

Zur Wahrscheinlichkeit für Schäden an elektrischen und elektronischen Einrichtungen durch indirekte Blitzeinschläge – Auswertung von Schadensstatistiken, analytischen und numerischen Berechnungen

Prof. Dr.-Ing. Alexander Kern, FH Aachen, Jülich
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Dikta, FH Aachen, Jülich
Dipl.-Ing. Frank Krichel, FH Aachen, Jülich

1. Kurzfassung und Einführung

Trifft ein Blitzeinschlag eine bauliche Anlage direkt, kann immer mit hoher Wahrscheinlichkeit von Schäden an elektrischen und elektronischen Einrichtungen ausgegangen werden. Anders stellt sich dies bei indirekten Blitzeinschlägen dar, also bei nahen Blitzeinschlägen, die durch die magnetische Induktion in ausgedehnte Leiterschleifen zu Überspannungen führen können, und bei Einschlägen in oder nahe bei Versorgungsleitungen, die in die bauliche Anlage eingeführt werden. Hier treten Schäden nur mit einer wesentlich geringeren Wahrscheinlichkeit auf; wegen des großen räumlichen Einzugsbereichs eines einzigen Blitzeinschlags (einige 100 m bis zu wenigen km) ist der Gesamtumfang dieser Schäden aber größer als bei den Direkteinschlägen.

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein „Modell“ zu den Schadensszenarien vorgestellt, das beschreibt, bis zu welcher Entfernung zwischen Schadensort und Blitzeinschlagsort mit ausreichender Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden kann, dass ein Schaden auch Folge einer Blitzüberspannung ist.

Dieses „Modell“ beruht auf folgenden Bausteinen bzw. berücksichtigt die folgenden Untersuchungen, die im Beitrag beschrieben werden:

- Grundüberlegungen und Grundannahmen zu elektromagnetischen Einkopplungsmechanismen sowie Normative Festlegungen aus der neuen Blitzschutz-Norm DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2:2006): Blitzschutz – Teil 2: Risikomanagement [1];
- Ergebnisse von numerischen Simulationen der Schadenshäufigkeit durch in Schleifen magnetisch induzierte Spannungen mit MATLAB;
- Ergebnisse einer statistischen Auswertung von Schadensfällen deutscher Sachversicherer in der Hausratversicherung für die Kalenderjahre 2005 und 2006;
- Einfluss der Ortungsgenauigkeit von Blitzortungssystemen auf die Ergebnisse.

Aus den genannten Untersuchungen ergeben sich in Abhängigkeit von der Gerätekategorie, der Verteilung bzw. dem Einkopplungsweg und der Bebauungsdichte maximale Entfernungen zwischen Blitzeinschlagsort und Schadensort, bis zu denen mit ausreichender Wahrscheinlichkeit von einem Zusammenhang Scha-

den – Blitzereignis ausgegangen werden kann. Bei größeren Entfernungen ist ein Blitzeinschlag als Ursache für einen Schaden damit unwahrscheinlich.

Die statistische Auswertung bezieht sich auf Schäden in der Hausratversicherung, betrifft also im wesentlichen den Wohn- bzw. privaten Bereich. Die grundsätzlichen Aussagen der Untersuchungen können aber auch auf andere Bereiche (Verwaltung, Gewerbe, Handwerk, Industrie) übertragen werden.

2. Elektromagnetische Grundüberlegungen und normative Festlegungen

Die neue deutsche Norm DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2):2006 [1] als nationale Umsetzung des internationalen Standards IEC 62305-2:2006 bzw. der europäischen Norm EN 62305-2:2006 (im Weiteren wird hier nur noch die VDE-Klassifizierung der Norm verwendet) definiert als das Schadensrisiko R:

$$R = N \cdot P \cdot L$$

- mit: **N** Anzahl der gefährlichen Ereignisse, d.h. die Häufigkeit eines Blitzeinschlags in die jeweils zu betrachtende Fläche;
- P** Schadenswahrscheinlichkeit, d.h. die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Blitzeinschlag einen ganz bestimmten Schaden verursacht;
- L** der Verlust, d.h. die quantitative Bewertung eines ganz bestimmten Schadens (Auswirkungen, Schadenshöhe, Ausmaß, Konsequenzen).

Für die hier diskutierte Untersuchung werden schirmende Einflüsse (Gebäude und/oder Raumschirmungen, Kabelschirme) nicht berücksichtigt und es wird grundsätzlich von einer Stoßspannungsfestigkeit von max. 1,5 kV ausgegangen. Beides sind konservative Annahmen.

Von den oben genannten Parametern gibt L die Auswirkungen des Schadens an, ist also im Sinne der Aufgabenstellung als konstanter Wert anzusetzen und daher nicht weiter von Interesse. P gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein angenommener Blitzeinschlag einen ganz bestimmten Schaden verursacht (Feuer, Überspannung). Bei der vorliegenden Aufga-

benstellung handelt es sich nahezu ausschließlich um Überspannungsschäden.

Die Schadenshäufigkeit F als Folge eines Blitzeinschlags wird demnach nach der Methodik gemäß VDE 0185-305-2:2006 durch das Produkt $N \cdot P$ dargestellt; Einheit dieser Größe ist deshalb Schaden/Jahr. Die Norm geht dabei bezüglich der Schadenswahrscheinlichkeit P von einer ja/nein-Aussage aus, d.h. unter bestimmten (weiteren) Bedingungen tritt eine Überspannung auf, die das angeschlossene elektrische/elektronische Gerät entweder noch tolerieren kann, oder die es überlastet. Es handelt sich also entweder um einen Schaden ($P = 1$), oder eben nicht ($P = 0$). Für eine Risikoanalyse, die zur Entscheidung führen soll, ob eine bauliche Anlage mit Blitzschutzmaßnahmen ausgerüstet werden soll, und wenn ja, mit welchen, ist dies ausreichend. Für eine Wahrscheinlichkeitsaussage, und insbesondere zum Vergleich mit Datenbeständen aus tatsächlichen Schadensmeldungen, muss dies allerdings noch detaillierter untersucht werden.

In der Risikoanalyse nach VDE 0185-305-2:2006 geht man davon aus, dass bei einem direkten oder nahen Blitzeinschlag und der Schadenswahrscheinlichkeit

$P = 1$ natürlich auch immer ein Schaden auftritt. In der Realität ist dagegen aus Schadensstatistiken bekannt, dass selbst bei direktem Blitzeinschlag als dem worst-case nicht alle elektrischen/elektronischen Geräte geschädigt sind, d.h. die Schadenswahrscheinlichkeit für ein einzelnes Gerät ist sogar hier (deutlich) kleiner 1. Steigt nun die Entfernung d zwischen Blitzeinschlagsort und Schadensort an, sinkt die Schadenswahrscheinlichkeit weiter.

