. The dynamic electro-geometrical model (DEGM), a numerical method, is capable of calculating such IE. This model is purely based on international accepted models, parameters, deviations and dependencies, which are comprised in the IEC 62305. So far it has been used to calculate the IE for rod-type air-terminations.

This paper discusses possible applications using the DEGM. Based on a real example two methods are shown and analyzed: (1) For a conservative approach a comparison analysis is conducted: firstly, for an air-termination rod arrangement which is planned purely on the basis of IEC 62305-3 a detailed analysis with the DEGM gives an IE value (which usually is much better than expected from IEC 62305-1). This value for the IE is then, secondly, used for an “optimized” air-termination system based on the DEGM. This second version of the “optimized” air-termination system does not fulfill all planning procedures of IEC 62305-3. However, it leads to the same IE. (2) An even more progressive method uses simply the IE values given in IEC 62305-1 and tries to fulfill these values with a planned air-termination rod arrangement.

## 1 Einführung

Die Planung der Fangeinrichtungen von Blitzschutzsystemen für bauliche Anlagen kann gemäß DIN EN 62305-3 [1] nach drei grundsätzlichen Verfahren durchgeführt werden:

- Blitzkugel-Verfahren (elektro-geometrisches Modell);
- daraus abgeleitet: Schutzwinkelverfahren;
- Maschenverfahren für ebene (Dach-) Flächen.

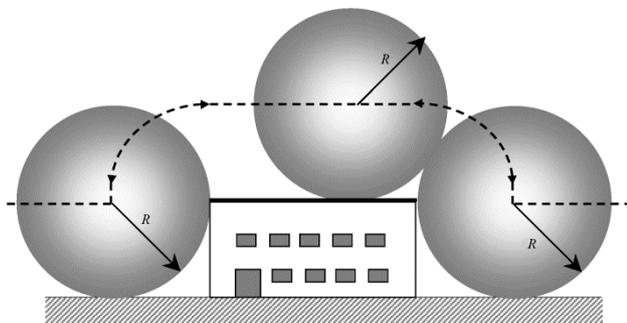
Das Blitzkugel-Verfahren ist dabei die grundsätzliche Planungsmethode. Sie ist seit vielen Jahren bekannt, erprobt und bewährt. Eine Beschreibung des Verfahrens und Anwendungsbeispiele enthalten z.B. [2, 3].

Für unterschiedliche Anforderungen an ein Blitzschutzsystem werden vier Gefährdungspegel [4] und darauf basierend vier Blitzschutzklassen (I – II – III- IV) definiert [1].

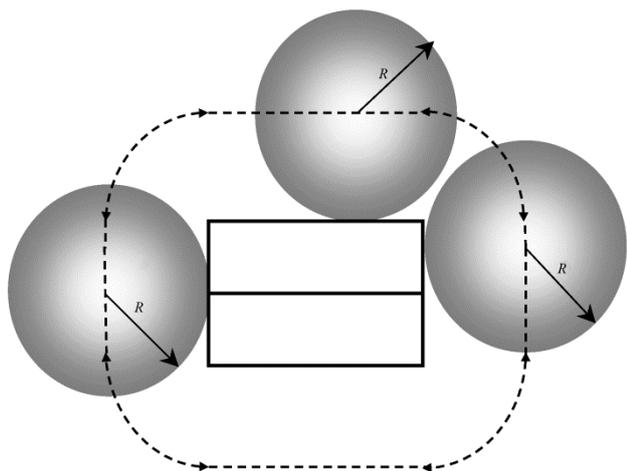
Sie unterscheiden sich hinsichtlich des Blitzkugel-Verfahrens im anzusetzenden Radius der Blitzkugel; dieser beträgt je nach Blitzschutzklasse zwischen 20 m und 60 m. Mit dem festen Blitzkugel-Radius werden unterschiedliche, kleinste Scheitelwerte von natürlichen Blitzentladungen abgedeckt, d.h. kleinere Blitzkugel-Radien können grundsätzlich das zu schützende Gebäude neben den Fangeinrichtungen, die nach [1] geplant sind, berühren; es können also noch stromschwächere Blitze dort einschlagen.

Bei der Planung mit der Blitzkugel erhält man mögliche Blitzeinschlagpunkte, an denen Fangeinrichtungen zu platzieren sind. Allerdings ist darin keine Information enthalten, wie wahrscheinlich jeweils der Blitzeinschlag an den einzelnen Punkten ist. So sind beispielsweise bei einem einfachen, quaderförmigen Gebäude jedem potentiellen Einschlagpunkt auf den Dachkanten und insbesondere auf den Dachecken wesentlich mehr Mittelpunkte von Blitzku-

geln zugeordnet, als einem Einschlagpunkt auf dem flachen Dach (**Bilder 1 und 2**). Allerdings sind gemäß dem Blitzkugel-Verfahren sowohl das Dach, wie auch die Dachkanten und -ecken, potentielle Einschlagpunkte, an denen Fangeinrichtungen erforderlich sind. Diese Festlegung erfolgt also ohne Würdigung der Tatsache, dass der Einschlag auf Dachkante und -ecke wesentlich wahrscheinlicher ist. Das „klassische“ Blitzkugel-Verfahren gibt also keine Werte der Einschlagwahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Einschlagpunkte an.



