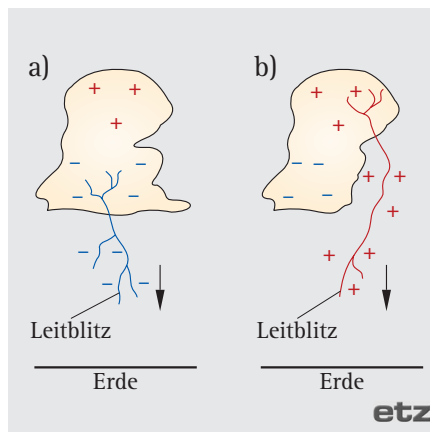


# Blitzstromparameter nach IEC 62305 – Hintergrund, Erfahrung und Ausblick

**Die Maßnahmen zum Blitzschutz sind in der internationalen Normung in der Normenreihe IEC 62305 niedergelegt. Unmittelbar nach ihrem Erscheinen zu Beginn des Jahres 2006 wurde die Normenreihe in die europäische und deutsche Normung übernommen. Die deutsche Fassung trägt die Bezeichnung DIN EN 62305 (VDE 0185-305). Untersuchungen haben ergeben, dass von den Blitzströmen die größte Gefahr ausgeht. Daher stellt der Blitzstrom die primäre Bedrohung dar, nach der sich sämtliche Schutzmaßnahmen in der Normenreihe IEC 62305 richten. Die der Normung zugrunde liegenden Blitzstromparameter basieren auf den langjährigen Messungen von Prof. Karl Berger an zwei Fernmeldetürmen auf dem Berg San Salvatore in der Schweiz.**

Die ersten systematischen Messungen des Blitzstroms erfolgten mit sog. Magnetstäbchen. Die Magnetstäbchen bestanden aus kleinen Bündeln paralleler Stahl-drähte, die an den Ableitungen installiert wurden. Bei einem Blitzschlag wurden die Magnetstäbchen vom Magnetfeld des Blitzstroms durchsetzt und dabei magnetisiert. Aus dem verbleibenden Restmagnetismus wurde dann das Maximum des Blitzstroms und die Stromrichtung bestimmt [1]. Da die Magnetstäbchen relativ kostengünstig waren, wurden vor allem zu Beginn der 1930er-Jahre Zehntausende davon an Hochspannungsleitungen in Deutschland eingebaut [2, 3]. Ähnliche Experimente wurden auch in anderen europäischen Ländern wie der damaligen Tschechoslowakei [4] durchgeführt.

Nachteilig an dieser Methode war, dass nur das Maximum des Blitzstroms gemessen wurde. Die Aufzeichnung des zeitlichen Stromverlaufs war erst möglich, als Speicheroszilloskope eingesetzt wurden. *Karl B. McEachron* war der erste, der die Blitzströme mit dieser Methode am Empire State Building in New



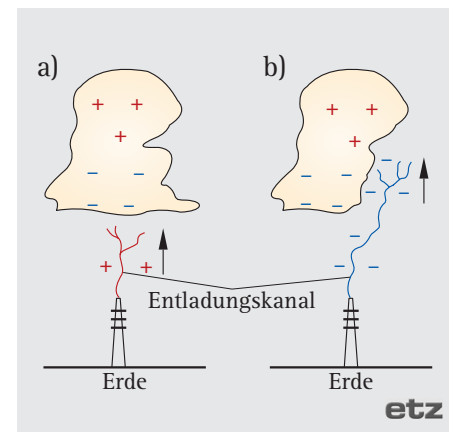
**Bild 1.** Arten der Wolke-Erde-Blitze – a) negativer Abwärtsblitz, b) positiver Aufwärtsblitz

York/USA in den 1930er-Jahren aufgezeichnete [5]. Bekannt sind auch die oszillografischen Aufzeichnungen von *Emilio Garbagnati* und *Giovanni Battista Lo Piparo*, die die Blitzströme in zwei Messstationen bei Foglio und am Monte Orso in Italien [6] über einen Zeitraum von ungefähr zehn Jahren gemessen haben.

Bei der Mehrzahl der Blitzschläge in hohe Türme handelt es sich um Aufwärtsblitze. Die Aufwärtsblitze ereignen sich vorwiegend im Winter, wenn die Gewitterwolkenbasis aufgrund der geringen Temperatur niedrig ist und sich die elektrisch geladene Gewitterwolke unmittelbar über der Turmspitze befindet. Das elektrische Feld ist dann an der Turmspitze so hoch, dass von dort eine aufwärts gerichtete Blitzentladung aus-

Fridolin Heidler

gehen kann. Derartige Aufwärtsblitze wurden an Fernmeldetürmen auf dem Peißenberg in Deutschland [7], dem Gaisberg in Österreich [8], dem St. Chrischona in der Schweiz [9] und am CN-Tower (Canadian National Tower) in Kanada [10] gemessen. Aus Messungen in Japan weiß man, dass gerade die Wintergewitter sehr ladungsstarke Blitze hervorbringen können [11, 12]. Bei sehr hohen Türmen, wie dem 540 m hohen Ostankino-Turm in Moskau/Russland, wurde weiterhin festgestellt, dass Blitze auch weit unterhalb



**Bild 2.** Arten der Erde-Wolke-Blitze – a) negativer Aufwärtsblitz, b) positiver Aufwärtsblitz

der Turmspitze einschlagen können [13, 14].

Da sich die Anzahl der Blitzschläge selbst bei sehr hohen Bauwerken auf einige Ereignisse pro Jahr beschränkt [15], setzt man Raketen ein, um Blitzentladungen künstlich herbeizuführen. Die Rakete zieht einen metallenen Draht nach oben und errichtet so kurzzeitig eine turmartige Struktur, an deren Spitze Aufwärtsblitze ausgelöst werden. *Morris M. Newman* hat als erster solche Experimente durchgeführt, als er im Jahr 1962 an der Küste von Florida/USA von einem Boot aus Raketen startete [16]. Zwischenzeitlich wurden diese Untersuchungen von mehreren Forschungsgruppen, z. B. in Japan [17], Frankreich [18] und den USA [19, 20] wiederholt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein raketengestützter Auf-

Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Fridolin Heidler (53) befasst sich am Institut für elektrische Energieversorgung der Universität der Bundeswehr mit Blitzforschung und Blitzschutztechnik.

E-Mail: [fridolin.heidler@unibw.de](mailto:fridolin.heidler@unibw.de)





wärtsblitz ähnliche Stromkomponenten aufweist wie ein normaler Aufwärtsblitz.