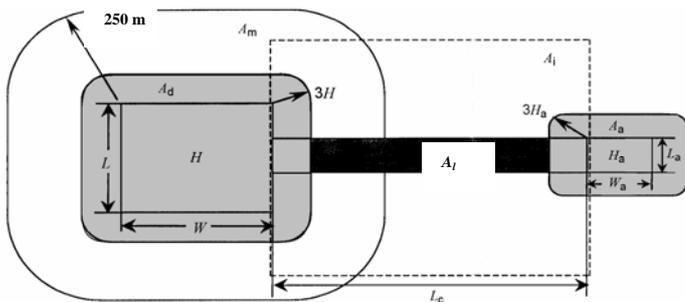


Bild 1: Äquivalente Einfangflächen A_d , A_m , A_l , A_i für direkte und indirekte Blitzeinschläge bezüglich der baulichen Anlage [1].

Unterschieden werden nach VDE 0185-305-2:2006 folgende gefährliche Ereignisse (entsprechend den Häufigkeiten von gefährlichen Blitzeinschlägen) in Abhängigkeit vom Blitzeinschlagsort, die relevant für eine bauliche Anlage sein können (**Bild 1**):

N_D Anzahl gefährlicher Ereignisse durch direkte Blitzeinschläge in die bauliche Anlage;

N_M Anzahl gefährlicher Ereignisse durch nahe Blitzeinschläge mit magnetischen Wirkungen;

N_L Anzahl gefährlicher Ereignisse durch direkte Blitzeinschläge in eingeführte Versorgungsleitungen;

N_I Anzahl gefährlicher Ereignisse durch Blitzeinschläge neben eingeführten Versorgungsleitungen.

Die Berechnung der Anzahl gefährlicher Ereignisse durch die unterschiedlichen Blitzeinschläge ist detailliert in Anhang A der VDE 0185-305-2:2006 dargestellt. Die Häufigkeit N_D ist bei der hier vorliegenden Aufgabenstellung nicht von Interesse, da bei direktem Blitzeinschlag ja immer von einem Schaden ausgegangen werden kann. Für die anderen drei Häufigkeiten gilt:

- Die Anzahl gefährlicher Ereignisse durch nahe Blitzeinschläge N_M berechnet man zu:

$$N_M = N_g \cdot A_m$$

N_g ist die Erdblitzdichte am Standort der baulichen Anlage. A_m ergibt sich nach VDE 0185-305-2:2006, wenn im Abstand von 250 m um die bauliche Anlage herum eine Linie gezogen wird.

- Die Anzahl gefährlicher Ereignisse durch direkte Blitzeinschlägen in eine eingeführte Versorgungsleitung N_L ergibt sich zu:

$$N_L = N_g \cdot A_l \cdot C_d \cdot C_t$$

C_t und C_d sind Korrekturfaktoren für das Vorhandensein eines Transformators und für den Standort der Leitung. Die Fläche A_l ist abhängig vom Leitungstyp (Freileitung, erdverlegtes Kabel), von der Länge L_c der Leitung, bei Kabeln vom spezifischen Erdbodenwiderstand ρ und bei Freileitungen von der Höhe H_c der Leitung über der Erdoberfläche. In allen Fällen aber gilt, dass als Länge der Leitung ein worst-case Wert von $L_c = 1000$ m anzunehmen ist.

- Die Anzahl gefährlicher Ereignisse als Überspannungen durch Blitzeinschläge neben einer eingeführten Versorgungsleitung N_I ist beschrieben zu:

$$N_I = N_g \cdot A_i \cdot C_e \cdot C_t$$

Der Korrekturfaktor C_e gibt den Einfluss der Umgebung wieder. Die Fläche A_i ist wieder abhängig vom Leitungstyp (Freileitung, erdverlegtes Kabel), von der Länge L_c der Leitung, bei Kabeln vom spezifischen Erdbodenwiderstand ρ und bei Freileitungen von der Höhe H_c der Leitung über der Erdoberfläche. Es gilt für die Länge L_c die gleiche worst-case Annahme: 1000 m.

3. Numerische Simulationen der Schadenshäufigkeit durch Induktionen in Schleifen

Für die Abschätzungen in VDE 0185-305-2:2006 wurde eine Induktionsschleife mit $S = 10 \text{ m}^2$ Fläche angenommen. Unter den gegebenen Voraussetzungen führt dann ein Blitzschlag in einer Entfernung von 250 m gerade noch zu einer nicht mehr tolerierbaren Überspannung von größer 1,5 kV.

Setzt man dagegen nun folgende Schleifengrößen als typische worst-case Werte an:

- $S = 1 \text{ m}^2$ für ein Gerät, das nur mit einem elektrischen Versorgungsnetz verbunden ist (in der Regel Stromversorgung);
- $S = 50 \text{ m}^2$ für ein Gerät, das mit mindestens zwei elektrischen Versorgungsnetzen verbunden ist (Stromversorgung und Telekommunikation, Stromversorgung und Antenne, etc.);

ergeben sich bei gleichen Voraussetzungen Entfernungen von nur 25 m (im Fall a) bzw. von 1250 m (im Falle b).

Im Folgenden werden Ergebnisse von numerischen Simulationen mit MATLAB für alle drei genannten Schleifengrößen ($S = 1 \text{ m}^2$, 10 m^2 und 50 m^2) kurz dargestellt. Weitere allgemeine Festlegungen für diese Simulationen sind:

- Die Berechnungen werden ausschließlich für den negativen Folgeblitz durchgeführt [2], da die höchsten magnetischen Induktionswirkungen in Schleifen mit der größten Stromsteilheit verbunden sind [3, 4].
- Die Verteilung der Stromsteilheiten der negativen Folgeblitze wurde VDE 0185-305-1:2006 [2], Anhang A entnommen.
- Als Stoßspannungsfestigkeit der angeschlossenen elektrischen/elektronischen Geräte ist typischerweise $U_w = 1,5 \text{ kV}$ festgelegt. Daneben werden hier aber auch Berechnungen für die Werte $U_w = 0,5 \text{ kV} / 1,0 \text{ kV} / 2,5 \text{ kV}$ vorgenommen.
- Die Orientierung der Induktionsschleife ist stets senkrecht zum durchgreifenden magnetischen Feld gerichtet, so dass maximale Induktion auftritt (worst-case).
- Als Blitzdichte wird $N_g = 4$ Blitzschläge pro km^2 und Jahr verwendet (dieser Wert wirkt sich zwar auf die absoluten Zahlen aus, hat aber auf die relativen Verläufe der Schadenshäufigkeiten keinen Einfluss).