**Bild 1** Mit Blitzkugel-Verfahren zu schützendes Gebäude (Blitzkugel mit Radius r) – Seitenansicht.



**Bild 2** Mit Blitzkugel-Verfahren zu schützendes Gebäude (Blitzkugel mit Radius r) – Dachansicht.

Das sogenannte dynamische elektro-geometrische Modell (DEGM) liefert diese fehlenden Werte. Mit diesem Verfahren ist eine detaillierte Berechnung der Einschlagwahrscheinlichkeiten an jedem Punkt einer untersuchten baulichen Anlage möglich, und damit kann auch eine Einfangwirksamkeit (en: interception efficiency IE) der Blitzfangeinrichtungen angegeben werden [6, 7, 8, 9]. Das Verfahren nutzt die grundlegende Idee der sogenannten „collection surface method“ (CSM) von HARTONO und ROBIAH [10]. Die CSM nutzt dabei aber noch feste Blitzkugel-Radien.

Ziel der hier vorgelegten Untersuchung ist die Darstellung zweier möglicher Anwendungen des DEGM anhand eines Beispiels:

- Die erste Anwendung beginnt mit einem Fangeinrichtungssystem, das vollständig auf den Konzepten und

Verfahren der DIN EN 62305-3 [1] basiert, d.h. dem „normativen“ Blitzkugel-Verfahren. Für dieses System wird die IE mit dem DEGM berechnet. Dieser IE-Wert dient dann als Zielwert für ein „optimiertes“ Fangeinrichtungssystem. „Optimiert“ bedeutet dabei, dass die Anzahl von Fangstangen reduziert wird und Fangstangen dort vermieden werden, wo sie entweder sehr schwer installiert werden können oder wo der Anschluss an das Ableitungssystem schwierig realisiert werden kann. Das Vermeiden von einigen Fangstangen mit sehr niedrigen IE-Werten führt in der Regel zu einer Erhöhung der IE der verbleibenden Fangstangen. Die gesamte IE des „optimierten“ Fangeinrichtungssystems darf nicht niedriger sein, als die IE des zugrundeliegenden, normativ geplanten Systems - konservativer Ansatz.

- Die zweite Anwendung nutzt ausschließlich den IE-Wert, der sich aus DIN EN 62305-1 [4] ergibt. Dieser Wert soll mit einem Fangeinrichtungssystem erreicht werden, das ohne normative Einschränkungen geplant wird - progressiver Ansatz.

## 2 Das dynamische elektro-geometrische Modell

### 2.1 Wahrscheinlichkeits-Verteilungen der Blitzstrom-Scheitelwerte

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Blitzstrom-Scheitelwerte sind grundsätzlich sehr detailliert bekannt. Die sogenannten „CIGRE“-Parameter stellen nach wie vor die Basis der meisten Blitzschutz-Normenreihen dar, z.B. auch für die DIN EN 62305. DIN EN 62305-1, Anhang A [4] enthält alle erforderlichen Daten, um die Blitzstrom-Parameter als logarithmische Normalverteilung zu beschreiben:

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot I} \cdot e^{-\frac{\left(\ln \frac{I}{\mu}\right)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (1)$$

Für die hier vorliegende Aufgabenstellung des Blitzeinschlags in Fangeinrichtungen sind negative und positive Erstblitze zu berücksichtigen. Die Parameter zur Beschreibung beider Blitztypen nach Gl. (1) sind in den **Tabellen 1 und 2** dargestellt. Benötigt wird darüber hinaus noch das Verhältnis negativer zu positiver Erstblitze, das gemäß [3] zu 90 % / 10 % angenommen wird.

**Tabelle 1** Parameterwerte für negative Erstblitze.

Parameter für Gl. (1)	I < 20 kA	I > 20 kA
Mittelwert [μ] kA	61	33,3
Logarith. Standardabweichung [σ]	1,33	0,605

**Tabelle 2** Parameterwerte für positive Erstblitze.

Parameter für Eq. (1)	
Mittelwert [μ] kA	33,9
Logarith. Standardabweichung [σ]	1,21

## 2.2 Elektro-geometrisches Modell

Nach dem elektro-geometrischen Modell kann einem Blitzstrom-Scheitelwert  $I$  ein fester Wert der Länge der Enddurchschlagstrecke und damit des Blitzkugel-Radius  $r$  zugeordnet werden. Zu diesem Zusammenhang wurden in der Vergangenheit etliche sehr umfangreiche Forschungsarbeiten durchgeführt. Heutzutage wird üblicherweise für „normale“ bauliche Anlagen die folgende Beschreibung verwendet, wie sie auch in der Blitzschutz-Normenreihe DIN EN 62305 [1, 4] verankert ist:

$$r/m = 10 \cdot \left( \frac{I}{kA} \right)^{0,65} \quad (2)$$

Wenn man Gl. (2) in Gl. (1) einsetzt, und dabei die Charakteristika der Dichte-Funktionen beibehält, kann man die Verteilung der Blitzstrom-Scheitelwerte auch in eine Verteilung der Längen der Enddurchschlagstrecken, und damit der Blitzkugel-Radien  $r$ , transformieren.

## 2.3 Numerisches Verfahren

Die gesamte Oberfläche der zu schützenden baulichen Anlage einschließlich der Fangeinrichtungen des Blitzschutzsystems (z.B. Fangstangen) wird räumlich diskretisiert (Oberflächenpunkte). Der Raum oberhalb und seitlich neben der baulichen Anlage wird ebenfalls räumlich diskretisiert (Raumpunkte).

