

# Extrem hohe Blitzströme

## Extremely high lightning currents

Dipl.-Ing. Josef Birkl, DEHN+SÖHNE GmbH & Co., Neumarkt (DE), [Josef.Birkl@dehn.de](mailto:Josef.Birkl@dehn.de)

Dr.-Ing. Gerhard Diendorfer, ALDIS, Wien (AT), [G.Diendorfer@ove.at](mailto:G.Diendorfer@ove.at)

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

Stephan Thern, SIEMENS AG, Karlsruhe (DE), [stephan.thern@siemens.com](mailto:stephan.thern@siemens.com)

### Kurzfassung

Immer wieder gibt es Meldungen über extrem hohe Blitzströme, die natürlich auch zu großen Schäden und Zerstörungen führen können. Dabei werden Scheitelwerte von teilweise deutlich über 300 kA genannt. Dies wirft Fragen auf, da die „klassische“ Blitzstatistik (z.B. nach CIGRE und IEC [8, 10]) bisher solche Werte nicht kannte. Solche Blitzströme ergeben sich aber aus den Daten der Blitzortungssysteme.

Im folgenden Beitrag wird solchen extremen Blitzströmen nachgegangen. Die dafür erforderlichen Grundlagen der Blitzortung werden ebenso dargestellt, wie die Grenzen bei der Verifizierung von Extremwerten. Die „klassische“ Blitzstatistik und weitergehende Untersuchungen zu extremen Blitzströmen werden diskutiert.

### Abstract

Consistently, we get news about extremely high lightning currents, leading to severe damages and destructions. Often peak currents of clearly above 300 kA are mentioned. This raises questions, because the “classic” lightning statistic (acc. to CIGRE and IEC [8, 10]) does not know such values. However, such values are derived from the data of lightning locations systems.

In the following paper such extremely high lightning currents are investigated. The necessary basics of the lightning location systems are describes, as well as the limits for the verification of extremely high values. The “classic” lightning statistic and advanced investigations about extremely high lightning currents are discussed.

## 1 Einführung

Im Jahre 2016 findet sich eine Meldung über einen „Mega-Blitz“ in Essen [1]. Der Scheitelwert wird auf Basis der Messungen des Blitzortungssystems BLIDS (Blitz Informationsdienst Siemens) mit 405 kA angegeben (**Bild 1**).



**Bild 1** Meldung zu „Mega-Blitz“ in Essen [1].

In der Nähe von Berching in Bayern ist eine gewaltige Eiche durch einen Blitzeinschlag im wahrsten Sinne zerborsten (**Bild 2**). BLIDS hat am 8. Juni 2016 genau an der Stelle praktisch zeitgleich (Zeitabstand 2  $\mu$ s!) zwei Wolke-Erde-Blitze von 335,1 bzw. 347,3 kA registriert (**Bild 3**) [2]. Das

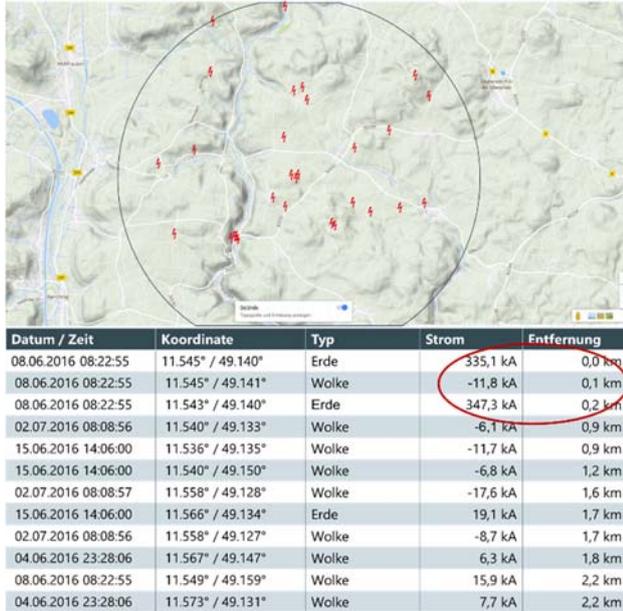
waren gewaltige „kalte“ Blitze. Kalt, da der Blitz nicht gezündet und somit den Baum auch nicht abgebrannt hat. Durch die Stromstärke des Blitzes und die damit verbundene starke Hitzeentwicklung wird die Flüssigkeit im Baum binnen Bruchteilen von Sekunden zu Dampf. Dieser dehnt sich „blitzschnell“ aus und der Baum wird gesprengt.



**Bild 2** Blitzeinschlag in Eiche bei Berching [2].

Im Fall der Eiche ist davon auszugehen, dass tatsächlich nur eine einzige stromstarke Entladung aufgetreten ist. Derartige Entladungen werden auf Grund der extrem großen Feldamplituden von 40 und mehr Ortungssensoren (siehe Abschnitt 2) registriert, die viele hundert Kilometer vom Einschlagsort entfernt sind. Es kommt wie im gegenständlichen Fall dann manchmal vor, dass der Ortungsalgorithmus aus der verfügbaren Fülle an Sensormeldungen zwei nahezu zeitgleiche Entladungen ermittelt, obwohl in der Realität nur ein Blitzereignis stattgefunden hat. Detaillierte Untersuchungen zu Blitzeinschlägen in Bäumen sind in [3] zu finden.