Typische Ergebnisse geben die **Bilder 2 und 3** wieder. Dargestellt ist dabei die Schadenshäufigkeit F als Funktion der Entfernung d vom Schadensort zum Blitzschlagort.

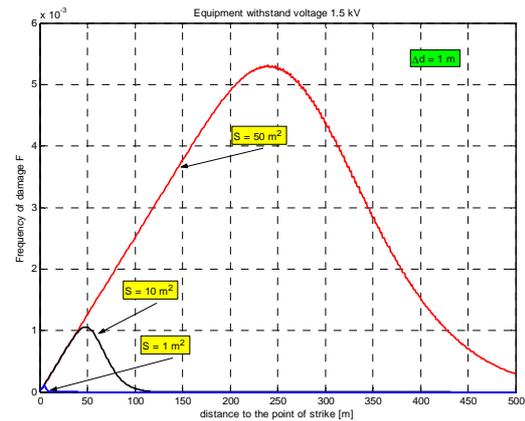


Bild 2: Schadenshäufigkeit F für nahe Blitzschläge als Funktion der Entfernung d von Schadensort zu Blitzschlagort für drei Schleifengrößen ($U_w = 1,5 \text{ kV}$).

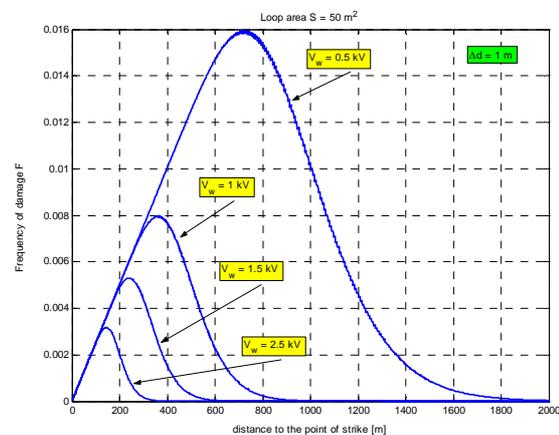


Bild 3: Schadenshäufigkeit F für nahe Blitzschläge als Funktion der Entfernung d von Schadensort zu Blitzschlagort für unterschiedliche Stoßspannungsfestigkeiten (Schleifenfläche 50 m^2).

Die Schadenshäufigkeit F (in Schaden/Jahr) ist in beiden Bildern gültig für einen konzentrischen Ring in einer Entfernung von d zum Blitzschlagort, wobei der Ring eine Breite von $\Delta d = 1 \text{ m}$ aufweist, d.h. die Fläche A , auf die sich die Schadenshäufigkeit bezieht, beträgt:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot \Delta d$$

Aus den Bildern 2 und 3 lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

1. Die Schadenshäufigkeit F nimmt zunächst für kleine Entfernungen d nahezu linear zu, da die Schadenswahrscheinlichkeit in diesem Bereich noch nahezu konstant ist ($P \approx 1$).
2. Für weiter zunehmende Entfernung d nimmt die Schadenswahrscheinlichkeit P dann überproportional ab, womit die Schadenshäufigkeit F dann rel. stark abnimmt.

3. Nachdem von nahen Blitzeinschlägen erst ab einer Entfernung vom Blitzeinschlagsort von einigen 10 m gesprochen werden kann (sonst handelt es sich vielmehr um einen Direkteinschlag), können nennenswerte induktive Einkopplungen in die Schleife mit $S = 1 \text{ m}^2$ ausgeschlossen werden. Für elektrische/elektronische Geräte, die nur mit einem elektrischen Versorgungsnetz verbunden sind, sind induktive Einkopplungen durch nahe Blitzeinschläge daher nahezu nicht relevant.
4. Für „typische“ Schleifengrößen (10 m^2 nach [1]) und übliche Stoßspannungsfestigkeiten von 1,5 kV sind relevante Einkopplungen nur bis zu einer Entfernung d von ca. 100 m feststellbar. Auch bei sensibleren elektrischen/elektronischen Geräten mit geringeren Stoßspannungsfestigkeiten von z.B. 0,5 kV treten solche relevanten Einkopplungen nur bis zu einer Entfernung d von wenigen 100 m auf.
5. Für sehr große Induktionsschleifen (50 m^2) zu elektrischen/elektronischen Geräten, die mit mindestens zwei elektrischen Versorgungsnetzen verbunden sind (Stromversorgung und Telekommunikation, Stromversorgung und Antenne, etc.), und übliche Stoßspannungsfestigkeiten von 1,5 kV treten relevante Einkopplungen bis zu einer Entfernung d von ca. 500 m auf.
6. Bei sensibleren elektrischen/elektronischen Geräten mit einer geringeren Stoßspannungsfestigkeit von z.B. 1,0 kV an zwei elektrischen Versorgungsnetzen sind relevante Einkopplungen bis zu einer Entfernung d von ca. 700 m nicht auszuschließen, bei 0,5 kV Stoßspannungsfestigkeit bis zu 1500 m.

4. Statistische Auswertung von Schadensfällen 2005 und 2006

4.1 Aufbau der Daten

Im Rahmen einer Studie für den Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) e.V. ergab sich die Möglichkeit, umfangreiche Daten von gemeldeten Schäden der Hausratversicherungen zu analysieren. Insgesamt wurden ca. 74100 Fälle aus den Jahren 2005 und 2006 untersucht: die Daten aus 2005 (ca. 35700 Fälle) wurden verwendet, um ein stochastisches Modell zu entwickeln und Schlussfolgerungen zu formulieren, die Daten aus 2006 dienen dann der Kontrolle von Modell und Schlussfolgerungen. Die Daten der Schadensfälle enthielten:

- den genauen Schadensort (Adresse des Versicherungsnehmers, der den Schaden gemeldet hatte);
- Art des geschädigten Gerätes;
- Datum des Auftretens des Schadens;
- Entfernung des nächstgelegenen Wolke-Erde-Blitzes, der vom Blitzortungssystem BLIDS am

Tag des Schadens registriert wurde (Blitzeinschlagsort) zum Schadensort.