Mit einfachen geometrischen Überlegungen wird nun zu jedem Raumpunkt der nächstgelegene Oberflächenpunkt ermittelt. Die Entfernung zwischen einem Raumpunkt und einem Oberflächenpunkt entspricht der Länge der möglichen Enddurchschlagstrecke und damit dem Radius einer Blitzkugel. Für diesen Radius (bzw. dem zugehörigen Radius-Intervall entsprechend der räumlichen Diskretisierung) kann nach Gl. (2) ein Intervall des Blitzstrom-Scheitelwerts und damit ein Wahrscheinlichkeits-Wert für den Blitzeinschlag zugeordnet werden. Dieser Wahrscheinlichkeits-Wert wird dem ermittelten, nächstgelegenen Oberflächenpunkt zugeordnet. Dieser Schritt wird nun grundsätzlich für alle Raumpunkte wiederholt.

Da ein Oberflächenpunkt nächster Punkt zu verschiedenen Raumpunkten sein kann (mit unterschiedlichen Radien), müssen für jeden Oberflächenpunkt alle ermittelten Wahrscheinlichkeits-Werte aufaddiert werden. Die Summe ergibt dann die konkrete Einschlagwahrscheinlichkeit in diesen Oberflächenpunkt.

Abschließend werden die Wahrscheinlichkeits-Werte auf die Gesamtwahrscheinlichkeit 100% für die gesamte bauliche Anlage normiert.

Das dynamische elektro-geometrische Modell (DEGM) wurde erstmalig von KERN et al. beschrieben, z.B. in [6, 7, 8]. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass alle Grundlagen des DEGM in den einschlägigen Blitzschutz-Normen [1, 4] enthalten bzw. beschrieben sind.

Es sei darauf hingewiesen, dass für das DEGM ausschließlich der reine geometrische Abstand zwischen Raumpunkt und Oberflächenpunkt verwendet wird. Jegliche Überhöhung des elektrischen Feldes an exponierten Stellen der baulichen Anlage (z.B. Fangstangen-Spitzen und Ecken

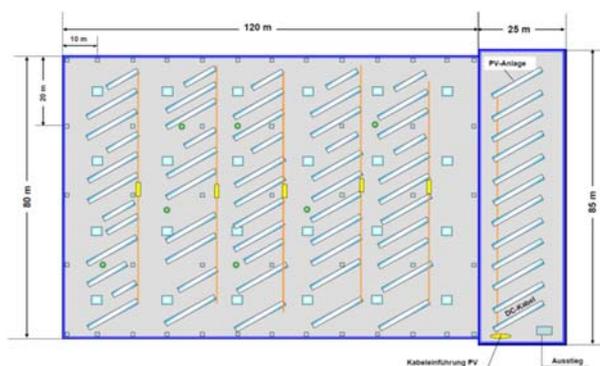
der baulichen Anlage) wird vernachlässigt. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Effekt nur sehr begrenzt eng um die exponierte Stelle herum auftritt. Damit wirken sich diese Feldüberhöhungen in erster Näherung nicht merklich auf den Startprozess der Fangentladung aus; dies gilt zumindest für rel. flache bauliche Anlagen.

Ein analytischer Ansatz zur Berechnung der Einschlagwahrscheinlichkeiten und damit der Anzahl von Blitzeinschlägen in einfache Strukturen wurde von HANNIG et al. in [9] vorgestellt. Die Methodik folgt der Idee des DEGM und benutzt ebenfalls die Parameterwerte und Beschreibungen aus DIN EN 62305 [1, 4]. Dieser analytische Ansatz berechnet kumulierte, gewichtete Einfangflächen als Hüllflächen. Dazu wurde eine Formel entwickelt, mit der die mathematische Integration vereinfacht über Polynom-Koeffizienten durchgeführt wird. Die ermittelten Werte wurden mit realen Blitzmessungen und numerischen Simulationen verglichen. Weiterhin können die absoluten Werte des Einfangvolumens auf die herrschende Blitzdichte bezogen werden; man kann damit abschätzen, wie häufig Blitzeinschläge in definierte Bereiche einer baulichen Anlage auftreten.

Die Ergebnisse sind nützlich, um verschiedene Simulationsansätze zum DEGM zu verifizieren und ihre Genauigkeiten anzugeben. Verschiedene Simulationen wurden damit bereits verifiziert und insbesondere der Einfluss der räumlichen Diskretisierung analysiert [11].

## 3 Fallstudie

Auf dem Dach einer großen Lagerhalle mit Bürotrakt sollen PV-Module installiert werden. Darauf muss bei Planung und Installation der Fangeinrichtungen geachtet werden. **Bild 3** zeigt die bauliche Anlage mit PV-Modulen. Die Lagerhalle selbst (120 m x 80 m) hat eine Höhe von 10 m, der schmalere Bürotrakt (25 m x 80 m) ist 20 m hoch. In beiden Höhenangaben ist bereits die Höhe der PV-Module enthalten.



**Bild 3** Fallstudie – Lagerhalle und Bürotrakt mit dachmontierten PV-Modulen – Grundlegende Darstellung und Abmessungen.

Das Blitzschutzsystem (en: Lightning Protection System = LPS) und insbesondere die Fangeinrichtungen sollen gemäß Schutzklasse III nach DIN EN 62305-3 [1] geplant und installiert werden. Dies bedeutet einen Blitzkugel-Radius von 45 m.