Es stellt sich natürlich die Frage, inwieweit solch stromstarke Blitze wirklich existieren. Naturgemäß beruhen die Angaben der Scheitelwerte ja auf einer Modellrechnung aus den gemessenen elektromagnetischen Felddaten heraus. Dennoch werden die daraus ermittelten Scheitelwerte in wissenschaftlichen Publikationen und Informationen für die Öffentlichkeit direkt herangezogen, ohne darauf hinzuweisen, dass sie lediglich Ergebnis einer Modellrechnung sind, und daher natürlich mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind.



**Bild 3** BLIDS-Auswertung des Blitzes in Eiche.

## 2 Ortung von Blitzströmen mit sehr hohen Scheitelwerten

### 2.1 Grundlagen der Blitzortung

Blitzortungssysteme ermitteln die maximale Stromstärke  $I_{max}$  einer Entladung aus dem Maximalwert  $E_{max}$  bzw.  $H_{max}$  des von den Ortungssensoren registrierten elektromagnetischen Feldes. Dabei wird ein linearer Zusammenhang nach Gl. (1) zugrunde gelegt.

$$I_{max} = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot c^2 \cdot D}{v_{RS}} \cdot E_{max} = K \cdot E_{max} \quad (1)$$

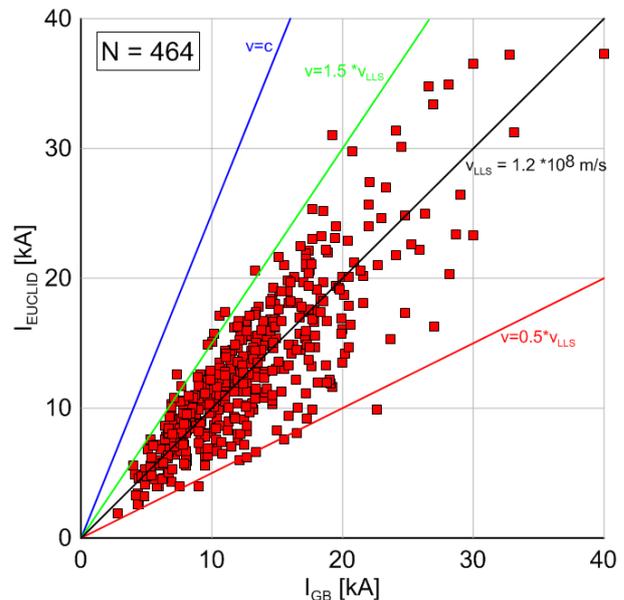
Die Konstante  $K$  kann entweder experimentell durch Messung bestimmt werden [4] oder aus dem sogenannten „Transmission Line“-Blitzmodell [5] abgeleitet werden; sie ist lediglich von der Geschwindigkeit  $v_{RS}$  der Hauptentladung abhängig, die in einem Bereich von  $1/3 - 2/3$  der Lichtgeschwindigkeit  $c$  variiert. Beim EUCLID-Ortungssystem [6] (deckt nahezu ganz Europa bis zur russischen Grenze ab) wird eine  $v_{RS} = 1,2 \cdot 10^8$  m/s angenommen und damit ergibt sich für die Referenzdistanz  $D = 100$  km die Konstante  $K = 5,12$ , wenn der Strom in kA und die Feldstärke in V/m angegeben sind.

Unter der Annahme einer unendlichen Bodenleitfähigkeit der Erde nimmt die Feldstärke  $E_{max}$  umgekehrt proportional mit der Entfernung  $D$  zum Blitzschlag ab. Die Ortungssensoren in verschiedenen Entfernungen vom Einschlagspunkt registrieren und melden daher unterschiedliche Feldstärken. Sobald der Ort des Blitzschlages vom Ortungssystem aber ermittelt wurde, ist die Entfernung  $D_i$  zu den einzelnen beteiligten Sensoren bekannt und die gemessene Feldstärke  $E_{i,gem}$  wird auf die Referenzdistanz von 100 km durch die einfache Beziehung

$$E_{i,100} = E_{i,gem} \cdot D_i / 100 \quad (2)$$

normiert. Im Idealfall sollten diese ermittelten Referenzfeldstärken  $E_{i,100}$  für alle Sensoren genau gleich sein. In der Realität gibt es Abweichungen z.B. auf Grund der nicht idealen Bodenleitfähigkeit oder wegen Messfehlern. Zur Minimierung dieser Fehler wird daher in Gl. (1) für  $E_p$  der Mittelwert aller verfügbaren Werte  $E_{i,100}$  eingesetzt.

Die Übereinstimmung der am Sender Gaisberg bei Salzburg gemessenen Blitzstromamplituden  $I_{GB}$  mit den zugehörigen Blitzstromamplituden  $I_{EUCLID}$ , die das EUCLID-Ortungssystem gemeldet hat, zeigt **Bild 4**.



**Bild 4** Gegenüberstellung von direkt gemessenen und georteten Blitzstromamplituden am Sender Gaisberg (2005 – 2014). Die Linien repräsentieren den theoretischen Zusammenhang nach dem Transmission Line-Modell für verschiedene Geschwindigkeiten  $v_{RS}$  der Hauptentladung [6].