Hinweis: Es ist natürlich keineswegs sicher, dass ausschließlich und immer der am nächsten geortete Blitz den Schaden verursacht hat, insbesondere, wenn man die räumlichen Fehler bei der Ortung durch das Blitzortungssystem berücksichtigt (vgl. dazu Abschnitt 5). Allerdings rechnet sich dieser Ortungsfehler bei der großen Anzahl von Fällen im Mittel wohl heraus; dieser Aspekt wird aktuell in einer weitergehenden Arbeit untersucht. Aus diesem Grund ist zunächst die Verwendung der nächstgelegenen Ortung sinnvoll.

Bei der Verwendung realer Daten ist es nicht absolut sicher, dass ein gemeldeter Schaden auch wirklich auf Blitzeinwirkung zurückgeht. Diese Fälle sollten daher mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden können (vgl. dazu Abschnitt 4.2).

Schließlich wurde eine kommerzielle Datenbank verwendet, um die Schadensorte aus 2005 in drei Umgebungskategorien zu unterteilen, die durch die Bevölkerungsdichte (BD) charakterisiert sind:

- $BD \geq 1000/\text{km}^2$ für sehr dicht besiedelte Bereiche (Stadt);
- $1000 \text{ km}^2 \geq BD \geq 100/\text{km}^2$ für dicht besiedelte Bereiche (Vorstadt);
- $BD < 100/\text{km}^2$ für dünn besiedelte Bereiche (Land).

Bei einer solchen Untersuchung ist es nahezu unmöglich, Schadenswahrscheinlichkeiten zu ermitteln, und es ist sogar zu bezweifeln, ob Schadenshäufigkeiten erhalten werden können. Man kennt zwar eine Anzahl von gemeldeten Schäden, aber keineswegs die Gesamtanzahl der im relevanten räumlichen Bereich vorhandenen elektrischen/elektronischen Geräte (dieser Vergleich würde eine Schadenswahrscheinlichkeit ergeben). Es ist weiterhin nicht bekannt, ob alle geschädigten Geräte im relevanten Bereich erfasst sind (z.B. könnte es weitere Schäden bei anderen Versicherern geben, oder diese geschädigten Geräte sind gar nicht versichert). Deshalb konzentrierte sich die statistische Auswertung nur auf den relativen Zusammenhang der gemeldeten Schadensfälle in Abhängigkeit zum Abstand zwischen Schadensort und geortetem Blitz-einschlagsort.

4.2 Statistische Methodik

Da es sich bei den gemeldeten Schadensfällen um reale Daten handelt, die in keinerlei Weise vorbehandelt wurden, muss man davon ausgehen, dass sich der gesamte Datenbestand aus unterschiedlichen Schadenskategorien zusammensetzt. Zur statistischen Beschreibung der Daten wurde hier angenommen, dass die gemeldeten Schäden aus einer der vier folgenden Gruppen entstammen:

- **Gruppe 1:** Der Schaden ist durch Induktionseinwirkung verursacht worden.
- **Gruppe 2:** Der Schaden ist durch einen Blitzeinschlag in die Versorgungsleitung verursacht worden.

- **Gruppe 3:** Der Schaden ist möglicherweise nicht auf einen Blitzeinschlag zurück zu führen. Es wurde aber ein Blitzeinschlag in einer akzeptablen Entfernung zum Schadensort gemessen.
- **Gruppe 4:** Der Schaden ist möglicherweise nicht auf einen Blitzeinschlag zurück zu führen. Es wurde auch kein Blitzeinschlag in einer akzeptablen Entfernung zum Schadensort gemessen.

Um die wahren Schadensfälle, d.h. die Schäden, die zu den ersten beiden Gruppen gehören, zu modellieren, wurde, jeweils pro Gruppe, eine Gamma-Verteilung angenommen. Die Dichte dieser Verteilung hat die Form

$$f(x; \alpha, \sigma) = x^{\alpha-1} \exp(-x/\sigma) / (\sigma^\alpha \Gamma(\alpha)) I_{x>0},$$

wobei x die Distanz zwischen Schadensort und Blitzeinschlag bezeichnet und

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} \exp(-t) dt.$$

Für die Verteilung der Daten aus den beiden Gruppen 3 und 4 wurde jeweils eine Normal-Verteilung angenommen, d.h. die jeweilige Dichte hat die Form

$$f(x; \alpha, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\alpha)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Die Verteilungsdichte zum gesamten Datenbestand stellt jetzt eine Mischung aus den einzelnen Dichten dar

$$f(x; \Psi, \Theta) = \sum_{k=1}^4 \psi_k f_k(x; \Theta_k),$$

wobei die einzelnen Anteile der Gruppen mit

$$\Psi = (\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4)$$

bezeichnet werden. Die Dichten der einzelnen Gruppen werden in dieser Formel mit f_1, \dots, f_4 notiert und die einzelnen Parameter pro Dichte mit $\Theta_i = (\alpha_i, \sigma_i)$, $i=1, \dots, 4$.

Dieses Modell wurde an den Gesamtdatenbestand angepasst. Entfernt man aus diesem angepassten Modell die beiden Dichten der Normal-Verteilung, so erhält man aus den beiden Gamma-Verteilungen, entsprechend normiert, das globale Modell. Dieses hat jetzt die Form

$$f_g(x) = \frac{\psi_1}{\psi_1 + \psi_2} f_1(x; \Theta_1) + \frac{\psi_2}{\psi_1 + \psi_2} f_2(x; \Theta_2),$$

wobei die Parameter und die Mischungsanteile auf den geschätzten Werten beruhen.

Die Anpassung wurde mit einem Maximum-Likelihood-Ansatz durchgeführt. Da weder Information über die Gruppenzugehörigkeit der einzelnen Fälle vorhanden war, noch etwas über die Mischungsanteile als bekannt angenommen wurde, ist die zugehörige Likelihood Funktion unvollständig.

Likelihood Funktion unvollständig. Um solch eine (unvollständige) Likelihood Funktion zu maximieren, ist der Expectation-Maximization-Algorithmus von Dempster et al. [5] die erste Wahl. Dieser Algorithmus wurde auch hier genutzt, um die Mischungsanteile und die Parameter der einzelnen Dichten zu schätzen.