Ein LPS kann in zwei Richtungen versagen (**Tabelle 3**):

- Mit der Dimensionierungs-Wirksamkeit wird beschrieben, dass die Komponenten eines LPS die Belastungen durch den Blitzstrom ohne Zerstörungen überstehen, also nicht überlastet werden. Dafür darf der Blitzstrom die jeweils definierten Werte nicht übersteigen, da anderenfalls die Komponenten beschädigt oder zerstört werden könnten. Dies kann nur im Falle sehr großer Blitzströme zutreffend sein. Deshalb wird für die Dimensionierungs-Wirksamkeit für jeden Gefährdungspegel nach DIN EN 62305-1 [3] ein Satz von maximalen Blitzstrom-Parametern fixiert.
- Mit der Einfang-Wirksamkeit IE soll beschrieben werden, dass das LPS einen Anteil an natürlichen Blitzeinschlägen nicht einfängt. Dazu wird in DIN EN 62305-1 [4] vereinfacht ein Satz von minimalen Blitzstrom-Parametern für jeden Gefährdungspegel festgelegt. Damit wird die Qualität eines LPS auch beschrieben durch den maximalen Scheitelwert eines Blitzes, der noch neben den Fangeinrichtungen einschlagen kann; stromstärkere Blitze werden stets durch die Fangeinrichtungen beherrscht. Die IE bezieht sich selbstverständlich nur auf den Aspekt des Einfangens des Blitzes, also die Fangeinrichtungen des LPS.

Die Überlagerung der beiden Wirksamkeiten gemäß DIN EN 62305-1 [4] resultiert in Werten einer Schadenswahrscheinlichkeit für physikalische Schäden eines LPS,  $P_B$ , die in DIN EN 62305-2 [5] angegeben werden (siehe wieder Tabelle 3). Diese Werte werden dann bei Risikoanalysen für bauliche Anlagen verwendet.

**Tabelle 3** Zusammenhang zwischen maximalen und minimalen Blitzstrom-Scheitelwerten, Wirksamkeiten eines Blitzschutzsystems und Schadenswahrscheinlichkeiten in der Normenreihe DIN EN 62305.

Gefährdungspegel [3] und Schutzklasse eines LPS [1]	IV	III	II	I
Max. Scheitelwert / kA [3]	100	100	150	200
Min. Scheitelwert / kA [3]	16	10	5	3
Dimensionierungs-Wirksamkeit [3]	0,97	0,97	0,98	0,99
Einfang-Wirksamkeit [3]	0,84	0,91	0,97	0,99
Überlagerte (Gesamte) Wirksamkeit	0,80	0,90	0,95	0,98
Schadenswahrscheinlichkeit $P_B$ [4]	0,20	0,10	0,05	0,02

Mit einem LPS nach Schutzklasse III werden Blitzstrom-Scheitelwerte bis herab zu 10 kA berücksichtigt, womit 91 % aller natürlichen Blitzeinschläge abgedeckt werden sollen [4]. Wir dürfen damit also davon ausgehen, dass mit den Fangeinrichtungen dieses LPS mindestens 91 % aller natürlichen Blitzeinschläge eingefangen werden. Anders formuliert: Der Fangfehler des LPS beträgt höchstens 9 %. Für die hier vorliegende Untersuchung wird die Lagerhalle mit Bürotrakt als alleinstehend betrachtet, d.h. der Einfluss benachbarter Gebäude wird vernachlässigt. Dies ist für die bauliche Anlage eine worst-case Annahme. Die IE beschreibt nur den Effekt des direkten Blitzeinschlags in die Fangeinrichtungen. Das Auftreten möglicher

transienter Spannungen, die in den elektrischen Systemen der baulichen Anlage durch das Magnetfeld als Folge der Ströme auf dem LPS induziert werden, werden damit nicht berücksichtigt.

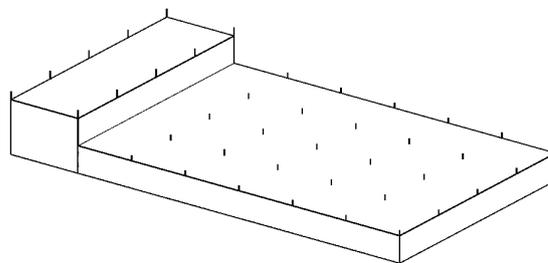
## 4 Konservativer Ansatz

### 4.1 Planung nach DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3)

Der konservative Ansatz beruht auf einem Fangeinrichtungssystem, das vollständig den Dimensionierungsregeln und Parameterwerten der Norm DIN EN 62305-3 [1] entspricht. **Bild 4** zeigt eine solche Lösung mit insgesamt 40 Fangstangen:

- 30 Fangstangen mit einer Höhe von 2 m schützen die Lagerhalle (120 m x 80 m). Die Fangstangen sind im Rastermaß 20 m x 20 m aufgestellt (diagonaler Abstand 28 m);
- 10 Fangstangen mit einer Höhe von 3 m schützen den schmaleren, aber höheren Bürotrakt (25 m x 80 m). Die Fangstangen sind im Rastermaß 25 m x 20 m aufgestellt (diagonaler Abstand 32 m). Wegen des etwas größeren diagonalen Abstandes müssen diese Fangstangen etwas höher sein.

Die Fangstangen sind mit dem Blitzkugel-Verfahren geplant. Für Schutzklasse III beträgt dieser 45 m. Die Fangstangen-Anordnung in **Bild 4** verhindert den Kontakt einer solchen Blitzkugel mit dem Dach oder den dort installierten PV-Modulen. Diese Anordnung bildet nun den Basis-Fall.

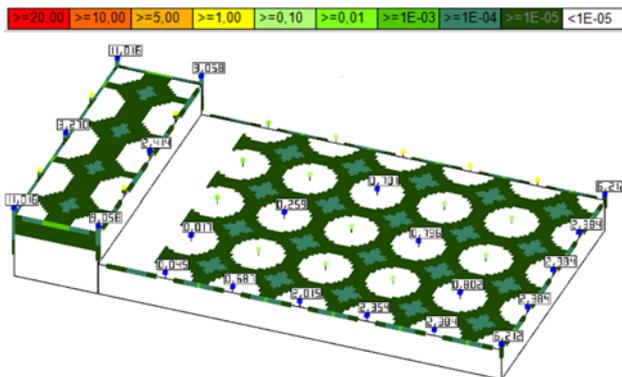


**Bild 4** Fallstudie – Fangeinrichtungssystem (Basis-Fall) gemäß Planung nach DIN EN 62305-3 [1], LPS Klasse III (Blitzkugel-Radius 45 m).