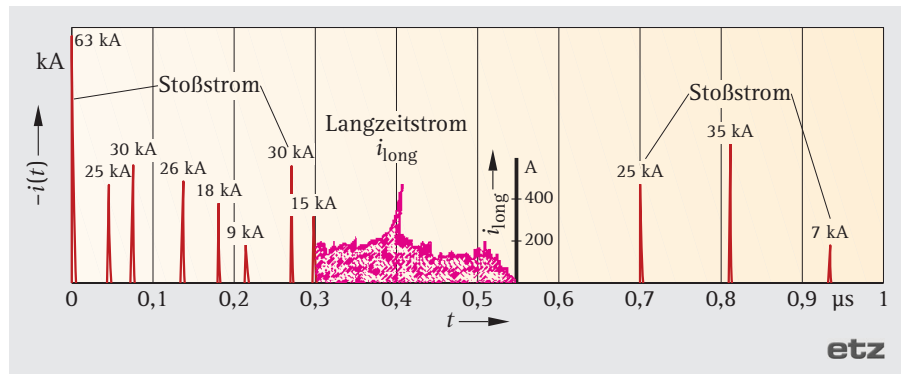
Die wichtigsten Daten über die Blitzströme stammen jedoch von den Experimenten von *K. Berger*, der die Blitzströme von 1943 bis 1971 an zwei Femmeldtürmen auf dem Berg San Salvatore in der Schweiz gemessen hat. Insgesamt konnten die Ströme von mehr als 1000 Aufwärts- und mehr als 200 Abwärtsblitzen erfolgreich während dieser langen Messperiode aufgezeichnet werden [21–26]. Bis heute sind die in [21] und [26] veröffentlichten Ergebnisse die Grundlage für die Blitzschutz-Normenreihe IEC 62305.

## Erdblitze

Die meisten Blitzentladungen ereignen sich innerhalb einer Gewitterwolke. Da diese Wolkeblitze lediglich geringe Störungen verursachen, sind nur die Blitze zur Erde für den Schutz baulicher Anlagen bedeutsam. **Bildern 1 u. 2** zeigen die Arten der Erdblitze, wobei nach dem auslösenden Entladungsvorgang zwischen Abwärts- und Aufwärtsblitzen unterschieden wird. Die Abwärts- und Aufwärtsblitze werden weiterhin nach positiven und negativen Blitzen unterteilt. Ist die Polarität der zur Erde abgeführten Ladung positiv, handelt es sich um einen positiven Blitz, bei negativer Ladung um einen negativen Blitz.

## Der Abwärtsblitz

Niedrige bauliche Anlagen bis etwa 100 m Höhe werden fast ausschließlich von Abwärtsblitzen getroffen. Der Abwärtsblitz beginnt mit einer zur Erde hinab gerichteten Entladung, die Leitblitz genannt wird. Wie aus den **Bild 1a u. 1b** hervorgeht, entwickelt sich der Leitblitz beim negativen Abwärtsblitz aus dem unteren negativen Wolkenladungszentrum und beim positiven Abwärtsblitz aus dem oberen positiven Ladungszentrum der Gewitterwolke. Aufgrund der zur Erde



**Bild 4.** Strom eines multiplen negativen Abwärtsblitzes mit elf Stoßströmen und einem Langzeitstrom

gerichteten Entladung wird dieser Blitztyp als Abwärtsblitz oder Wolke–Erde-Blitz bezeichnet. Etwa 90 % der Wolke–Erde-Blitze sind negative Abwärtsblitze und nur etwa 10 % sind positive Abwärtsblitze.

Erreicht der Leitblitz die Erde, kommt es zum Blitzeinschlag. Bei dieser sog. Hauptentladung wird die im Leitblitz gespeicherte Ladung zur Erde abgeführt und es fließt ein impulsförmiger Stoßstrom über bzw. durch das getroffene Objekt. Wenn sich die Entladungsvorgänge wiederholen, entstehen Folgeblitze, die in der Regel den vorionisierten Blitzkanal des Erstblitzes als Blitzbahn nutzen.

Haben die Blitze mehrere solcher Teilblitze, werden sie multiple Blitze genannt. Etwa drei Viertel der negativen Abwärtsblitze sind multiple Blitze, die neben dem Erstblitz im Durchschnitt ungefähr drei Folgeblitze aufweisen. Im Gegensatz hierzu haben die meisten positiven Abwärtsblitze nur einen Erstblitz ohne nachfolgenden Teilblitz.

**Bild 3** zeigt je ein Beispiel für den Stoßstrom eines positiven und eines negativen Erstblitzes. Die Maximalwerte liegen typischerweise im Bereich von einigen 10 kA, wobei vor allem die Stoßströme von positiven Blitzen auch sehr hohe Werte über 100 kA erreichen kön-

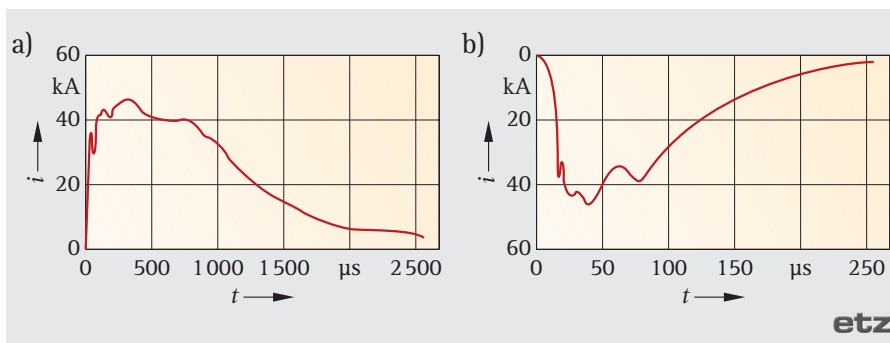
nen. Die Stoßströme steigen relativ rasch innerhalb von einigen 100 ns bis zu einigen 10 µs bis auf das Maximum an und fallen dann vergleichsweise langsam ab. Die Stoßströme der negativen Erstblitze dauern normalerweise einige 100 µs (Bild 3b), während Stoßströme der positiven Blitze deutlich länger bis über 2 ms fließen können (Bild 3a).

**Bild 4** zeigt den Strom eines multiplen negativen Abwärtsblitzes, bestehend aus elf Stoßströmen und einem Langzeitstrom. Ein Langzeitstrom erfolgt immer unmittelbar auf einen Stoßstrom, z. B. in Bild 4 nach dem achten Stoßstrom. Wie aus Bild 4 hervorgeht, sind die Maximalwerte der Stoßströme bei den Folgeblitzen deutlich kleiner als bei den Erstblitzen. Andererseits haben die Stoßströme der Folgeblitze wesentlich kürzere Anstiegszeiten und deshalb wesentlich höhere Stromsteilheiten als bei den Erstblitzen. Die Langzeitströme unterscheiden sich stark von den Stoßströmen, da sie viel niedrigere Stromamplituden im Bereich von einigen 100 A, jedoch eine viel längere Dauer von einigen 100 ms haben.