Solch ein globales Modell wurde nicht nur für den Gesamtdatenbestand bestimmt, sondern auch für die drei Teilbestände Stadt, Vorstadt und Dorf, die sich aus einer Zerlegung des Gesamtbestandes nach Postleitzahlen und zugehöriger Besiedlungsdichte pro Postleitzahl ergeben (siehe Kapitel 4.1).

Zur Überprüfung des ermittelten globalen Modells wurde das gleiche Verfahren auf die Schadensmeldungen aus dem Jahre 2006 angewandt. Das auf dieser Datenbasis bestimmte Modell wurde anschließend mit dem auf den Daten des Jahres 2005 basierenden Modell verglichen.

Bei der Modellierung wurde die Genauigkeit des Blitzortungssystems nicht mit berücksichtigt, da der Rechenaufwand für solch eine Erweiterung bei der zugrunde liegenden Datenmenge zu groß geworden wäre. Allerdings wird dieser Einfluss gegenwärtig noch im Rahmen von kleineren Simulationsstudien untersucht.

4.3 Ergebnisse

In den folgenden zwei Tabellen werden die Ergebnisse der Schätzungen zusammengefasst. **Tabelle 1** zeigt die Mischungsanteile der einzelnen Dichten für den Gesamtdatenbestand und für die drei Teilbestände, Stadt, Vorstadt und Dorf.

Tabelle 1: Geschätzte Mischungsanteile der einzelnen Dichten basierend auf dem Datenbestand 2005.

Datenbestand	Mischungsanteile			
	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4
Dorf	0.3871	0.5862	0.0210	0.0059
Vorstadt	0.3478	0.5648	0.0473	0.0401
Stadt	0.4963	0.4051	0.0274	0.0712
Gesamt	0.3127	0.5985	0.0442	0.0446

Insgesamt decken die ersten beiden Dichten, d.h. die beiden Gamma-Verteilungen, in allen Fällen etwa 90% der jeweiligen Mischung ab. Darüber hinaus ist der Anteil der ersten Gamma-Verteilung beim Teilbestand „Stadt“ wesentlich größer als bei den anderen Beständen.

Während **Tabelle 2** die geschätzten Parameter der einzelnen Dichten pro Datenbestand listet, werden in **Bild 5** die einzelnen geschätzten Dichten zum Gesamtdatenbestand grafisch dargestellt.

Tabelle 2: Geschätzte Parameter der einzelnen Dichten basierend auf dem Datenbestand 2005.

Datenbestand	Parameter der Dichten							
	α_1	$1/\sigma_1$	α_2	$1/\sigma_2$	α_3	σ_3	α_4	σ_4
Dorf	2.17	4.64	1.17	0.62	10.17	2.58	4.32	0.26
Vorstadt	2.54	7.32	1.13	0.93	9.17	2.74	4.30	1.22
Stadt	2.07	6.57	1.23	1.02	9.25	1.94	4.08	1.33
Gesamt	2.44	6.56	1.17	0.86	9.08	2.83	4.34	1.24

Besonders auffallend ist, dass die erste Gamma-Verteilung jeweils stärker auf den kurzen Entfernungen konzentriert ist als die zweite. Dies wird ersichtlich aus $1/\sigma_1 > 1/\sigma_2$, wie auch aus Bild 5 für den Gesamtdatenbestand. Bild 4 zeigt die relativen Häufigkeiten der Schadensfälle aus 2005 zusammen mit der angepassten Dichte. Offensichtlich beschreibt die angepasste Dichte die relativen Häufigkeiten recht gut.

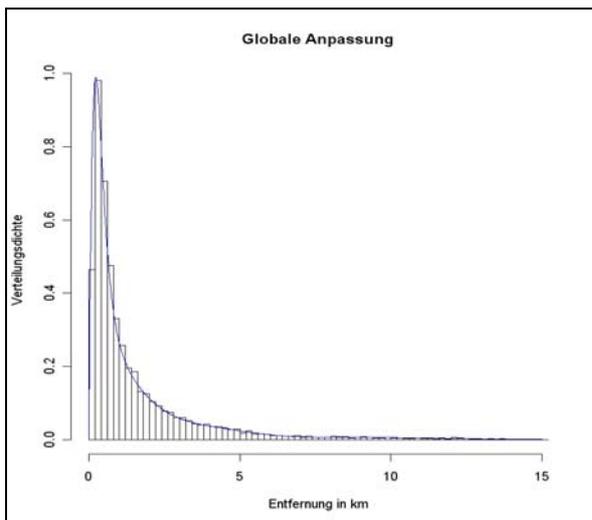


Bild 4: Relative Häufigkeiten des gesamten Datenbestandes 2005 und angepasste Dichte.

Die Zerlegung der angepassten Dichte in die einzelnen vier an der Mischung beteiligten Dichten zeigt Bild 5. Basierend auf den geschätzten Mischungsanteilen und Parametern können die entsprechenden globalen Modelle angegeben werden. Die zugehörigen Verteilungsfunktionen sind in der folgenden Tabelle 3 für einige markante Punkte gelistet.

Auffällig an Tabelle 3 sind die fast identischen Werte zu den beiden Verteilungen Stadt und Vorstadt. Des Weiteren zeigt die Verteilungsfunktion zur Kategorie Dorf eindeutig höhere Anteile bei größeren Entfernungen als die anderen beiden Verteilungen Stadt und Vorstadt. Die Verteilungsfunktion zum Gesamtdatenbestand liegt, und das war auch nicht anders zu erwarten, zwischen den anderen.

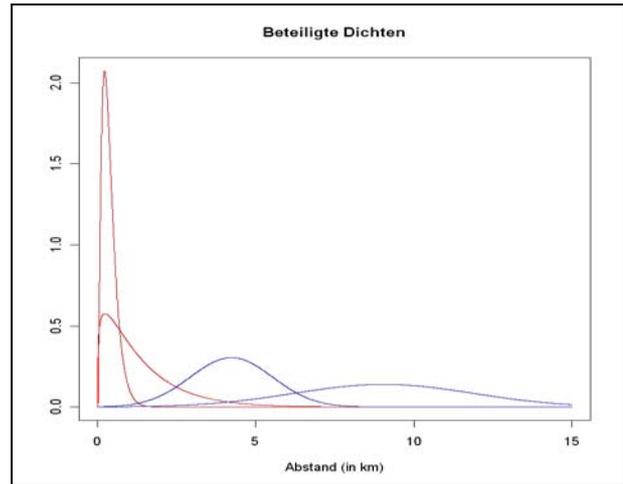


Bild 5: Beteiligte (ungewichtete) Dichten der Gamma-Verteilungen und der Normal-Verteilungen an der Gesamtdichte.