Eine detaillierte Simulation mit dem DEGM zeigt die individuelle IE der einzelnen Fangstangen (**Bild 5**). Die Farbe vermittelt einen Eindruck der numerischen Prozentsätze. Es können die folgenden Schlüsse gezogen werden:

- insgesamt gehen 99,5% aller Einschläge in die 40 Fangstangen;
- nur 0,5% aller Einschläge treffen die PV-Module oder das Dach selbst, vor allem an den Dachkanten zwischen den Fangstangen;
- die Fangstangen an den Dachecken weisen die höchste Wirksamkeit auf, vor allem auf dem höheren Bürotrakt (IE-Wert 11,02%);

- die Fangstangen an den Dachkanten haben ebenfalls noch hohe IE-Werte zwischen 3,27% und 0,69% (nur die Fangstangen auf der niedrigeren Lagerhalle nahe am höheren Bürotrakt haben niedrige IE-Werte);
- die Fangstangen in der Dachmitte der Lagerhalle zeigen dagegen niedrige IE-Werte zwischen 0,80% und nur 0,017%.



**Bild 5** Fallstudie – Fangeinrichtungssystem (Basis-Fall) gemäß Planung nach DIN EN 62305-3 – Detaillierte Berechnung der IE mit dem DEGM (Werte für die Wahrscheinlichkeit des Einschlags in eine einzelne Fangstange bezogen auf alle Einschläge in die bauliche Anlage).

Es erscheint zunächst überraschend, dass die gesamte IE der 40 Fangstangen bei **99,5%** liegt, d.h. der Fangfehler beträgt nur 0,5%. Das ist wesentlich besser, als es die Werte nach DIN EN 62305-1 [4] erwarten lassen; nach Tabelle 3 wird für Schutzklasse III ein IE-Wert von mindestens 91% genannt, was einen Fangfehler von maximal 9% erlauben würde. Gleichwohl ist dieser Effekt für Fangstangen bekannt. Für ein Fangeinrichtungssystem, das aus Stangen besteht, muss ein rel. stromschwacher Blitz (Scheitelwert < 10 kA für Schutzklasse III) genau in der Mitte zwischen den Fangstangen herabwachsen, um nicht korrekt aufgefangen zu werden. Wächst dieser Blitz dagegen aus dem Raum in etwa oberhalb einer Fangstange der baulichen Anlage entgegen, trifft er diese Fangstange; er führt daher nicht zu einem Fangfehler.

#### 4.2 “Optimiertes“ Fangeinrichtungssystem

Wenn man das Fangeinrichtungssystem aus Bild 5 genauer betrachtet, ist es offenkundig, dass sich die am aufwändigsten zu installierenden Fangstangen in der Mitte des Daches der niedrigen Lagerhalle befinden. Die Fangstangen an den Dachecken und -kanten können dagegen rel. einfach untereinander und mit den Ableitungen verbunden werden; hier gibt es üblicherweise auch kein Problem mit der Einhaltung des Trennungsabstandes. Für die Fangstangen in der Dachmitte, die über lange Leitungen mit den Ableitungen verbunden werden müssen, sind die Trennungsabstände zu den PV-Modulen dagegen nicht einfach einzuhalten. Natürlich gibt es dafür Lösungen, aber diese sind oft aufwändig und teuer (z.B. isolierte Ableitungen) und erzeugen andere Nachteile (schlechtere Blitzstrom-Aufteilung).

Aus diesem Grunde erscheint es vorteilhaft, insbesondere auch aus Kostensicht, wenn Fangstangen in der Dachmitte vermieden werden können, oder zumindest ihre Anzahl merklich verringert wird.

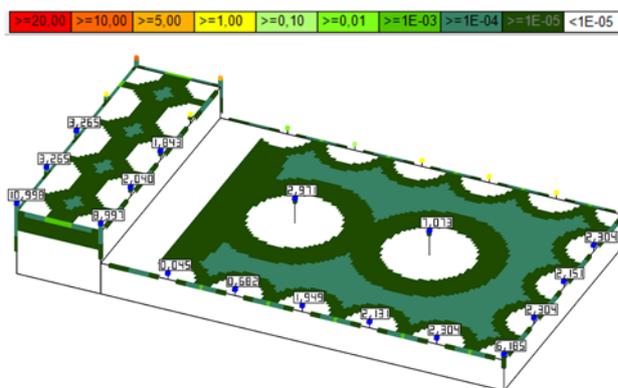
Es gilt also das System der Fangeinrichtungen zu „optimieren“. Die Grundregel dabei ist:

*Jedes „optimierte“ LPS wird als gleichwertig für den vorliegenden Anwendungsfall betrachtet, wenn die gesamte IE sich nicht von der IE unterscheidet, die ein LPS aufweist, das streng nach den Dimensionierungsregeln und Parameterwerten der DIN EN 62305-3 [1] geplant wurde. Die Berechnungen der IE erfolgen mit dem DEGM.*

Dieser konservative Ansatz wurde erstmalig 2016 von KERN et al. in [11] für den einfachen Anwendungsfall eines Tanks beschrieben. Hier soll er für einen geometrisch aufwändigeren Fall angewendet werden.