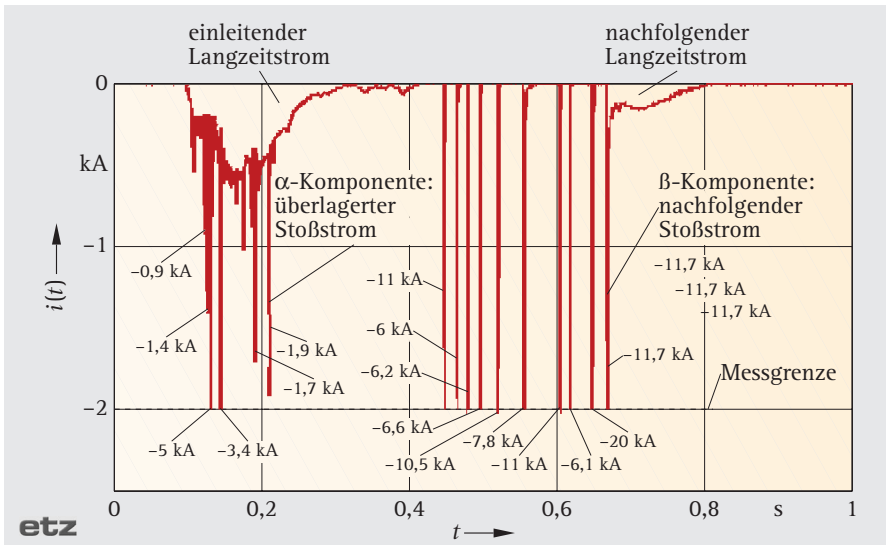
## Der Aufwärtsblitz

Aufwärtsblitze entstehen nur an hohen Objekten mit einer Mindesthöhe von 100 m. An der Spitze eines so hohen Gebäudes kann das elektrische Feld derart überhöht sein, dass die für das Auslösen einer Blitzentladung notwendige Feldstärke erreicht wird. Da sich der Entladungskanal von der Spitze des hohen Objekts zur Gewitterwolke empor entwickelt, wird dieser Blitztyp als Aufwärtsblitz oder Erde–Wolke-Blitz bezeichnet. Wie aus den **Bildern 2a u. 2b** hervorgeht, ist der Entladungskanal des negativen Aufwärtsblitzes positiv geladen, während er im Fall eines positiven Aufwärtsblitzes negativ geladen ist.

Während sich der Entladungskanal ausbildet, fließt ein einleitender Lang-



**Bild 3.** Stoßströme erster Teilblitze von a) positiven und b) negativen Abwärtsblitzen nach *K. Berger*



**Bild 5.** Strom eines negativen Aufwärtsblitzes am Peißenbergturm in Deutschland

zeitstrom über das getroffene Objekt. Bild 5 zeigt den Strom eines negativen Aufwärtsblitzes, der am Peißenbergturm in Deutschland gemessen wurde. Die  $\alpha$ -Komponenten, die den einleitenden Langzeitstrom überlagern, sind kurzzeitige Stoßströme mit relativ kleinen Amplituden bis zu einigen Kiloampere. Nach dem Abklingen des einleitenden Langzeitstroms können  $\beta$ -Komponenten folgen, die den Stoßströmen der Folgeblitze von Wolke-Erde-Blitzen sehr ähnlich sind. Wie aus Bild 5 hervorgeht, kann eine  $\beta$ -Komponente mit einem nachfolgenden Langzeitstrom ausklingen. Diese nachfolgenden Langzeitströme sind jedoch we-

sentlich ladungsärmer als die einleitenden Langzeitströme.

### Das Strommaximum von Abwärtsblitzen

Von den weltweiten Messungen der Blitzströme ist das Maximum des Blitzstroms der am gründlichsten untersuchte und deshalb am besten bekannte Parameter der Abwärtsblitze. Die Mittelwerte sind in Tabelle 1 u. 2 aufgelistet, wobei zwischen den Blitzströmen der positiven und negativen Erstblitze und den Blitzströmen der negativen Folgeblitze unterschieden wird. Der 50 %-Wert, der dem geometrischen Mittel entspricht, gibt an,

dass die Hälfte der Blitze ein größeres bzw. kleineres Strommaximum hat.

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich ist, haben sowohl die positiven als auch die negativen Erstblitze ein Strommaximum, das im Mittel etwa 30 kA beträgt. Am Peißenbergturm konnte bisher nur ein einziger negativer Abwärtsblitz aufgenommen werden, weshalb der Mittelwert nur sehr eingeschränkt aussagekräftig ist. Für die in Italien bei Foglio und am Monte Orso gemessenen fünf Ströme von positiven Erstblitzen ist nur der Schwankungsbereich von 30 kA bis 160 kA veröffentlicht [6].

Tabelle 2 enthält neben den Werten für die negativen Folgeblitze auch Werte für die sehr ähnlichen  $\beta$ -Komponenten der Aufwärtsblitze und für die ebenfalls sehr ähnlichen Blitzströme von Raketen getriggerten Blitzen. Die Mittelwerte variieren zwischen etwa 8 kA und 18 kA, wobei der höchste Mittelwert in Italien in den Messstationen bei Foglio und am Monte Orso gemessenen wurde. Bei diesen Messungen war allerdings eine eindeutige Unterscheidung zwischen Aufwärts- und Abwärtsblitzen nicht möglich.

Vergleicht man die Mittelwerte aus den einzelnen Messungen, fällt auf, dass die von K. Berger am Monte San Salvatore, Schweiz, ermittelten Strommaxima im mittleren Schwankungsbereich der Messergebnisse liegen. Dies ist der Grund, weshalb das International Council on Large Electric Systems (CIGRE, [30]) die am Monte San Salvatore gewonnenen

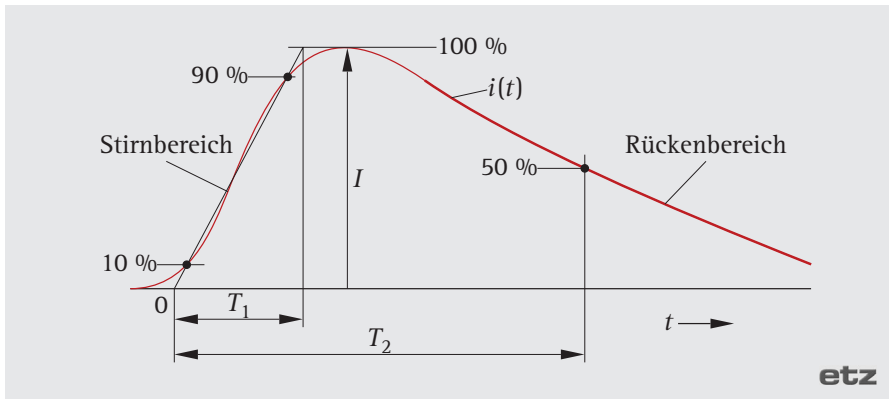
Ort und Land der Messung	Positiver Erstblitz		Negativer Erstblitz	
	Anzahl	50 %-Wert in kA	Anzahl	50 %-Wert in kA
Monte San Salvatore/Schweiz [21]	26	35	101	30
Freileitungsmasten, Deutschland [3]	28	23 <sup>1)</sup>	224	29 <sup>1)</sup>
25 m ... 140 m hohe Objekte, ehemalige Tschechoslowakei [4]	224	30	1 015	28 <sup>1)</sup>
Peißenbergturm, Deutschland [27]	–	–	1	(54)
Morro-do-Cachimbo-Station/Brasilien [28]	–	–	31	45,3
Südafrika [29]			29	43
Foligno und Monte Orsa/Italien [6]	5	(30 ... 160)	42	33

<sup>1)</sup> arithmetischer Mittelwert

**Tabelle 1.** Mittelwerte des Strommaximums von ersten Teilblitzen (Abwärtsblitze)

Ort und Land der Messung	Anzahl	50 %-Wert in kA	Anmerkungen
Monte San Salvatore/Schweiz [21]	135	12	Turmhöhe 70 m
Morro-do-Cachimbo-Station/Brasilien [28]	59	16,3	Masthöhe 60 m
Südafrika [29]	–	~8	Masthöhe 60 m
Camp Blanding, Florida/USA [19]	64	14,5	Raketen-triggerung
Peißenbergturm, Deutschland [27]	35	8,5	Turmhöhe 160 m, $\beta$ -Komponenten
Saint-Privat d'Allier/Frankreich [18]	54	9,8	getriggert Blitz
Florida/USA [18]	305	12,1	getriggert Blitz
Foligno und Monte Orsa/Italien [6]	33	18	Turmhöhe 40 m
Alabama/USA [20]	45	12	Raketen-triggerung

**Tabelle 2.** Mittelwerte des Strommaximums von negativen Folgeblitzen (Abwärtsblitze)



**Bild 6.** Definition des Stoßstroms mit  $T_1$  als Stirnzeit und  $T_2$  als Rückenhalbwertzeit

Daten als Referenzwerte zugrunde legt. Die Statistiken über die Blitzströme sind in [21] und [26] veröffentlicht. Sie bilden die weltweite Basis für die Blitzschutznormung.