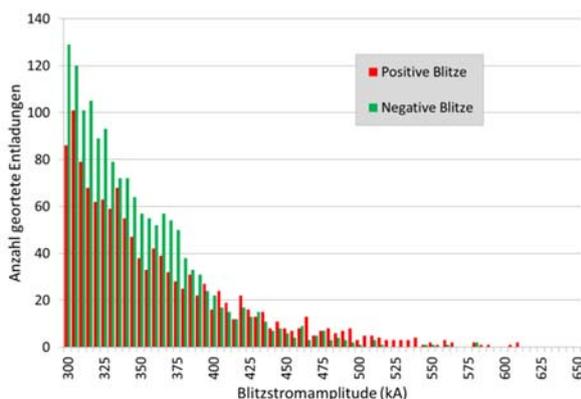
Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten  $v_{RS}$  der Hauptentladung bei den einzelnen Blitzen führen zur beobachteten Streuung der georteten Amplitudenwerte, da das Ortungssystem ja eine konstante Geschwindigkeit  $v_{RS} = 1,2 \cdot 10^8$  m/s annimmt. Ermittelt man eine Regressionsgerade für den gezeigten Datensatz, so deckt sich diese nahezu perfekt mit der schwarzen diagonalen Linie in Bild 4, und dies bestätigt, dass die Amplituden vom Ortungssystem im Mittel sehr gut bestimmt werden. Ähnliche Er-

gebnisse lieferten Vergleiche der Amplituden von mit Raketen getriggerten Blitzen und den NLDN (US National Lightning Detection Network) Daten in den USA [7].

Es ist hier anzumerken, dass derartige Validierungen der Amplitudenbestimmung von Blitzen mit Blitzortungssystemen bis dato nur für negative Blitzstromamplituden kleiner als 40 kA vorliegen. Es wird allgemein angenommen, dass der beschriebene lineare Zusammenhang nach (1) auch für positive Entladungen und den gesamten Amplitudenbereich bis zu mehrere 100 kA gilt.

## 2.2 EUCLID-geortete Blitze mit Amplituden größer als 300 kA

Die Häufigkeitsverteilung von georteten Blitzen mit errechneten großen Amplituden (>300 kA) zeigt **Bild 5**, wobei über einen Zeitraum von 2014 - 2016 in einem geographischen Bereich von 0°- 20° Ost und 40°- 60° Nord ausgewertet wurde. Um möglichst sicher zu sein, dass die stromstarken Entladungen nicht durch zufällige Ortungsfehler verursacht sind, wurden bei der Auswertung nur Blitze berücksichtigt, die von mehr als 10 Sensoren geortet wurden.



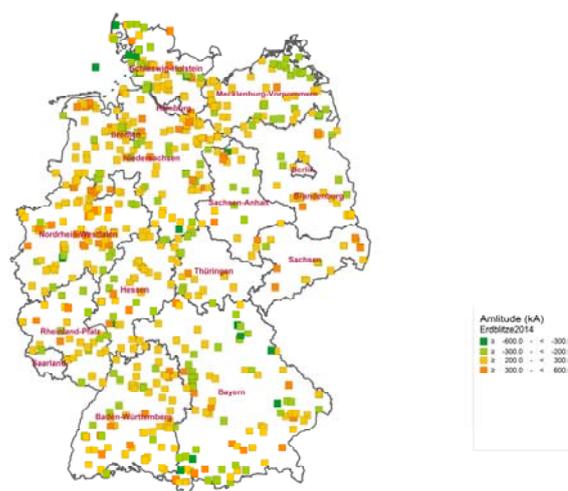
**Bild 5** Histogramm der von EUCLID georteten Blitze mit Amplituden >300 kA im Bereich 0°- 20° Ost u. 40° - 60° Nord in den Jahren 2014 – 2016.

Mit insgesamt 1.973.704 positiven und 16.110.975 negativen Blitzen im ausgewerteten Orts- und Zeitbereich machen die 1.204 positiven bzw. 1.439 negativen Entladungen mit Amplituden >300 kA einen sehr geringen Anteil von 0,061 % (positiv) bzw. 0,009 % (negativ) aus. Interessant ist, dass die Anzahl der georteten Entladungen mit diesen extremen Amplituden für beide Polaritäten nahezu gleich ist, obwohl generell negative Blitze deutlich häufiger auftreten als positive Entladungen.

**Bild 6** zeigt die unter den oben beschriebenen Bedingungen ermittelte Statistik für Blitzströme >300kA für Deutschland im Jahr 2014. Eine Ausweitung dieser Analyse auf ganz Europa unter besonderer Berücksichtigung der Blitzdichte in Küstennähe ist der Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass bei der Ermittlung der Amplituden aus den elektromagnetischen Felddaten im Einzelfall (nicht im Mittel!) eine nicht zu vernachlässigende Unsicherheit existiert. Dies wird

auch bei genauer Betrachtung von Bild 4 offensichtlich: So wurden z.B. für einen gemessenen Blitzstrom von 20 kA durch EUCLID Amplituden von 10 kA bis über 30 kA berechnet, je nach Annahme der Geschwindigkeit  $v_{RS}$ . Geht man z.B. konservativ von einem Unsicherheitsfaktor 2 aus, der im Einzelfall bei einer Modellrechnung nach EUCLID auftreten kann, würde ein extremer Blitzstrom von realen 300 kA Scheitelwert nach EUCLID Werte zwischen 150 kA und 600 kA ergeben können. Der untere Wert würde bei einer detaillierten Analyse als nicht auffällig klassifiziert werden und daher nicht weiter betrachtet. Der obere Wert dagegen würde die Einzelfall-Statistik, also die Festlegung eines „oberen Grenzwertes“ für natürliche Blitze massiv verändern; er ist aber ja nur Ergebnis einer stark abweichenden Geschwindigkeit der Hauptentladung  $v_{RS}$  des Einzelfalls vom angenommenen Mittelwert und keine reale Messung.