**Bild 6** zeigt ein erstes Beispiel für ein „optimiertes“ System der Fangeinrichtungen:

- 10 Fangstangen mit 3 m Höhe schützen wieder den höheren Bürotrakt (25 m x 80 m). Diese Stangen an den Ecken und Kanten sind einfach anzuschließen;
- 15 Fangstangen mit 2 m Höhe sind wieder an den Ecken und Kanten der niedrigeren Lagerhalle im Abstand von 20 m installiert (120 m x 80 m);
- die 15 Fangstangen in der Dachmitte der Lagerhalle (siehe Bild 5) werden durch 2 Fangstangen mit 8 m Höhe ersetzt. Es werden 13 Stangen eingespart, und damit auch eine Vielzahl von Verbindungsleitungen, die die PV-Installationen kreuzen müssten.

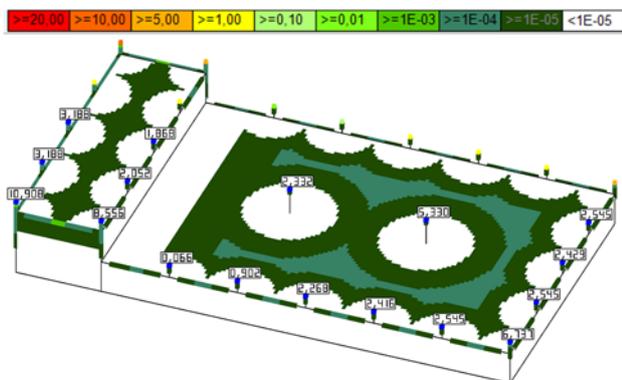


**Bild 6** Fallstudie – Konservativer Ansatz: „optimiertes“ Fangeinrichtungssystem I: Höhe der Fangstangen 3 m (Bürotrakt), 2 m (Ecken und Kanten Lagerhalle) und 8 m (Dachmitte Lagerhalle) – Detaillierte Berechnung der IE mit dem DEGM.

Die gesamte IE dieser Anordnung beträgt **99,1%**, der Fangfehler ist 0,9%. Das liegt nahe am Wert des Basis-Falls; das „optimierte“ LPS kann daher als gleichwertig angesehen werden.

Aus Bild 6 sind auch die individuellen IE der einzelnen Fangstangen ersichtlich. Die Abweichungen zu den Ergebnissen des Basis-Falls (Bild 5) sind gering. Lediglich die Werte für die beiden hohen Fangstangen in der Dachmitte der Lagerhalle sind merklich höher. Diese beiden Stangen sammeln mehr oder weniger die IE-Werte der 15 kleineren Stangen des Basis-Falls auf.

**Bild 7** zeigt ein zweites Beispiel eines “optimierten” Systems der Fangeinrichtungen. Im Unterschied zu Bild 6 sind alle 25 Fangstangen an den Dachecken und -kanten nun 4 m hoch. Die Höhe der beiden Fangstangen in der Dachmitte der Lagerhalle beträgt unverändert 8 m. Die gesamte IE ist hier **99,6%** und damit noch etwas näher an der IE des Basis-Falls.



**Bild 7** Fallstudie – Konservativer Ansatz: „optimiertes“ Fangeinrichtungssystem II: Höhe der Fangstangen 4 m (Bürotrakt sowie Ecken und Kanten Lagerhalle) und 8 m (Dachmitte Lagerhalle) – Detaillierte Berechnung der IE mit dem DEGM.

Es gibt offenbar eine große Zahl möglicher Anordnungen von Fangeinrichtungen, die die o.g. Grundregel des konservativen Ansatzes erfüllt. Es ist dann die Aufgabe des Planers eines LPS, eine technisch und wirtschaftliche gute Lösung auszuarbeiten.

Fangstangen in der Dachmitte der Lagerhalle können bei Anwendung des konservativen Ansatzes nicht vollständig vermieden werden. Grund ist die Breite der Halle von 80 m. Weiterhin existieren beim konservativen Ansatz mit dem DEGM kleine räumliche Bereiche, in denen Blitze einschlagen können, die geringfügig höhere Scheitelwerte aufweisen, als für die jeweilige Schutzklasse des LPS angenommen. Im vorliegenden Fall gibt es also kleine Bereiche mit möglichen Blitzeinschlägen > 10 kA. Wird für die Schutzklasse eines LPS neben der IE nach Tabelle 3 auch der maximale Scheitelwert eines Blitzes festgelegt, der neben den Fangeinrichtungen einschlagen darf, - damit also einen Fangfehler darstellt - erfüllt die Planung mit dem konservativen Ansatz nicht diese Anforderung.

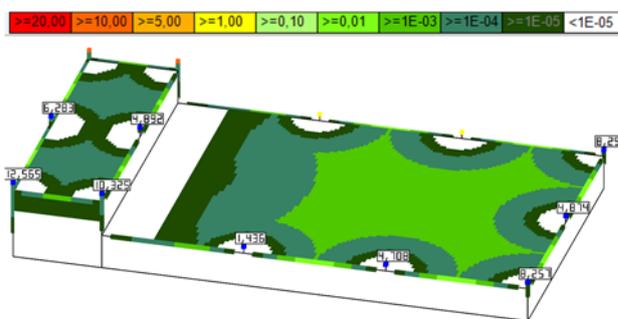
## 5 Progressiver Ansatz

Basierend auf den grundlegenden Festlegungen der Normenreihe DIN EN 62305, wie sie in Tabelle 3 dargestellt sind, erscheint auch ein progressiver Ansatz für das DEGM möglich. Dafür wird einfach der für die jeweilige Schutzklasse erwartete Wert der IE (der ja auch für die Festlegung der Schadenswahrscheinlichkeit nach [5] zugrunde gelegt wird) für Planung und Installation des LPS verwendet (Tabelle 3). Dann ist es nicht erforderlich, vorab ein System der Fangeinrichtungen zu planen, das vollständig den Dimensionierungsregeln und Parameterwerten der DIN EN 62305-3 [1] entspricht (Basis-Fall aus Kap. 4).