### Blitzstrom und Blitzstromparameter

Blitzströme gefährden durch Stromkräfte, durch thermische Einwirkung so-

wie durch elektrische und magnetische Felder. Die Bedrohung lässt sich mit den folgenden vier Blitzstromparametern weitgehend quantifizieren:

- Scheitelwert des Stroms  $i_{\max}$ ,
- Ladung  $Q = \int i dt$ ,
- spezifische Energie  $W/R = \int i^2 dt$ ,
- max. Stromsteilheit  $(di/dt)_{\max}$ .

Das Strommaximum  $i_{\max}$  ist wichtig für die Planung der Erdungsanlage. Beim

Eintritt des Stroms in die Erde erzeugt der durch den Erdungswiderstand fließende Strom einen max. Spannungsfall, der vom Maximalwert des Stroms bestimmt ist. Die auftretenden Spannungen können zu Überschlügen führen, wenn metallene Leitungen ohne Potenzialausgleichsverbinding in ein Gebäude eingeführt werden.

Die Ladung  $Q$  ist verantwortlich für das Schmelzen des Metalls am Einschlagpunkt des Blitzes. Der Energieeintrag am Lichtbogenfußpunkt ergibt sich aus dem Anoden-/Kathoden-Spannungsfall multipliziert mit der Ladung  $Q$ .

Die spezifische Energie  $W/R$  ist verantwortlich für die mechanischen Kräfte und die Wärmeentwicklung, wenn der Blitzstrom durch Leitungen aus Metall fließt.

Elektronische Geräte sind normalerweise mit verschiedenen elektrischen Versorgungsleitungen, wie dem Strom- und dem Datenanschluss, verbunden. Je nach Installationsverlauf innerhalb der baulichen Anlage können diese Leitungen große Schleifen bilden. Die max. Strom-

steilheit  $(di/dt)_{\max}$  ist für die in offene Schleifen magnetisch induzierten Spannungen bestimmend.

## Die Stromkomponenten

Messungen haben gezeigt, dass die Stromparameter der Aufwärtsblitze nicht die Stromparameter von Abwärtsblitzen übersteigen. Da von den Aufwärtsblitzen keine zusätzliche Bedrohung ausgeht, beruhen die in der Norm IEC 62305-1:2006-01 [31] festgelegten Stromkomponenten ausschließlich auf den Strömen von Abwärtsblitzen. Um die Gefährdung durch die Blitzströme abzudecken, wurden folgende Stromkomponenten in der IEC 62305-1 festgelegt:

- erster Stoßstrom,
- Folgestoßstrom,
- Langzeitstrom.

Bild 6 zeigt die Definitionen für die Stoßströme. Die schnell ansteigende Stirn ist

durch die Stirnzeit  $T_1$  und das langsame Abklingen durch die Rückenhalbwertzeit  $T_2$  berücksichtigt.

Der erste Stoßstrom beruht auf den Stoßströmen der positiven und negativen Erstblitze. Hierbei sind die Stoßströme der positiven Blitze von entscheidender Bedeutung, da sie gegenüber den negativen Blitzen wesentlich höhere Strommaxima  $i_{\max}$ , wesentlich höhere Stoßladungen  $Q_{\text{short}}$  und wesentlich höhere spezifische Energien  $W/R$  erreichen können. Wie aus Tabelle 3 hervorgeht, ist bei diesen Stromparametern der Korrelationskoeffizient relativ hoch mit einem Wert nahe eins [21]. Aufgrund dieser verhältnismäßig guten Korrelation dürfen der Stromscheitelwert, die Stoßladung und die spezifische Energie nicht separat getestet werden, sondern müssen mit einem einzigen Stoßstrom realisiert werden. Andererseits sind diese Stromparameter mit

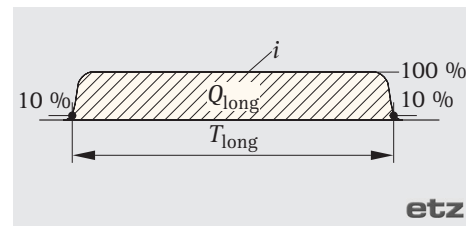


Bild 7. Definition des Langzeitstroms  $i_{\text{long}}$

der Anstiegszeit und der max. Stromsteilheit nur schwach korreliert. Deshalb kann die Gefährdung, die sich aus der Stromsteilheit und der kurzen Stirnzeit ergibt, separat berücksichtigt werden. Diese Bedrohung wird mit dem Folgestoßstrom abgedeckt.

Der Langzeitstrom fließt eher kontinuierlich und weist keine schnell ansteigenden Strombereiche auf. Wie aus Bild 7 hervorgeht, wird für den rechteckförmig angenommenen Langzeitstrom  $i_{\text{long}}$  nur die Ladung  $Q_{\text{long}}$  und die Stromdauer  $T_{\text{long}}$  festgelegt.

## Definition des Gefährdungspegels LPL

In IEC 62305-1 werden vier Gefährdungspegel (LPL) eingeführt, um die unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen verschiedener baulicher Anlagen zu berücksichtigen. Zum Beispiel erfordert ein Wohnhaus niedrigere Sicherheitsmaßnahmen als eine Anlage, in der explosive Stoffe gelagert werden.

Für jeden Gefährdungspegel werden Grenzwerte der Blitzstromparameter fest-

	Strommaximum	Anstiegszeit	Stromsteilheit	Stoßladung	spez. Energie
Strommaximum	1				
Anstiegszeit	0,07	1			
Stromsteilheit	0,49	-0,68	1		
Ladung	<b>0,77</b>	0,27	0,23	1	
spez. Energie	<b>0,84</b>	0,22	0,39	<b>0,82</b>	1

Tabelle 3. Korrelationskoeffizienten zwischen den Stromparametern positiver Blitze nach K. Berger [21]



Wahrscheinlichkeit, dass ein Blitz die festgelegten Grenzwerte der Blitzstromparameter	Gefährdungspegel LPL			
	I	II	III	IV
unterschreitet	99 %	98 %	97 %	97 %
überschreitet	1 %	2 %	3 %	3 %

**Tabelle 4.** Wahrscheinlichkeit für das Unter- bzw. Überschreiten eines in IEC 62305-1 festgelegten oberen Grenzwerts

gelegt; das sind die Werte mit denen beim betreffenden Gefährdungspegel gerechnet wird. Die Festlegung der Grenzwerte orientiert sich daran, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie bei einem Blitzeinschlag unter- bzw. überschritten werden. Beim hochwertigsten Gefährdungspegel LPL I wird entsprechend Tabelle 4 gefordert, dass 99 % der Blitzeinschläge durch die festgelegten Blitzstromparameter abgedeckt sind, d. h. es wird toleriert, dass nur bei 1 % der Blitzeinschläge höhere Blitzstromparameter auftreten. Bei LPL II ist dieser Prozentsatz auf 2 % und bei LPL III bzw. IV auf 3 % erhöht.