**Bild 6** Geografische Verteilung der Blitze >300 kA für Deutschland in 2014.

## 3 Blitzstromparameter aus Messungen

### 3.1 Festlegungen nach IEC und CIGRE

Trifft ein Blitzschlag ein Gebäude, kommen hohe Blitzströme zum Fließen. Eine Blitzentladung kann dabei als nahezu ideale Stromquelle betrachtet werden. Die ursächliche Schadensquelle für Schäden bei Blitzeinschlägen in eine bauliche Anlage oder auch andere Objekte ist der Blitzstrom [8]. Daher stellt der Blitzstrom die primäre Bedrohung dar, nach der sich sämtliche Schutzmaßnahmen der Blitzschutznormen DIN EN 62305 Ed.2:2011 richten [9]. Der gesamte Blitzstrom kann dabei in einzelne Blitzstrom-Komponenten unterteilt werden:

- Erster positiver Blitzstrom;
- Erster negativer Blitzstrom;
- Folgestoßstrom;
- Langzeitstrom.

Für einen wirksamen Blitzschutz sind die thermischen und mechanischen Wirkungen des Blitzstromes und die thermische und elektrische Funkenbildung verursacht durch den

Stoßstrom einer Blitzentladung zu berücksichtigen. Für die Blitzschutztechnik sind dabei folgende Wirkungsparameter des Blitzstromes von Bedeutung:

- Scheitelwert des Stromes  $I$ ;
- Ladung  $Q = \int i dt$ ;
- Spezifische Energie  $W/R = \int i^2 dt$ ;
- Maximale Stromsteilheit  $(di/dt)_{max}$ .

Abhängig vom Entladungsmechanismus lassen sich zwei grundlegende Arten von Erdblitzen unterscheiden:

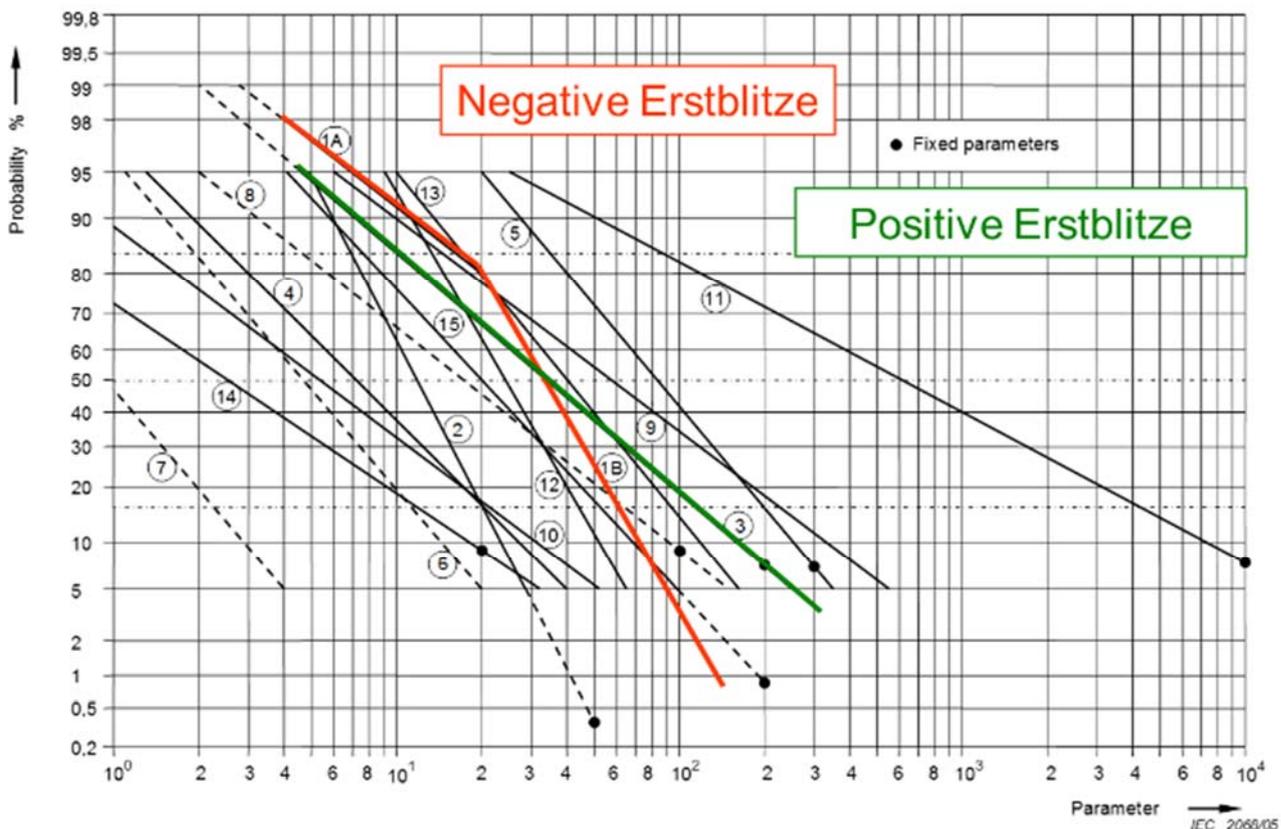
- Abwärtsblitze (Wolke-Erde-Blitze): Die Blitzentladung wird durch einen abwärts gerichteten Leitblitz eingeleitet.
- Aufwärtsblitze (Erde-Wolke-Blitz): Die Leitblitze entwickeln sich von sehr exponierten Objekten an der Erdoberfläche (Türme, Hochhäuser, WKA, etc.) in Richtung Wolke.