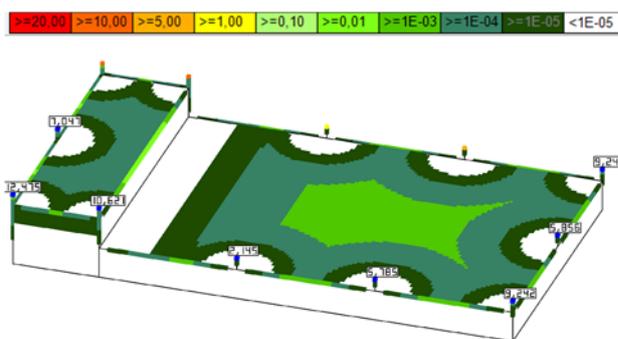
Für die hier untersuchte Fallstudie soll ein LPS der Schutzklasse III geplant und installiert werden. Dies hat einen IE-Wert von 91% zur Folge. **Bild 8** zeigt ein erstes Beispiel für ein solches Fangeinrichtungssystem:

- Fangstangen an den Dachecken und -kanten des Bürotrakts mit 3 m Höhe und 40 m Abstand zueinander;
- Fangstangen an den Dachecken und -kanten der Lagerhalle mit 2 m Höhe und ebenfalls 40 m Abstand zueinander.

Diese Anordnung ist aus dem Basis-Fall abgeleitet, wobei aber nur insgesamt 13 der dort geplanten 40 Fangstangen mit unveränderten Höhen verwendet werden. Der Abstand aus dem Basis-Fall (20 m) wird verdoppelt und alle Stangen in der Dachmitte der Lagerhalle werden vermieden. Die gesamte IE liegt dann bei **90,7%** und damit noch etwas niedriger, als es für die Schutzklasse III mit 91% aus dem Basis-Fall erforderlich wäre. Dieses Beispiel zeigt allerdings schon eindrucksvoll, dass sich durch die Reduzierung der Anzahl der Fangstangen - unter Beibehaltung ihrer Höhe - die IE nur geringfügig verringern kann.



**Bild 8** Fallstudie – Progressiver Ansatz I: Höhe der 13 Fangstangen 3 m (Bürotrakt) und 2 m (Lagerhalle) – Detaillierte Berechnung der IE mit dem DEGM.



**Bild 9** Fallstudie – Progressiver Ansatz II: Höhe der 12 Fangstangen 4 m (Bürotrakt und Lagerhalle) – Detaillierte Berechnung der IE mit dem DEGM.

**Bild 9** beschreibt ein zweites Beispiel eines möglichen Fangeinrichtungssystems. Hier weisen alle Fangstangen eine Höhe von 4 m auf, und sie sind an exakt den gleichen Stellen positioniert wie in Bild 8. Lediglich die Stange an der inneren Dachkante des höheren Bürotrakts wurde zusätzlich eingespart. Die gesamte IE der insgesamt 12 Fangstangen beträgt nun **93,5%**; sie ist klar besser als für ein LPS der Schutzklasse III gefordert (Tabelle 3).

Natürlich gibt es auch bei Anwendung des progressiven Ansatzes wieder eine große Zahl möglicher Anordnungen von Fangeinrichtungen, die den geforderten IE-Wert erfüllen. Es ist also auch hier wieder die Aufgabe des Planers, einen guten technisch-wirtschaftlichen Kompromiss für das LPS auszuarbeiten, der die Charakteristik der baulichen Anlage berücksichtigt.

Es muss wieder erwähnt werden, dass auch beim progressiven Ansatz mit dem DEGM Bereiche auf der geschützten baulichen Anlage existieren, in denen Blitze einschlagen können, die höhere Scheitelwerte aufweisen als für die jeweilige Schutzklasse des LPS angenommen. Im vorliegenden Fall gibt es also - im Vergleich zum konservativen Ansatz sogar größere - Bereiche mit möglichen Blitzeinschlägen  $> 10$  kA. Wird für die Schutzklasse eines LPS neben der IE nach Tabelle 3 daher wieder der maximale Scheitelwert eines Blitzes festgelegt, der neben den Fangeinrichtungen einschlagen darf (Fangfehler), erfüllt auch die Planung mit dem progressiven Ansatz nicht diese Anforderung.

## 6 Zusammenfassung

Das dynamische elektro-geometrische Modell (DEGM) wurde auf geometrisch ausgedehnte bauliche Anlagen angewendet, um die Einfangwirksamkeit (IE) an verschiedenen Stellen der baulichen Anlage, von einzelnen Fangstangen und vom gesamten Fangeinrichtungssystem zu berechnen.

Die Untersuchung zeigt, dass Fangeinrichtungen, insbesondere Fangstangen, die mit dem standardisierten Blitzkugel-Verfahren nach DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) [1] geplant sind, eine wesentlich höhere IE aufweisen, als eigentlich gefordert. Grund dafür ist, dass in den Normen [4, 5] wesentlich geringere, konservative Werte für diese IE angegeben sind.