### Festlegung der Stromparameter

Da es für ein zu schützendes Objekt unerheblich ist, ob es von einem positiven oder von einem negativen Blitz getroffen wird, werden die positiven und negativen Erstblitze in IEC 62305-1 in einer gemeinsamen Statistik erfasst. Entsprechend ihrem Anteil an den Erdblitzes wird davon ausgegangen, dass die positiven Blitze mit einem Anteil von 10 % und die negativen Blitze mit einem Anteil von 90 % zum ersten Stoßstrom beitragen.

Da die positiven Blitze nur selten Folgeblitze haben, basieren die Festlegungen für den Folgestoßstrom ausschließlich auf dem Stoßstrom des negativen Folgeblitzes. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass mit dem ersten Stoßstrom und dem Folgestoßstrom auch die Bedrohung durch die seltenen positiven Folgeblitze abgedeckt ist.

Ausgangspunkt für die Bestimmung der Grenzwerte der Blitzstromparameter sind die in Tabelle 4 festgelegten Überschreitungswahrscheinlichkeiten bei den verschiedenen Gefährdungspegeln. Das Vorgehen wird im Folgenden für die einzelnen Parameter am Beispiel des Gefährdungspegels LPL I erläutert, dem die Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1 % zugrunde liegt. Alle derart bestimmten Grenzwerte sind dann in Tabelle 5, die auch die anderen Gefährdungspegel umfasst, zusammengestellt. Wie bereits erwähnt, beruhen die zugrunde liegenden Statistiken auf den Messungen von K. Berger; sie sind in zwei

Publikationen in der CIGRE-Mitgliederschrift *Electra* veröffentlicht [21, 26].

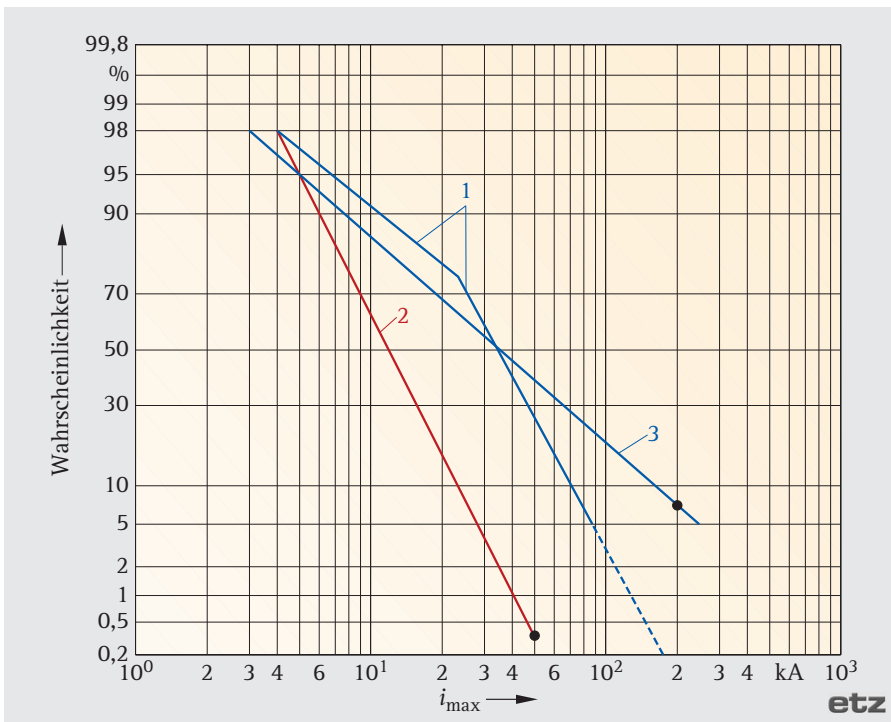
Die höchsten Maximalwerte erreichen positive Stoßströme. Die Wahrscheinlichkeit, dass dabei Werte über 200 kA auftreten, liegt entsprechend Bild 8 bei etwa 7 %. Da aber nur jeder zehnte Erdblitz ein positiver Blitz ist, trägt der positive Blitz nur mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 0,7 % bei. Hinzukommt eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass auch der Stoßstrom des negativen Erstblitzes den Wert von 200 kA erreicht. Somit ergibt sich eine Gesamtwahrscheinlichkeit von etwa 1 %, dass bei einem Blitzeinschlag der erste Stoßstrom den Wert von 200 kA erreicht oder überschreitet. Folglich ist bei LPL I für den ersten Stoßstrom ein Grenzwert von 200 kA festgelegt. In Bild 8 ist dieser Wert als Punkt eingetragen.

Ein multipler negativer Wolke-Erde-Blitz besteht aus einem Erstblitz und typischerweise drei Folgeblitzen. Folglich fließt bei einem Blitzeinschlag im Mittel dreimal der Stoßstrom des Folgeblitzes über das getroffene Objekt. Bei der Festlegung des Maximalwerts des Folgestoßstroms wird daher nicht die 1 %-Wahrscheinlichkeit, sondern ein Drittel davon, also die 0,3 %-Wahrscheinlichkeit zugrunde gelegt. Der entsprechende Grenzwert beträgt 50 kA und ist in Bild 8 ebenfalls als Punkt markiert.

Bild 9 zeigt, dass die Stoßströme der positiven und negativen Erstblitze wesentlich kleinere Steilheiten aufweisen als die Stoßströme der Folgeblitze. Daher wird nur für den Folgestoßstrom eine max. Stromsteilheit festgelegt. Der 1 %-Wert beträgt 280 kA/μs; er ist in Bild 9 als Punkt markiert. Allerdings gilt diese Festlegung nur für rechnerische Analysen. Für den allgemeinen Fall dient eine mittlere Stromsteilheit. Der 1 %-Wert der mittleren Stromsteilheit zwischen dem 30 %-Strompegel und dem 90 %-Strompegel negativer Folgeblitze liegt nach Bild 9 bei 200 kA/μs. Dieser Wert wird in IEC 62305-1 als mittlere Stromsteilheit zugrunde gelegt. Daraus folgt die Stirnzeit des Folgestoßstroms zu  $T_1=50$  kA/

erster Stoßstrom			LPL		
Stromparameter	Symbol	Einheit	I	II	III/IV
Maximum des ersten Stoßstroms	$i_{max}$	kA	200	150	100
Ladung des ersten Stoßstroms	$Q_{short}$	C	100	75	50
spez. Energie des ersten Stoßstroms	$W/R$	MJ/Ω	10	5,6	2,5
Wellenform	$T_1/T_2$	μs/μs	10/350		
Folgestoßstrom			LPL		
Stromparameter	Symbol	Einheit	I	II	III/IV
Maximum des Folgestoßstroms	$i_{max}$	kA	50	37,5	25
durchschnittliche Stirnsteilheit des Folgestoßstroms	$di/dt$	kA/μs	200	150	100
Wellenform	$T_1/T_2$	μs/μs	0,25/100		
Langzeitstrom			LPL		
Stromparameter	Symbol	Einheit	I	II	III/IV
Ladung des Langzeitstroms	$Q_{long}$	C	200	150	100
Dauer des Langzeitstroms	$T_{long}$	s	0,5		
Blitz			LPL		
Stromparameter	Symbol	Einheit	I	II	III/IV
Ladung des Gesamtblitzes	$Q_{flash}$	C	300	225	150

**Tabelle 5.** Grenzwerte der Blitzstromparameter für die Gefährdungspegel LPL



**Bild 8.** Häufigkeitsverteilung des Blitzstrommaximums nach CIGRE – 1: negativer Erstblitz, 2: negativer Folgeblitz, 3: positiver Blitz, die Punkte markieren den in IEC 62305-1 festgelegten Wert für LPL I

200 kA/μs=0,25 μs. Der Rückenbereich ist beim Folgestoßstrom belanglos, da diese Bedrohung durch den ersten Stoßstrom abgedeckt ist. Daher wird in IEC 62305-1 die Rückenhalbwertszeit des Folgestoßstroms ohne nähere Begründung zu  $T_2=100 \mu\text{s}$  festgelegt. Daraus ergibt sich dann die in Tabelle 5 mit der Bezeichnung 0,25/100 μs festgelegte Impulsform des Folgestoßstroms.