Bei der Festlegung der Blitzstromparameter ist zu beachten, dass im flachen Gelände und bei niedrigen baulichen Anlagen nahezu nur Abwärtsblitze auftreten.

**Bild 7** gibt die der internationalen Blitzschutznormung bei IEC (International Electrotechnical Commission) zugrundeliegenden und in DIN EN 62305-1 Ed.2:2011 dargestellten statistischen Verteilungen aller relevanten Blitzstrom-Wirkungsparameter wieder [8, 9]. Hervorgehoben dargestellt sind die Verteilungen der Scheitelwerte für positive und negative Erstblitze; dafür gilt auf der x-Achse die Einheit [kA].

Diese statischen Verteilungen beruhen auf den sogenannten CIGRE-Parametern. CIGRE (franz.: Conseil International des Grands Réseaux Électriques = Internationales Forum für große elektrische Netze) empfiehlt in einer aktuellen Studie, diese Parameter zur Festlegung von Blitzen als Störquelle beizubehalten [10].

Die höchsten Maximalwerte treten bei den Stoßströmen von positiven Abwärtsblitzen auf. Die Wahrscheinlichkeit, dass bei positiven Abwärtsblitzen Stoßströme über 200 kA auftreten, liegt entsprechend der Daten von CIGRE bei etwa 7% [10]. In Abwesenheit von hohen baulichen Anlagen werden meistens positive Blitze durch einen positiv geladenen Abwärts-Leader ausgelöst.



**Bild 7** Häufigkeitsverteilung der Blitzstromparameter nach [8].

Die statistischen Verteilungen der einzelnen Blitzstromparameter können herangezogen werden, um unterschiedliche Gefährdungspegel (en: LPL = Lightning Protection Level) zu definieren. Dabei werden die Gefährdungspegel dazu verwendet, die Blitzeinwirkungen als Schadensquelle zu beschreiben. Für jeden Gefährdungspegel ist ein Satz der maximalen Parameterwerte (Dimensionierungskriterien) und der minimalen Parameterwerte (Einfangkriterien) des Blitzstroms festgelegt. Die maximalen Werte der Blitzstromparameter beeinflussen die Dimensionierung bzw.

Bemessung der Schutzmaßnahmen. Die minimalen Werte der Blitzstromparameter haben Einfluss auf die Anordnung der Fangeinrichtungen, um die direkten Blitzeinschläge auf die bauliche Anlage einzufangen. In der internationalen und nationalen Blitzschutznormung sind vier Gefährdungspegel (I, II, III, IV) festgelegt.

Ein Blitzschutzsystem kann in zwei Richtungen versagen:

- Die Dimensionierungs-Wirksamkeit (en: sizing efficiency) dokumentiert, dass Komponenten des Blitz-

schutzsystems bei Überschreiten bestimmter Wirkungsparameter von Blitzströmen diesen nicht mehr standhalten können, also zerstört werden. Dies geschieht bei sehr hohen Blitzstromparametern.

- Die Einfang-Wirksamkeit (en: interception efficiency) drückt aus, dass ein Blitzschutzsystem einen bestimmten Prozentsatz natürlicher Blitzentladungen nicht mehr einfängt. Dies ist in [8] vereinfacht mit dem Unterschreiten bestimmter, „kleinster“ Blitzstrom-Scheitelwerte festgeschrieben. Die Einfang-Wirksamkeit bezieht sich dabei natürlich nur auf die Fangeinrichtungen eines Blitzschutzsystems.

Die maximalen Werte der Blitzstromparameter für den ersten positiven Stoßstrom sind in **Tabelle 1** angegeben. Sie werden verwendet, um Blitzschutzkomponenten zu dimensionieren (z. B. Leiterquerschnitte, Stromtragfähigkeit von Überspannungsschutzgeräten) und um die Prüfparameter zur Simulation von Blitzwirkungen auf solche Komponenten zu definieren. Werden die festgelegten Parameterwerte überschritten, ist nicht mehr sichergestellt, dass die Blitzschutzkomponenten den Belastungen schadensfrei standhalten.

Für den Gefährdungspegel I werden die festgelegten Maximalwerte (siehe auch Bild 7) mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % nicht überschritten. Dabei wird unterstellt, dass von Wolke-Erde-Blitzen 10 % positive und 90 % negative Polarität aufweisen. Dieses Polaritätsverhältnis ist abhängig von der geografischen Lage. Liegen keine weiteren detaillierten Daten vor, so soll dieses Verhältnis herangezogen werden. Damit müssen die von den positiven Blitzen genommenen Werte eine Wahrscheinlichkeit unter 10% und die von negativen Blitzen von unter 1% besitzen. Die sich ergebenden Werte (z.B. die o.g. 7% für den positiven Stoßstrom) werden dabei jeweils konservativ „aufgerundet“.

Die Maximalwerte werden für den Gefährdungspegel II auf 75% verringert und für die Gefährdungspegel III und IV auf 50% (linear für  $I$ ,  $Q$  und  $(di/dt)_{max}$ , jedoch quadratisch für  $W/R$ ).

**Tabelle 1** Prüfparameter für ersten positiven Stoßstrom für Gefährdungspegel I nach [8] mit Toleranzen für die Prüfung von Blitzschutzkomponenten.