Tabelle 3: Markante Punkte der Verteilungsfunktionen der einzelnen globalen Modelle basierend auf den Daten aus 2005.

Datenbestand	Prozentualer Anteil mit Distanz größer als					
	0.5km	1.0km	1.5km	2.0km	2.5km	3.0km
Dorf	63.04	39.84	28.65	21.39	16.04	12.01
Vorstadt	50.37	28.45	18.16	11.69	7.50	4.79
Stadt	50.06	28.77	18.04	11.32	7.06	4.38
Gesamt	56.00	33.50	22.27	14.93	9.98	6.64

Bild 6 zeigt das an die Daten des Jahres 2005 angepasste globale Modell und das entsprechende globale Modell zu den Daten des Jahres 2006. Offensichtlich sind beide Modelle nahezu identisch. Dies bestätigt nochmals den gewählten Modellansatz.

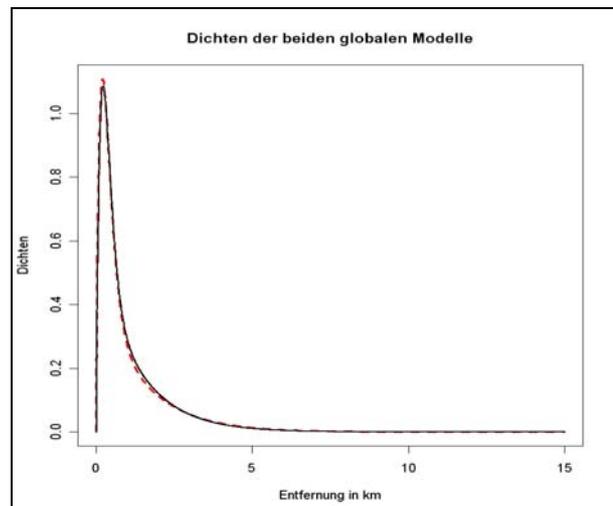


Bild 6: Globale Modelle angepasst an die Daten aus 2005 und 2006

5. Einfluss der Ortungsgenauigkeit von Blitzortungssystemen

5.1 Grundlegende Anforderungen

Die Detektion der Blitzeinschläge wurde durch das Blitzortungssystem BLIDS von Siemens durchgeführt. Die Technologie des Systems BLIDS ist in [6] dargestellt, weitere Informationen finden sich in [7, 8]. Grundsätzlich kann man für ein Blitzortungssystem vier Anforderungskriterien definieren:

a) Detection efficiency (DE) für Blitzschläge (flashes):

Damit wird definiert, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Blitzschlag detektiert wird. Dieses Kriterium ist naturgemäß sehr wichtig, sowohl für blitzschutztechnische, meteorologische, versicherungstechnische oder auch wissenschaftliche Zwecke. Ein Blitzortungssystem soll mit hoher Genauigkeit alle realen Blitzschläge

b) Detection efficiency (DE) für Teilblitze (strokes):

Hier wird nicht die DE für Blitzschläge, sondern für die einzelnen Teilblitze einer Blitzenzladung beschrieben. Dieses Kriterium ist für wissenschaftliche Untersuchungen relevant, zum Teil wohl auch für meteorologische und blitzschutztechnische Aufgabenstellungen, aber nahezu unbedeutend für versicherungstechnische Fragen. Hierfür ist nur die Aussage wichtig, ob ein Blitz eingeschlagen hat, aber nicht, wie viele Teilblitze diese Blitzenzladung hatte.

c) Räumliche Ortungsgenauigkeit:

Damit wird beschrieben, welche räumlichen Fehler bei der Ortung des Blitzereignisses bestehen. Bedingt durch die verwendeten Technologien und Algorithmen und zum Teil bedingt auch durch die Blitzphysik ist eine Toleranz bei der Ortung von wenigen 100 m nicht zu vermeiden. Dieses Kriterium ist ebenfalls sehr wichtig, insbesondere auch für versicherungstechnische Fragen, da darauf z.B. die Entscheidung gründet, ob ein bestimmter Blitz für einen konkreten Schaden verantwortlich sein kann oder nicht.

Die bei einem einzelnen Blitzschlag erreichbare Ortungsgenauigkeit hängt von einer Reihe von Einflussfaktoren ab, wie z.B. der Anzahl der beteiligten Sensoren, der Distanz des Einschlagpunktes zu den Sensoren, dem statistischen Fehler bei der Zeitmessung und dem Maximalwert des Feldimpulses bzw. dem daraus errechneten Blitzstromscheitelwert. Daneben können systematische Fehler von entscheidender Bedeutung sein. Systematische Fehler sind zwar im Prinzip korrigierbar, wie beispielsweise durch sorgfältige Kalibrierung der Sensoren, andererseits können die systematischen Fehler, zum Beispiel durch die Wellenausbreitung über der Erde, oft nur schwer abgeschätzt werden.

Bei der Wellenausbreitung über der Erde spielen neben den topologischen Gegebenheiten (Berge) die Erdverhältnisse (Gestein, Kies, Lehm, Wasser, etc.), die sich zudem jahreszeitlich mit der Durchfeuchtung des Erdreiches ändern, eine entscheidende Rolle. Daher ist es grundsätzlich schwierig, die Ortungsgenauigkeit von Blitzortungssystemen aufgrund von Einzelereignissen zu beurteilen.

d) Selektivität zwischen Wolke-Erde-Blitzen und sonstigen Ereignissen (auch Wolke-Wolke-Blitze): Darunter wird die möglichst eindeutige Unterscheidung in Wolke-Erde-Blitze, Wolke-Wolke-Blitze und andere Ereignisse (Störphänomene) verstanden. Auch dieses Kriterium ist für alle Bereiche (blitzschutztechnische, meteorologische, versicherungstechnische, wissenschaftliche Zwecke) sehr wichtig. Für versicherungstechnische Fragen ist zu fordern, dass es sich bei einem detektierten Wolke-Erde-Blitz mit hoher Wahrscheinlichkeit auch wirklich um einen solchen handelt.