Die Stoßladung wird nur für den Stoßstrom des positiven Erstblitzes berücksichtigt, da die negativen Erstblitze und auch die Folgeblitze wesentlich kleinere Ladungen aufweisen. Bei der Festlegung ist wiederum zu berücksichtigen, dass die positiven Blitze lediglich mit etwa 10 % zu den Erdblitzten beitragen. Daher wird für die 1-prozentige Überschreitungswahrscheinlichkeit des LPL I der 10 %-Wert der Ladung der positiven Stoßströme zugrunde gelegt. Der Grenzwert für die Ladung beträgt etwa 100 C. In Bild 10 ist dieser Wert als Punkt markiert.

Aus demselben Grund ist für den Grenzwert der spezifischen Energie nur der Stoßstrom des (ersten) positiven Blitzes bestimmend. Aus Bild 11 ergibt sich der 10 %-Wert zu etwa  $1 \cdot 10^7 \text{ J}/\Omega$ . Dieser Grenzwert ist in Bild 11 wiederum als Punkt markiert.

Auch bei der Festlegung der Gesamtladung wird ebenfalls nur der positive Blitz mit einem Anteil von 10 % berücksich-

tigt. Nach Bild 10 ergibt sich der 10 %-Wert der Gesamtladung zu 300 C. Dieser Grenzwert ist ebenfalls in Bild 10 als Punkt markiert.

Da die positiven Blitze nur selten Folgeblitze aufweisen, tragen zur Gesamtladung im Wesentlichen nur die Stoßladung des Erstblitzes und die Ladung des Langzeitstroms bei. Die Ladung des Langzeitstroms von 200 C ergibt sich unmittelbar aus der Differenz zwischen den bereits oben ermittelten Grenzwerten für die Gesamtladung von 300 C und für die Stoßladung von 100 C. Bei den Stoßströmen wird von einem exponentiellen Abklingen nach dem Maximum ausgegangen. Der exponentiell abklingende Strom ergibt sich nach folgender Formel:

$$i = i_{\text{max}} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

Für die Ladung und die spezifische Energie gilt dann:

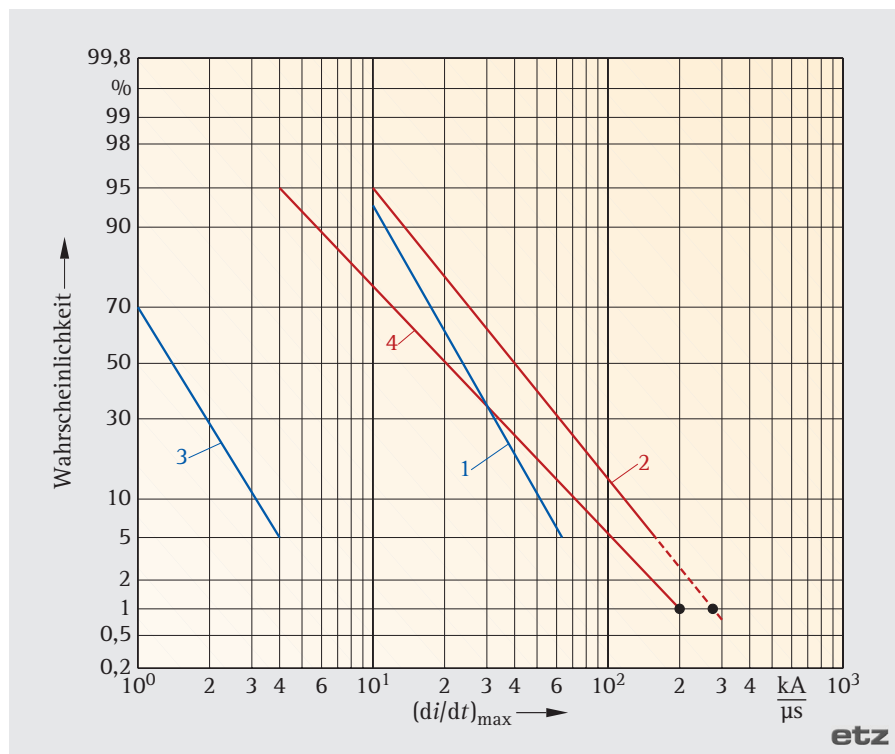
$$Q = i_{\text{max}} \cdot \tau \quad \text{und} \quad (2)$$

$$W/R = i_{\text{max}}^2 \cdot \frac{\tau}{2} \quad (3)$$

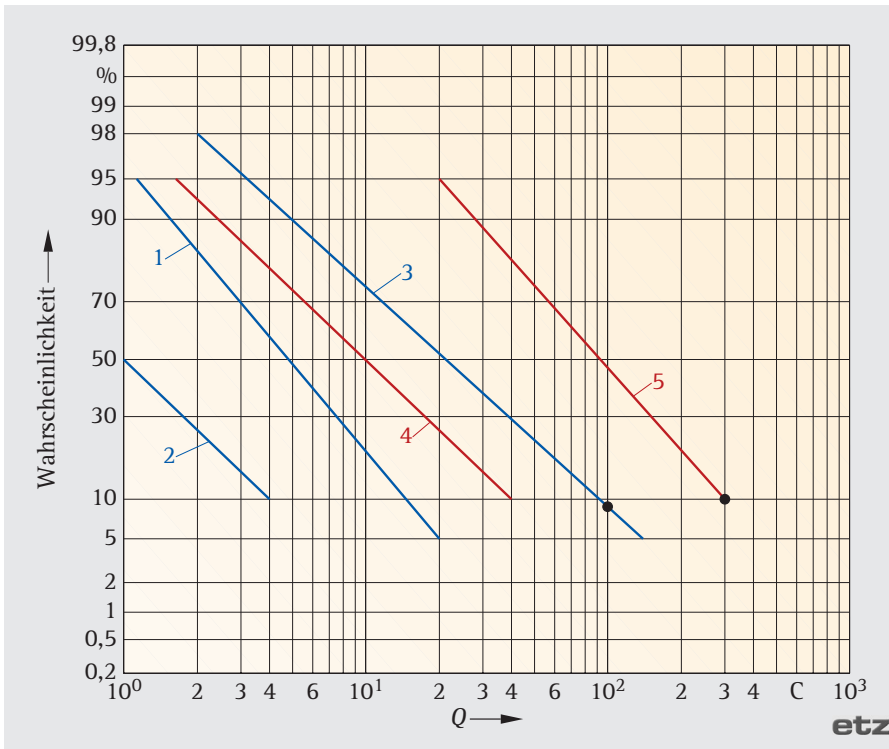
Die Zeitkonstante  $\tau$  ergibt sich aus der Rückenhalbwertszeit  $T_2$  über folgende Beziehung:

$$t = T_2 / \ln(2). \quad (4)$$

Mit diesen Gleichungen und mit den festgelegten Blitzstromparametern ergibt sich



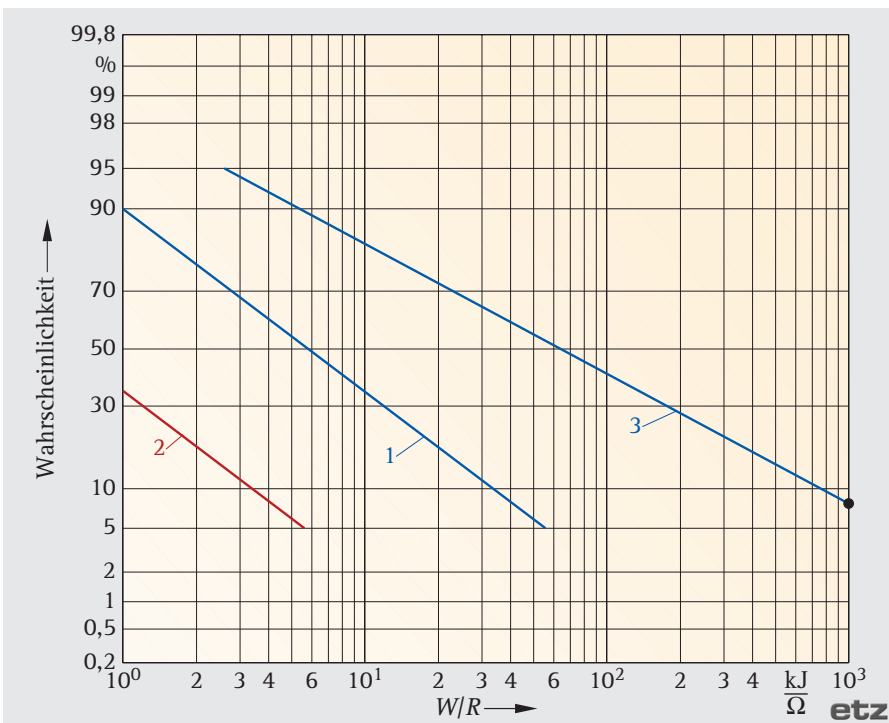
**Bild 9.** Häufigkeitsverteilung der max. Stromsteilheit nach CIGRE – 1: negativer Erstblitz, 2: negativer Folgeblitz, 3: positiver Blitz, 4: negativer Folgeblitz  $(di/dt)_{30\% \dots 90\%}$ , die Punkte markieren den in IEC 62305-1 festgelegten Wert für LPL I



**Bild 10.** Häufigkeitsverteilung der Blitzstromladung nach CIGRE – 1: negativer Erstblitz, 2: negativer Folgeblick, 3: positiver Blitz, 4: Gesamtladung des negativen Blitzes, 5: Gesamtladung des positiven Blitzes, die Punkte markieren den in IEC 62305-1 festgelegten Wert für LPL I

die Rückenhalbwertzeit des ersten Stoßstroms zu  $T_2=350 \mu\text{s}$ . Da die Bedrohung durch die Stirn der Blitzströme bereits

durch den Folgestoßstrom abgedeckt ist, wird die Stirnzeit des ersten Stoßstroms in IEC 62305-1 ohne nähere Begründung



**Bild 11.** Häufigkeitsverteilung der spezifischen Energie nach CIGRE – 1: negativer Erstblitz, 2: negativer Folgeblick, 3: positiver Blitz, der Punkt markiert den in IEC 62305-1 festgelegten Wert für LPL I

zu  $T_1=10 \mu\text{s}$  festgelegt, was für positive Erstblitze typisch ist. Daraus ergibt sich die in Tabelle 5 mit der Bezeichnung 10/350  $\mu\text{s}$  festgelegte Impulsform des ersten Stoßstroms.

Bei den Langzeitströmen ist im Wesentlichen nur die Ladung maßgebend. Daher ist neben der Ladung in IEC 62305-1 nur die Dauer des Langzeitstroms zu 0,5 s festgelegt (vgl. Tabelle 5). Die Amplitude des annähernd rechteckförmig angenommenen Langzeitstroms ergibt sich dann unmittelbar aus der festgelegten Ladung.

Tabelle 5 enthält auch die festgelegten Grenzwerte für die übrigen drei Gefährdungspegel. Die für LPL I ermittelten Grenzwerte reduzieren sich für LPL II auf 75 % sowie für LPL III und LPL IV auf 50 %. Die zeitlichen Parameter bleiben unverändert. Dadurch vermindern sich die Ströme, die Ladungen und die Stromsteilheit linear mit der Reduktion. Da die spezifische Energie  $W/R$  identisch mit dem Stromquadratimpuls  $\int i^2 dt$  ist, reduziert sie sich quadratisch mit dem Strom. Gegenüber LPL I ist somit die spezifische Energie für LPL II um den Faktor  $(4/3)^2=1,78$  und für LPL III bzw. LPL IV um den Faktor 4 kleiner.

### Ausblick

Die in der Normenreihe IEC 62305 festgelegten Blitzstromparameter beruhen hauptsächlich auf den Blitzstrommessungen *K. Bergers* und seiner Mitarbeiter in der Schweiz. Inzwischen gibt es neuere Messungen an Türmen in Österreich, Deutschland, Kanada und Brasilien sowie von raketengestützten Blitzen. Zusätzlich liefern moderne Blitzortungssysteme einen Schätzwert allerdings nur über das Strommaximum.

Trotz dieser neuen Daten gibt es kaum neue Statistiken über die Parameter von Blitzströmen. Deshalb hat CIGRE beschlossen, eine neue Arbeitsgruppe einzusetzen, um die Veröffentlichungen von 1975 [21] und 1980 [26] zu aktualisieren. Änderungen von Blitzstromparametern sollten aber erst in die Blitzschutznormen aufgenommen werden, wenn die Ergebnisse aus der neuen CIGRE Arbeitsgruppe vorliegen.

Ziel der erneuten Datensichtung ist die Einbeziehung zusätzlicher Blitzparameter, die gegenwärtig nicht bei CIGRE oder in den IEC-Normen beachtet sind. Hierzu zählen beispielsweise die Anzahl der Teilblitze und ihre zeitliche Abfolge. Auch mögliche geografische, saisonale oder sonstige Einflüsse auf die Blitzparameter sollen berücksichtigt werden.