So können beispielsweise für bauliche Anlagen, bei denen die Planung der Fangeinrichtungen nach den Normen nicht zum gewünschten Ziel geführt hat, mit dem DEGM noch Reserven entdeckt werden. Weiterhin können interessante Varianten für die Anordnungen von Fangeinrichtung geplant werden, die einen IE-Wert haben, der dem einer geforderten Schutzklasse eines LPS entspricht, und die damit einen vergleichbaren Schutzpegel aufweisen. Dafür gibt es zwei grundsätzliche Ansätze:

- Wenn ein LPS zweifach geplant wird, einerseits exakt gemäß den Dimensionierungsregeln und Parameterwerten nach DIN EN 62305-3 [1] (Blitzkugel-Radius, Schutzwinkel, etc.), und andererseits ohne Restriktionen durch diese Norm, kann ihre Gleichwertigkeit hinsichtlich der Fangeinrichtungen durch Berechnungen mit dem DEGM und Vergleich der IE-Werte sichergestellt werden. Ein LPS ist dann gleichwertig, wenn dessen gesamte IE der IE aus dem standardisierten Planungsfall nach DIN EN 62305-3 entspricht. Dieser Ansatz wird hier als „konservativ“ bezeichnet und kann in der Blitzschutz-Praxis wohl ohne deutliche Einschränkungen angewendet werden.

- Ein zweiter Ansatz ist „progressiv“. Dafür wird nur der gemäß der ausgewählten Schutzklasse des LPS in den Normen [4, 5] aufgeführte Wert der IE (der auch für die Festlegung der Schadenswahrscheinlichkeit bei Risikoanalysen zugrunde gelegt wird) herangezogen. Dieser Ansatz führt zu einer deutlichen Reduzierung der Anzahl von Fangstangen, und damit auch zu einer deutlichen Reduzierung der Kosten für ein LPS: nur die am meisten wirksamen Fangstangen verbleiben, die anderen können eingespart werden. Es ist hier aber klar herauszustellen, dass dieser Ansatz nur die IE-Werte benutzt. Er berücksichtigt nicht die Grenzwerte der Blitzstrom-Scheitelwerte, die auch in DIN EN 62305-1 [4] genannt werden. Insofern geht dieser Ansatz wesentlich weiter als der konservative.

Beide Ansätze können helfen, unnützen Aufwand für Fangeinrichtungen zu vermeiden. Dies wird in diesem Beitrag für eine ausgedehnte, aber immer noch geometrisch einfache, bauliche Anlage demonstriert. In Fällen von geometrisch komplexeren baulichen Anlagen und dort, wo auch die benachbarte Bebauung berücksichtigt werden soll, können die beiden Ansätze mit dem DEGM noch sinnvoller verwendet werden. In solchen Fällen ist nicht immer einfach zu erkennen, welche Fangstangen eine geringe IE haben und daher eingespart oder auch versetzt werden können. Das DEGM kann hier als modernes und effizientes Planungswerkzeug eingesetzt werden.

Zuletzt darf aber nicht unerwähnt bleiben, dass beim Ansatz mit dem DEGM zwar die gesamte IE den Zielwert erreicht, andererseits aber Bereiche auf der geschützten baulichen Anlage existieren, in denen Blitze einschlagen können, die höhere Scheitelwerte aufweisen als für die jeweilige Schutzklasse des LPS angenommen. Dieser Effekt tritt beim progressiven Ansatz noch deutlicher auf als beim konservativen. Wird also für die Schutzklasse eines LPS neben der IE auch der maximale Scheitelwert eines Blitzes festgelegt, der neben den Fangeinrichtungen einschlagen darf (Fangfehler), erfüllen die dargestellten Planungen mit dem DEGM nicht diese Anforderung.

## 7 Literatur

- [1] DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) Ed.2: 2011-10: Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen.
- [2] Hasse, P.; Wiesinger, J.; Zischank, W.: Handbuch für Blitzschutz und Erdung. Pflaum Verlag München. 5. Auflage 2006. ISBN 3-7905-0931-0.
- [3] Kern, A.; Wettingfeld, J.: Blitzschutzsysteme 1 – Allgemeine Grundsätze, Risikomanagement, Schutz von baulichen Anlagen und Personen. VDE-Schriftenreihe Band 44, VDE-Verlag Berlin-Offenbach, 2014.
- [4] DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1) Ed.2: 2011-10: Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze.
- [5] DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2) Ed.2: 2013-02: Blitzschutz – Teil 2: Risikomanagement.
- [6] Kern, A.; Schelthoff, C.; Mathieu, M.: Die dynamische Blitzkugel; Wahrscheinlichkeitsberechnung für Blitzeinschläge in Gebäude. de 13-14/2010.

- [7] 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.
- [8] Kern A., Schelthoff C., Mathieu M.: Das dynamische elektro-geometrische Modell - Ein neues Verfahren zur detaillierten Berechnung der Einfangwirksamkeit von Fangeinrichtung. Elektropraktiker, Berlin (66), Heft 4/2012.
- [9] M. Hannig, V. Hinrichsen, R. Hannig, and R. Brocke, "An Analytical Consideration on the Striking Probability and the Total Amount of Strikes to Simple Structures According to Standardized Regulations", Proc. of 32th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai (Ch), October 2014, Paper 366.
- [10] Z.A. Hartono, and I. Robiah, "The collection surface concept as a reliable method for predicting the lightning strike location", 25th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Rhodes (GR), September 2000, pp. 328 – 333.
- [11] A. Kern, R. Brocke, V. Raab, M. Hannig, M. Rock, O. Beierl and W. Zischank, "Detailed Calculation of Interception Efficiencies for Air-Termination Systems using the Dynamic Electro-Geometrical Model – Practical Applications" 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), Estoril (PT), September 2016.