5.2 Bewertung von BLIDS

Die Unterscheidung zwischen Wolke-Wolke-Blitzen, Wolke-Erde-Blitzen und Störsignalen erfolgt bei BLIDS durch ein patentiertes Verfahren ("Waveform Discrimination" = Wellenform-Kriterium), das einen Blitz aufgrund mehrerer charakteristischer Merkmale des elektromagnetischen Feldes erkennt. Es müssen mehrere Kriterien erfüllt sein, damit ein elektromagnetisches Signal als Blitz registriert wird. Mittels dieses Verfahrens können Störimpulse mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden.

Die Ortungsgenauigkeit des Blitzortungssystems BLIDS für Wolke-Erde-Blitze ist in der Literatur intensiv diskutiert und damit rel. genau untersucht worden. Nach [9, 10] beträgt der räumliche Fehler im Mittel ca. 200 m, sofern systematische Fehler, die an einzelnen Stellen existieren, nicht berücksichtigt werden müssen. Im Einzelfall (für die Schadensbearbeitung) sind solche systematischen Fehler allerdings wohl nicht zu vernachlässigen; dann kann als worst-case eine mittlere räumliche Ortungsgenauigkeit von ca. 400 m angesetzt werden.

Will man eine Ortungsgenauigkeit auch für kleine Wahrscheinlichkeiten nennen, so kann diese Aussage nur mit der Detection Efficiency (DE) für Blitzschläge (Flashes) verbunden werden. Diese liegt beim System ALDIS in Österreich für Blitzstromscheitelwerte von ≥ 4 kA bei 93%, für Blitzstromscheitelwerte von ≥ 10 kA bei 98%. Die Blitzschlag DE des Systems BLIDS in Deutschland dürfte für die niedrigeren Scheitelwerte etwas geringer ausfallen; für die Scheitelwerte ab 10 kA sind die Unterschiede zwischen ALDIS und BLIDS wohl bei nur wenigen Prozent.

Wenn beide „Unsicherheiten“ zusammengenommen werden, kann man wohl davon ausgehen, dass mit ei-

ner räumlichen Ortungsgenauigkeit von jeweils weniger als 1000 m ca. 90% der tatsächlichen Wolke-Erde-Blitze mit Blitzstromscheitelwerten ≥ 4 kA bzw. 95% mit Blitzstromscheitelwerten ≥ 10 kA korrekt gemessen werden. Diese Werte werden durch weitere Untersuchungen und Analysen bestätigt. Eine noch exaktere Aussage ist zur Zeit nicht seriös möglich, aber wohl auch nicht erforderlich.

Hinweis: Hier wird die Blitzschlag DE herangezogen, da es zur Detektion eines Blitzereignisses ausreicht, mindestens einen Teilblitz registriert zu haben. Die Teilblitz DE (für jeden einzelnen Stroke) ist naturgemäß geringer; sie beträgt beim System ALDIS 77% bei Blitzstromscheitelwerten von ≥ 4 kA und 93% bei Blitzstromscheitelwerten von ≥ 10 kA.

6. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Aus den in den Abschnitten 2 – 5 genannten Bausteinen lassen sich die folgenden Ergebnisse und Schlussfolgerungen ableiten:

1. Aus den statistischen Auswertungen lassen sich zwei unterschiedliche Verläufe von Schadensfällen unterscheiden, wenn die Schadensfälle, die mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht durch einen Blitzeinschlag ausgelöst wurden, ausgeblendet werden:
 - **Verteilung 1**, bei der sich die Schadensfälle auf kurze Entfernung zwischen Blitzeinschlagsort und Schadensort verteilen;
 - **Verteilung 2** mit weiterer Streuung und signifikanten Anteilen bis zu ca. 3 km Entfernung zwischen Blitzeinschlagsort und Schadensort.
2. Die beiden (Gamma-) Verteilungen lassen sich elektromagnetisch gut interpretieren:
 - Verteilung 1 gibt die Schäden durch Induktionswirkung bei **nahen Blitzeinschlägen** wieder
 - Verteilung 2 gibt die Schäden durch **Einwirkung auf die Versorgungsleitungen** wieder, die in die bauliche Anlage eingeführt werden.
3. Die geschädigten Geräte können zwei Grundkategorien zugeordnet werden:
 - Kategorie A mit externen Anschlüssen an nur **ein Versorgungsnetz** (Stromversorgung), üblicherweise Haushaltsgeräte und PV-Anlagen;
 - Kategorie B mit externen Anschlüssen an **mehr als ein Versorgungsnetz** (Stromversorgung und Antennenkabel/Telekommunikationskabel/etc.), üblicherweise Unterhaltungselektronik, IT-Geräte, Industrieelektronik und Steuerungen.

Für die Geräte der Kategorie A ist grundsätzlich nur der Einkopplungsweg über die Versorgungsleitungen relevant, für die Geräte der Kategorie B sind beide Einkopplungswege, d.h. sowohl Induktionswirkung bei nahen Blitzeinschlägen als auch über die Versorgungsleitungen, wirksam. Dieses Ergebnis wird durch die statistische Auswertung der Schadensfälle qualitativ gestützt.

4. Wird für die Spannungsfestigkeit der Geräte ein Wert von ca. 1 – 1,5 kV angenommen, und geht man von einer rel. großen Induktionsschleife von 50 m² aus, so treten signifikante induktive Einkopplungen durch **nahe Blitzeinschläge** bis zu einer Entfernung Blitzeinschlagsort zu Schadensort von **700 m** auf. Dieser Wert ist in erster Näherung unabhängig von der Bebauungsdichte; jedoch kann bei dichter Bebauung von einer geringen Abschirmwirkung des Schadensortes zum Blitzstrom-Kanal durch zwischenliegende Gebäude ausgegangen werden, so dass in der Stadt bzw. der Vorstadt tendenziell noch etwas geringere Werte auftreten werden (angesetzt werden können hier wohl maximal **500 m**). Es bleibt festzuhalten, dass der Wert von 250 m, der den Risikoanalysen nach VDE 0185-305-2:2006 zugrunde gelegt wird (vgl. auch Abschnitt 2) keinen worst-case darstellt.

5. Bei Einwirkungen über die Versorgungsleitungen kann grundsätzlich eine Spannungsfestigkeit von 1,5 kV angenommen werden, da es sich hier zum großen Teil um die Stromversorgung handelt. Abhängig von der Bebauungsdichte können dann die Entfernungen Blitzeinschlagsort zu Schadensort nach **Tabelle 4** angesetzt werden, bis zu denen von signifikanten Einwirkungen ausgegangen werden kann.