Prüfparameter	Einheit	LPL I	Grenzabweichung
Scheitelwert des Stromes I	kA	200	± 10 %
Ladung $Q_{short}$	C	100	± 20 %
Spezifische Energie $W/R$	MJ/Ω	10	± 35 %

### 3.2 Blitze mit Parametern oberhalb der normten Blitzstromparameter

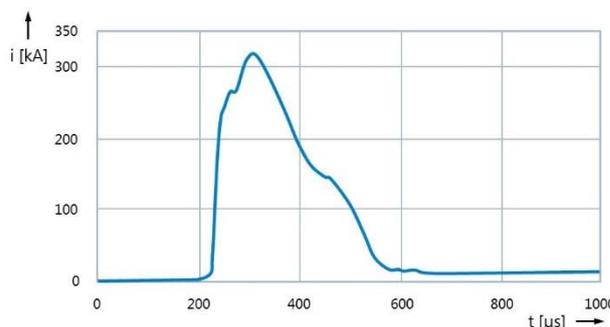
Im Folgenden werden Untersuchungen und Überlegungen zu extremen Blitzen dargestellt, die über die Festlegungen nach [4] hinausgehen. Den am meisten konservativen

Blick auf die Störgröße Blitz haben über die letzten Jahrzehnte stets die kerntechnischen Anlagen aufgewiesen, muss bei Ihnen doch auch beim Einschlag extremer Blitze ein Versagen von Sicherheitseinrichtungen sicher ausgeschlossen werden können.

Die aktuelle Blitzbeschreibung für deutsche KKW ergibt sich aus KTA 2206:2009, Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 [11]. Diese Blitzeinwirkung entspricht der aktuellen Festlegung in der internationalen Blitzschutznormung, Gefährdungspegel I nach DIN EN 62305-1 Ed.2:2011 [8], und somit den Werten gemäß Tabelle 1.

In KTA 2206:1992 [12] war dagegen noch ein Blitzstromscheitelwert von 500 kA enthalten. Dieser entstammte offensichtlich einerseits einer Reaktion auf eine polnische Veröffentlichung über eine Messung eines Blitzstroms mit über 400 kA Scheitelwert, die jedoch nachträglich stark angezweifelt wurde und niemals auch nur annähernd verifiziert werden konnte. Andererseits gab es wohl Diskussionsbeiträge von Prof. Lundquist, Schweden und Herrn Neuhaus, Deutschland zu einer „natürlichen Obergrenze“ für Blitzstromscheitelwerte, die auf den genannten Wert angesetzt wurde.

In der schweizerischen Regel für KKW wurde dagegen für einen von drei Auslegungsblitzen ein Blitzstromscheitelwert von 300 kA festgelegt [13]. Dieser Wert kann wohl weitestgehend auf einen weiteren Diskussionsbeitrag, nun von Prof. Berger, Schweiz (auf den die o.g. CIGRE-Parameter auch zum großen Teil zurückgehen), wieder zu einer „natürlichen Obergrenze“ für Blitzstromscheitelwerte, zurückgeführt werden. Prof. Berger hat also diese „natürliche Obergrenze“ niedriger eingeschätzt, wohl auch unter Berücksichtigung der geografischen Gegebenheiten in der Schweiz. Weitere Details zu diesen historisch festgelegten „natürlichen Obergrenzen“ liegen den Autoren nicht vor. Die höchsten direkt gemessenen Ströme fand man bei positiven Blitzen mit einem Ladungstransfer von einigen 100 C bei Wintergewittern in Japan. **Bild 8** zeigt einen dort an einem Turm gemessenen positiven Blitzstrom von ca. 320 kA, bisher der weltweit höchste gemessene Blitzstrom-Scheitelwert [14].



**Bild 8** Beispiel für einen Blitzstrom mit >300kA nach Goto et.al. [14].

Die aktuelle CIGRE-Studie [10] fasst unter anderem alle weltweit durchgeführten Blitzmessungen zusammen. Dabei wurde bei direkten Blitzmessungen noch niemals ein Scheitelwert >300 kA<sup>1)</sup> für positive Blitze nachweisbar dokumentiert bzw. festgestellt, bei negativen Blitzen liegt der

Maximalwert bei  $<200$  kA. Grundsätzlich wurde in der Studie bestätigt, dass ca. 90% der Blitze negativ sind, ca. 10% positiv.

- 1) Die Diskrepanz zu der in Bild 8 dargestellten Messung mit einem Scheitelwert von ca. 320 kA ist wohl begründet in den Zweifeln der CIGRE-Arbeitsgruppe an einer fehlerfreien Messung von Goto et.al. CIGRE publiziert stets und nach wie vor den Wert  $<300$  kA als maximal gemessen. Der Unterschied erscheint aber nicht zu wesentlich.

Die gemessenen Werte von positiven Blitzentladungen mit Scheitelwerten bis zu ca. 300 kA wurden insbesondere bei Wintergewittern in Japan registriert. Hierbei scheint es sich um regionale meteorologische Besonderheiten zu handeln, die nun auch dazu führen, dass die Blitzstrombelastungen für Windkraftanlagen in einer nationalen japanischen Blitzschutznorm höher angesetzt werden sollen (wohl 282 kA). In anderen Ländern oder auch bei IEC ist an eine Erhöhung dieses Parameterwertes nicht gedacht.