## Literatur

- [1] *Grünwald, H.*: Die Messung von Blitzstromstärken an Blitzableitern und Freileitungsmasten. ETZ Elektrotechn. Z. 55 (1934) H. 21, S. 505–509
- [2] *Grünwald, H.*: Die Messung von Blitzstromstärken an Blitzableitern und Freileitungsmasten. ETZ Elektrotechn. Z. 55 (1934) H. 22, S.536–539
- [3] *Zaduk, H.*: Neuere Ergebnisse der Blitzstromstärkemessungen an Hochspannungsleitungen. Elektrotechn. Z. 56 (1935) H. 17, S. 475–479
- [4] *Popolansky, F.*: Lightning current measurement on high objects in Czechoslovakia. Paper 1.3 in Proceedings 20th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 24.9.–28.9.1990 in Interlaken/Schweiz. Fehraltorf/Schweiz: SEV, 1990
- [5] *McEachron, K. B.*: Lightning to the Empire State Building. Journal of the Franklin Institute 227 (1939) H. 2, S. 149–217
- [6] *Garbagnati, E.; Lo Piparo, G. B.*: Lightning Parameters – Results of 10 years investigation in Italy. Paper A1 in Proceedings International Aerospace Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE), 23.3.–25.3.1982 in Oxford/Großbritannien. Abingdon/Großbritannien: Culham Laboratory, 1982
- [7] *Fuchs, F.; Landers, E. U.; Schmid, R.; Wiesinger, J.*: Lightning current and magnetic field parameters caused by lightning strikes to tall structures relating to interference of electronic systems. IEEE Trans. on EMC 40 (1998) H. 4, S. 444–451 (ISSN 0018-9375)
- [8] *Diendorfer, G.; Mair, M.; Schulz, W.; Hadrian, W.*: Lightning Current Measurements in Austria Experimental Setup and First Results. Paper 1.14, S. 44–47 in Proceedings of the 25th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 18.9.–22.9.2000, Rhodos/Griechenland. Rion/Griechenland: University of Patras, 2000
- [9] *Montandon, E.; Beyerler, B.*: The lightning measuring equipment on the Swiss PTT telecommunication tower at St. Chrischona, Switzerland. Paper R 1c\_06 in Proceedings of the 22nd International Conference on Lightning Protection (ICLP), 19.9.–23.9.1994 in Budapest/Ungarn. Budapest/Ungarn: Budapest University of Technology and Economics (BME), 1994
- [10] *Janischewskyy, W.; Hussein, A. M.; Shostak, V.; Rusan, I.; Li, J.-X.; Chang, J.-S.*: Statistics of lightning strikes to the Toronto Canadian National Tower (1978–1995). IEEE Trans. on Power Delivery 12 (1997) H. 3, S.1 210–1 221 (ISSN 0885-8977)
- [11] *Goto, Y.; Narita, K.; Komuro, H.; Honma, N.*: Current waveform measurement of winter lightning struck an isolated tower. Paper 1.9 in Proceedings 20th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 24.9.–28.9.1990 in Interlaken/Schweiz. Fehraltorf/Schweiz: SEV, 1990
- [12] *Miyake, K.; Suzuki, T.; Shinjou, K.*: Characteristics of winter lightning currents on Japan sea coast. IEEE Trans. on Power Delivery 7 (1992) H. 3, S. 1 450–1 456 (ISSN 0885-8977)
- [13] *Gorin, B. N.; Lewitow, W. I.; Schkiljew, A. W.*: Einige Ergebnisse der Blitzstationenaufnahmen auf dem Ostankino-Fernsehturm. Paper 1.9 in Proceedings of the 13th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 22.6.–24.6.1976 in Venedig/Italien. Milano/Italien: CEI, 1976
- [14] *Gorin, B. N.; Lewitow, W. I.; Schkiljew, A. W.*: Besonderheiten der Blitzeinschläge in den Ostankino-Fernsehturm. Paper 1.10 in Proceedings of the 13th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 22.6.–24.6. 1976 in Venedig/Italien. Milano/Italien: CEI, 1976
- [15] *Heidler, F.; Zischank, W.; Wiesinger, J.*: Statistics of lightning current parameters and related nearby magnetic fields measured at the Peißenberg tower. Paper 1.19, S. 78–83 in Proceedings of the 25th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 18.9.–22.9. 2000, Rhodos/Griechenland. Rion/Griechenland: University of Patras, 2000
- [16] *Newman, M. M.; Stahmann, J. R.; Robb, J. D.; Lewis, E. A.; Martin, S. G.; Zinn, S. V.*: Triggered lightning channel strokes at very close range. Journal of Geophysical Research 72 (1967) H. 18, S. 4761–4764
- [17] *Miyake, K.; Horii, K.*: Five years' experiences on artificially triggered lightning in Japan. S. 468–471 in Proceedings of 7th International Conference on Gas Discharges and their Application 31.8.–3.9.1982 in London/Großbritannien. London/Großbritannien: IEE, 1982
- [18] *Depasse, P.*: Statistics on artificially triggered lightning. Journal of Geophysical Research 99 (1994) H. D9, S. 18 515–18 522 (ISSN 0148-0227)
- [19] *Rakov, V.; Uman, M. A.; Rambo, K. J.*: A review of ten years of triggered-lightning experiments in Camp Blanding, Florida. Journal of Atmospheric Research 76 (2005) H. 1–4, S. 503–517 (ISSN 0169-8095)
- [20] *Fisher, R. J.; Schnetzer, G. H.; Thottappillil, R.; Rakov, V.; Uman, M. A.; Goldberg, J. D.*: Parameters of triggered lightning flashes in Florida and Alabama. Journal of Geophysical Research 98 (1993) H. D12, S. 22 880–22 902 (ISSN 0148-0227)
- [21] *Berger, K.; Anderson, R. B.; Kröninger, H.*: Parameters of lightning flashes. Electra 5 (1975) H. 41, S. 23–37 (ISSN 1286-1146)
- [22] *Berger, K.; Vogelsang, E.*: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955... 1963 auf dem Monte San Salvatore. Bulletin SEV/VSE 56 (1965) H. 1, S. 2–22
- [23] *Berger, K.*: Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. Journal of the Franklin Institute 283 (1967) H. 6, S. 478–525
- [24] *Berger, K.*: Methoden und Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano in den Jahren 1963–1971. Bulletin SEV/VSE 87 (1972) H. 24, S. 1 403–1 422
- [25] *Berger, K.*: Blitzstrom-Parameter von Aufwärtsblitzen. Bulletin SEV/VSE 69 (1978) H. 8, S. 353–360 (ISSN 1660-6728)
- [26] *Anderson, R. B.; Eriksson, A. J.*: Lightning parameters for engineering application. Electra 10 (1980) H. 69, S. 65–102 (ISSN 1286-1146)
- [27] *Heidler, F.; Wiesinger, J.; Zischank, W.*: Lightning currents measured at a telecommunication tower from 1992 to 1998. Bericht 61J6, S. 325–330 in Proceedings 14th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, 20.2.–22.2.2001 in Zürich/Schweiz. Zürich/Schweiz: ETH-Zentrum IKT, 2001 (ISBN 3-9521199-5-4)
- [28] *Schroeder, M.; Soares, A.; Visacro, S.; Cherchiglia, L.; Souza, V.*: Lightning current statistical analysis: Measurements of Morro do Caçimbo Station – Brazil. Paper 1a.4 in Proceedings 26th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2.9.–6.9.2002 in Krakau/Polen. Krakau/Polen: Association of Polish Electrical Engineers, 2002 (ISBN 83-91068-95-1)
- [29] *Geldenhuys, H.; Eriksson, A.; Bouon, A.*: Fifteen years' data of lightning current measurement on a 60 m mast. Paper R-1.7 in Proceedings 19th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 25.4.–29.4.1988 in Graz/Österreich. Wien/Österreich: ÖVE, 1988 (ISBN 3-85133-001-3)
- [30] International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris/Frankreich: www.cigre.org
- [31] IEC 62305-1:2006-01 Protection against lightning – Part 1: General principles. Genf/Schweiz: Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale (ISBN 2-8318-8358-X)