Die Daten der Sachversicherer zeigen, dass eine größere Zahl von Schadensfällen Entfernungen von mehr als 1 km aufweist, etwa 10% der Fälle sogar von mehr als 2 km (das ist der Grund für die Einführung der „Sonderfälle“ in der Tabelle 4). Insofern muss der Wert von 1000 m nach VDE 0185-305-2:2006, der die maximal zu berücksichtigende Länge L_c einer externen Versorgungsleitung darstellen soll (vgl. wieder Abschnitt 2), als worst-case Annahme ebenfalls kritisch betrachtet werden.

Tabelle 4: Entfernung zum Blitzeinschlagsort, bis zu der noch eine signifikante Wahrscheinlichkeit¹⁾ besteht, dass ein Schaden durch einen Blitzeinschlag und durch den Einkopplungsweg über eine eingeführte Versorgungsleitung verursacht wird.

Dichte Bebauung (Stadt)	Lockere Bebauung (Vorstadt)	Dorf	„Sonderfall“ ²⁾
200 m	500 m	1000 m	2000 m

¹⁾ Unter signifikanter Wahrscheinlichkeit wird hier verstanden, dass etwa noch 10% aller Schadensfälle eine größere Entfernung aufweisen.

²⁾ z.B. freistehende Gehöfte mit Entfernungen von einigen km bis zur nächsten Bebauung bzw. bis zu den Trafostationen und Abschlusskästen.

6. Der Anteil des Einkopplungswegs durch Induktionswirkung an allen Schadensfällen ist stets geringer als über die Versorgungsleitungen (ca. 1/3 zu 2/3). Im Falle einer dichteren Besiedelung

2/3). Im Falle einer dichteren Besiedelung wächst der Anteil der Schäden durch Induktionswirkung geringfügig. Dies ist ebenfalls elektrotechnisch gut zu begründen, da hier die Schäden über eingeführte Versorgungsleitungen zahlenmäßig geringer ausfallen müssen (die wirksame Länge der Versorgungsleitungen ist in der Stadt stark reduziert).

7. Der Blitzeinschlagsort wird vom Blitzortungssystem mit einer begrenzten Ortungsgenauigkeit detektiert. Der räumliche Fehler bei der Ortung beträgt für das Blitzortungssystem BLIDS jeweils weniger als 1000 m für ca. 90% der tatsächlichen Wolke-Erde-Blitze mit Blitzstromscheitelwerten ≥ 4 kA bzw. 95% mit Blitzstromscheitelwerten ≥ 10 kA. Auf die in den Positionen 4 und 5 (bzw. die in Tabelle 5) genannten Entfernungen sollte deshalb ein Wert von **1000 m** addiert werden, wenn die Daten von BLIDS für eine Schadensuntersuchung herangezogen werden sollen.

Tabelle 5: Entfernungen (ohne Berücksichtigung der Ortungsgenauigkeit eines Blitzortungssystems) zwischen Blitzeinschlagsort und Schadensort, bis zu der noch eine signifikante Wahrscheinlichkeit besteht, dass ein Schaden durch einen Blitzeinschlag verursacht wird.

Geräte-kategorie	Verteilung bzw. Einkopplung	Dichte Bebauung (Stadt)	Lockere Bebauung (Vorstadt)	Dorf	„Sonderfall“
Kategorie A	1 – Induktion	-	-	-	-
	2 – Vers.-leitung	200 m	500 m	1000 m	2000 m
Kategorie B	1 – Induktion	500 m	500 m	700 m	700 m
	2 – Vers.-leitung	200 m	500 m	1000 m	2000 m

Tabelle 5 fasst die Ergebnisse der Untersuchung nochmals zusammen. Es bleibt festzuhalten: Bei Entfernungen zwischen Blitzeinschlagsort und Schadensort, die über die Werte in Tabelle 5 hinausgehen (zuzüglich ggf. eines Faktors zur Berücksichtigung der Ortungsgenauigkeit eines Blitzortungssystems), ist ein Zusammenhang des Schadens mit dem Blitzeinschlag sehr unwahrscheinlich.

Es sei abschließend nochmals darauf hingewiesen, dass die statistische Auswertung sich auf Schäden in der Hausratversicherung bezieht. Die grundsätzlichen Aussagen der Untersuchungen können aber auch auf andere Bereiche (Verwaltung, Gewerbe, Handwerk, Industrie) übertragen werden, sofern die Spannungsfestigkeiten der elektrischen/elektronischen Geräte, die Größen der Induktionsschleifen und die sich an

der Bebauungsdichte orientierenden Längen der externen Versorgungsleitungen nicht stark divergieren.

7. Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2):2006-10: Blitzschutz – Teil 2: Risikomanagement
- [2] DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1):2006-10: Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze.
- [3] Hasse, P.; Wiesinger, J.; Zischank, W.: Handbuch für Blitzschutz und Erdung. Pflaum Verlag München, 5. Auflage 2006.
- [4] Hasse, P.; Landers, E.U.; Wiesinger, J.: EMV - Blitzschutz von elektrischen und elektronischen Systemen in baulichen Anlagen. VDE Verlag Berlin-Offenbach, 2004.
- [5] Dempster, A.P., Laird, N.M., and Rubin, D.B. (1977). Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Vol. 39, p 1-38.
- [6] www.blids.com
- [7] www.euclid.org
- [8] <http://www.vaisala.com/businessareas/measurementsystems/thunderstorm/products>
- [9] Diendorfer, G. et al: Evaluation of Lightning Location Data Employing Measurements of Direct Strikes to a Radio Tower. Paper 33-206. CIGRE Session, Paris 2002.
- [10] Diendorfer, G.; Pichler, H.: Properties of Lightning Discharges to an Instrumented Tower and their Implication on the Location of those Flashes by Lightning Location Systems. Private Konversation.

Danksagung

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes durchgeführt, das vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) e.V. initiiert und gefördert wurde. Dem GDV, seiner Arbeitsgemeinschaft Blitz- und Überspannungsschutz (BLUES) und insbesondere den Mitarbeitern der Arbeitsgemeinschaft möchten wir an dieser Stelle herzlich für die Förderung, die engagierte Unterstützung der Untersuchungen und die Erlaubnis zur Veröffentlichung der Ergebnisse danken.

Adresse für Korrespondenz:

Prof. Dr.-Ing. Alexander Kern

Fachhochschule Aachen, Standort Jülich

Fachbereich Ang. Naturwissenschaften und Technik

Ginsterweg 1

52428 Jülich

Tel: 0241/6009-53042

Fax: 0241/6009-53262

a.kern@fh-aachen.de