Die CIGRE-Statistik zu den Scheitelwerten von positiven Blitzen [8] beruht auf nur 26 von Prof. Berger vermessenen Blitzentladungen [10]. Eine Extrapolation dieses grundsätzlich als logarithmisch normalverteilt angenommenen Parameters außerhalb des gemessenen Wertebereichs verbietet sich deshalb aus Gründen der statistischen Unsicherheit; möchte man auf Basis der vorhandenen Daten Eintrittswahrscheinlichkeiten von 1% oder noch geringer für positive Blitzentladungen ermitteln, erhält man schnell blitzphysikalisch absurde Werte von  $>500$  kA ... 1000 kA. Eine theoretische Studie [15] zu oberen und unteren Grenzwerten von Blitzströmen ergibt für negative Blitze Maximalwerte für den Scheitelwert von 450 - 500 kA in den Tropen und ca. 300 kA in gemäßigten Breiten. Dabei werden für die blitzphysikalischen Grundlagen (Raumladungsdichte, elektrische Festigkeit der Luft, etc.) die jeweils günstigsten bzw. ungünstigsten Voraussetzungen und Werte angesetzt und daraus der Scheitelwert theoretisch ermittelt. Auch wenn sich diese Studie nur auf negative Blitzentladungen bezieht, kann damit doch ein glaubhafter theoretischer Grenzwert angegeben werden.

In den Jahren 2013 – 2016 hat sich auch die deutsche Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) mit der Thematik extremer Blitze befasst. Unter Würdigung aller vorliegenden Messungen, Untersuchungen und Überlegungen hat man folgende Feststellungen für Berechnungen getroffen:

- ein Prozentsatz von ca. 1% der natürlichen Blitzentladungen hat einen Scheitelwert von 200 kA und darüber;
- als realistische natürliche Obergrenze in gemäßigten Breiten wird für den Scheitelwert 300 kA angesetzt. Höhere Werte können ausgeschlossen werden.

### 3.3 Ausblick – Einsatz von kommerziellen Blitzstrom-Messsystemen

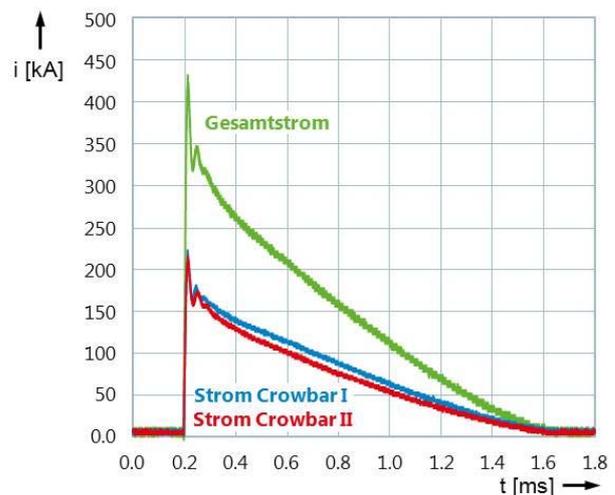
Besonders im Bereich Windkraftanlagen werden zunehmend kommerzielle Blitzstrom-Messsysteme eingesetzt [18]. Solche Blitzstrom-Messsysteme sollen auch Blitzströme mit einer maximalen Amplitude von mindestens 200 kA aufzeichnen können [19]. Aufgrund der damit deutlich ansteigenden Anzahl von Messeinrichtungen und der damit zu erwartenden größeren Datenbasis sollte es zu-

künftig möglich sein, die Genauigkeit von Blitzortungssystemen bei der Erfassung von Blitzströmen mit sehr hohen Amplituden besser zu verifizieren.

## 4 Blitzschutz mit Maximalwerten über Gefährdungspegel LPL I



**Bild 9** Tandem-Stoßstromgenerator für einen Blitzstrom bis 400 kA, 10/350 µs.



**Bild 10** Stoßstromverläufe eines Tandem-Stoßstromgenerators für einen Blitzstrom bis 400 kA, 10/350 µs.

In der 2011 aktualisierten 2. Ausgabe der Blitzschutznormen [8] wurde ein zusätzlicher Hinweis aufgenommen, wie bei der Planung der Blitzschutzmaßnahmen vorgegangen werden soll, falls die Maximal- und Minimalwerte der Blitzstromparameter diejenigen für den Gefährdungspegel LPL I überschreiten. Bei den gültigen Blitzschutzvorschriften wird nun ausgeführt, dass der Schutz gegen Blitzeinschlag, bei dem die Maximal- und Minimalwerte der Blitzstromparameter die normativ beschriebenen Parameter für den Gefährdungspegel LPL I überschreiten, noch „wirksamere Maßnahmen“ erfordern. Solche „wirksameren Maßnahmen“ sollen auf individueller Basis ausgewählt und ausgeführt werden. Beispielsweise werden Blitzschutzsysteme für Gebäude im Nuklearbereich für Blitzströme bis 300 kA, 10/350µs ausgelegt [13, 16]. Solche

Schutzprinzipien bedürfen jedoch einer individuellen Betrachtung. Blitzstromtests mit Stoßströmen, die den Gefährdungspegel I, also 200 kA, 10/350µs für den ersten positiven Stoßstrom, überschreiten, eröffnen also die Möglichkeit, solche individuellen Betrachtungen für besondere Anwendungen anzustellen. Für solche Analysen ist eine entsprechend leistungsfähige Prüfanlage zur Simulation solcher extrem hohen Blitzströme notwendig [17]. Die **Bilder 9 und 10** zeigen den Aufbau und die Blitzstromverläufe eines Blitzstoßstromgenerators bis 400 kA, 10/350µs.

## 5 Zusammenfassung

- Blitzströme >200 kA wurden direkt gemessen und können auftreten.
- Blitzströme >300 kA werden manchmal zitiert, wurden aber noch nicht direkt gemessen, sondern sind stets Berechnungen aus den Daten von Blitzortungssystemen.
- Die Bestimmung von Blitzströmen >200 kA durch Blitzortungssysteme ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet, da die dabei zu Grunde gelegten Modelle bzw. Korrelationen zwischen dem gemessenen Feldmaximum und dem daraus abgeleiteten Strommaximum bei diesen extremen Werten nicht notwendigerweise stimmen müssen. Eine Validierung dieser Zusammenhänge liegt derzeit nur bis ca. 40 kA vor und kann auch immer nur im Mittel gelingen, niemals aber für ein einzelnes Ereignis.
- Es ist allerdings davon auszugehen, dass sehr hohe Feldimpulse, die von einer Fülle von Sensoren über ganz Europa gleichzeitig registriert werden, nur von einer Blitzentladung mit entsprechend hoher Stromamplitude herrühren können.
- Blitzströme >300 kA sind daher zwar nicht gänzlich auszuschließen, lassen sich allerdings mit hoher Wahrscheinlichkeit durch die Toleranzen bei der Bestimmung der Stromamplituden aus den elektromagnetischen Felddaten im Einzelfall erklären. Wichtigster Einflußparameter dabei ist die Geschwindigkeit der Hauptentladung  $v_{RS}$ , die im Berechnungsmodell als konstant angenommen werden muss, bei realen Blitzentladungen aber variable Geschwindigkeiten im Verhältnis 2:1 beobachtet wurden.
- Blitzschutzsysteme für eine Blitzstromamplitude >200 kA können entsprechend DIN EN 62305 geplant werden, bedürfen jedoch einer individuellen Betrachtung – beispielsweise entsprechender Blitzstromprüfungen.

## 6 Literatur

- [1] <http://www.derwesten.de/staedte/essen/mega-blitz-in-essen-stadtwald-elektrisiert-experten-id11778676.html>
- [2] [www.dehn.de](http://www.dehn.de)
- [3] F. Heidler, G. Diendorfer, W. Zischank: Examples of severe destruction of trees caused by lightning in Proc. 27<sup>th</sup> ICLP, Avignon, France, 2004
- [4] “Cloud-to-Ground Lightning Parameters Derived from Lightning Location Systems - The Effects of System Performance,” CIGRE Report 376, 2010.
- [5] M. A. Uman, D. K. McLain, and E. P. Krider, “The Electromagnetic Radiation from a Finite Antenna,” Am. J. Phys., vol. 48, no. January, 1975.
- [6] W. Schulz, G. Diendorfer, S. Pedebay, and D. R. Poelman, “The European lightning location system EUCLID - Part 1: Performance analysis and validation,” Nat. Hazards Earth Syst. Sci., vol. 16, no. 2, pp. 595–605, 2016.
- [7] S. Mallick, V.A. Rakov, J.D. Hill, T. Ngin, S. Mallick, V. A. Rakov, J. D. Hill, T. Ngin, W. R. Gameraota, J. T. Pilkey, C. J. Biagi, D.M. Jordan, M. A. Uman, J. A. Cramer, and A. Nag, “Performance characteristics of the NLDN for return strokes and pulses superimposed on steady currents, based on rocket-triggered lightning data acquired in Florida in 2004–2012,” Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(7), 3825-3856, 2014.
- [8] DIN EN 62305-1 Ed.2:2011-10: Blitzschutz - Teil 1: Allgemeine Grundlagen.
- [9] F. Heidler „Blitzstromparameter nach IEC 62305 – Hintergrund, Erfahrung und Ausblick“, etz Heft 1/2009.
- [10] CIGRE WG C4.407: Lightning parameters for engineering applications. Report No. 549, August 2013. IISBN 978-2-85873-244-9.
- [11] KTA 2206:2009-11: Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen.
- [12] KTA 2206:1992-06: Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen.
- [13] ENSI-G02, Teil 1: Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen - Auslegungsgrundsätze für in Betrieb stehende Kernkraftwerke: Sicherheitskonzepte und Auslegungsanforderungen. September 2016.
- [14] Y. Goto, K. Narita, H. Komuro, and N. Honma, “Current waveform measurement of winter lightning struck an isolated tower”, 20th International Conference on Lightning Protection ICLP, Interlaken, 1990.
- [15] V. Cooray, R. Rakov: On the upper and lower limits of peak current of first return strokes in negative lightning flashes. Atmospheric research, 2011.
- [16] A. Rousseau, N. Peyrus, Lightning Protection System taking into account currents greater than IEC 62305 standardized values; ILPS 2016 - International Lightning Protection Symposium April 21-22, 2016 Porto – Portugal
- [17] J. Birkl and P. Zahlmann, “Extremely high lightning currents - a newly designed surge generator and some practical applications”, in Proc. 32<sup>nd</sup> ICLP, Shanghai, China, 2014
- [18] IEC 61400-24: Wind turbines – Part 24: Lightning protection
- [19] J. Birkl,, G. Diendorfer, F. Heidler, E. Shulzenko, „Measuring lightning currents on wind turbines”, in 4<sup>th</sup> International Symposium on Winter Lightning (ISWL2017)