

Praktische Erfahrungen bei der Messung von Blitzströmen - Vergleich von Risikoabschätzung und Messdaten

Practical experience with the measurement of lightning currents – Comparison of risk assessment and measured data

Dr. Martin Wetter, Phoenix Contact GmbH & Co. KG, Blomberg, Deutschland, mwetter@phoenixcontact.com
Prof. Dr.-Ing. Alexander Kern, FH Aachen, Campus Jülich, Deutschland, a.kern@fh-aachen.de

Kurzfassung

Ein faseroptisches Blitzstrommesssystem (vorgestellt auf der 9. VDE/ABB-Blitzschutztagung) [1] ist zur Sammlung von Praxiserfahrungen in unterschiedlichsten Anlagen und Gebäuden weltweit installiert worden. Ursprünglich ist dieses System zur adaptiven Wartung von Windenergieanlagen entwickelt worden. Die installierten Systeme sind mittlerweile bis zu 3 Jahre in Betrieb und die gesammelten Messdaten sind auf Anfrage von den jeweiligen Betreibern der Bauwerke verfügbar oder können online abgefragt werden. Die erfolgten Messungen werden mit bekannten Blitzstromkenngrößen aus verschiedenen Statistiken verglichen. Für ausgesuchte Bauwerke werden auf Basis der IEC 62305-2 [2] Risikoabschätzungen erstellt und die Festlegung der dazu erforderlichen Rahmenparameter erläutert. Die rechnerisch ermittelte durchschnittliche Häufigkeit von gefährlichen Ereignissen durch Blitzeinschläge in die bauliche Anlage wird mit den bislang gemessenen Ereignissen verglichen. Übereinstimmungen oder Abweichungen werden analysiert und interpretiert. Die Grenzen der Risikobetrachtung werden an ausgewählten Beispielen diskutiert.

Abstract

A fiber optic lightning current sensor (presented on the 9th VDE/ABB Blitzschutztagung) [1] is installed worldwide on different sites and buildings. Basically the system has been developed for the adaptive maintenance of wind turbines. The installed systems are now working up to 3 years and the accumulated measuring data is provided by the facility owners or can be accessed online. The measuring data is compared with lightning current values from established and well known statistics. For selected buildings the risk assessment according to IEC 62305-2 [2] is evaluated and the selection of the required frame parameters is described. The calculated average number of dangerous events by lightning to the selected building is compared to the measured number of events. Correlations and divergences are analyzed and interpreted. The limits of risk assessment are discussed on the background of certain examples.

1 Einleitung

Die Messung realer Blitzströme ist Gegenstand vielfältiger internationaler wissenschaftlicher Arbeiten [3, 4]. Diese Arbeiten sind in der Regel darauf ausgerichtet, Details der Blitzentwicklung und -wirkung zu erforschen, um physikalische Grundlagen, Blitzparameter und Gefahrenpotenziale besser zu verstehen. Die dabei eingesetzte Messtechnik zeichnet sich durch eine sehr hohe Genauigkeit aus, um alle Einzelheiten des Blitzstroms zu erfassen und ihn beispielsweise mit theoretischen Modellen der Blitzentstehung vergleichen zu können. Wegen der hohen Kosten und der langen Dauer solcher Untersuchungen sind langfristig betriebene Blitzmessstationen eher selten und die von ihnen erstellte statistische Datenbasis relativ klein.

Für die Echtzeitüberwachung von Blitzeinschlägen in Windenergieanlagen wurde ein neuartiges Messsystem entwickelt und auf der 9. VDE/ABB Blitzschutzkonferenz vorgestellt. Dieses System ermöglicht es, auf eine größere Anzahl von gemessenen Blitzereignissen an verschiedenen Messorten zurück zu greifen. Dieses Messsystem ist in

unterschiedlichen markanten und berühmten Bauwerken installiert. Fünf dieser Installationen werden ausgewählt, um im Rahmen dieses Beitrags die Systeminstallation vorzustellen und die bisher gemessenen Daten mit den theoretisch ermittelten Risikoabschätzungen zu vergleichen. Die vorgestellten Installationen sind maximal seit 3 Jahren in Betrieb und damit noch relativ jung. Die hier vorgestellten Ergebnisse können also nur ein erster Zwischenbericht einer länger andauernden Studie sein.

Seit den 1990 Jahren wird das Schadensrisiko durch Blitzeinschläge untersucht. Das Risikomanagement für Blitz- und Überspannungsschutz ist ein wesentlicher Bestandteil, um die Verwundbarkeit einer baulichen Anlage, der darin sich aufhaltenden Personen, sowie der darin befindlichen Inhalte durch die Bedrohung durch Blitze und Überspannungen einschätzen zu können. Ziel ist die gezielte Auswahl der erforderlichen Schutzmaßnahmen in der notwendigen Qualität und unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit.

Das erste Dokument im Zusammenhang mit Normenarbeiten, das sich diesem Thema widmete, wurde 1995 als IEC 1662 publiziert [5]. Die weiteren Entwicklungen in diesem Themenbereich und die Nutzung dieser Publikation führten 2006 zur ersten Ausgabe des Blitzschutz-

Standards IEC 62305-2. Danach wurden Risikoanalysen für eine große Zahl von baulichen Anlagen durchgeführt. Die weltweit gemachten Erfahrungen führten zu weiteren Verbesserungen, so dass im Jahre 2010 die zweite Ausgabe der IEC 62305-2 [2] publiziert werden konnte. Die Verfahren und Parameterwerte aus diesem Standard werden auch für diese Veröffentlichung herangezogen, um die erwartete Anzahl von Blitzeinschlägen abzuschätzen. Für sehr hohe bauliche Anlagen wird diese Anzahl aus einer ergänzenden, speziellen, aber gut bekannten und bewährten Beziehung gewonnen.

2 Blitzmesssystem LM-S

2.1 Motivation

Das Blitzmesssystem LM-S dient zur Detektion und Auswertung von Blitzeinschlägen in die Rotorblätter von Windenergieanlagen. Während die elektrischen und elektronischen Komponenten dieser Anlagen wirkungsvoll vor Blitzeinwirkungen und Überspannungen geschützt werden können, sind die äußeren Strukturen und speziell die Rotorblättern direkten Blitzeinwirkungen ausgesetzt. Typischerweise werden die Rotorblätter von Windenergieanlagen in regelmäßigen Abständen auf Beschädigungen beispielsweise durch Blitzeinwirkung überprüft. Diese Überprüfungen sind in der Regel sehr aufwändig und damit auch kostspielig. Durch die Messung der Blitzströme können die Serviceintervalle den realen Belastungen angepasst werden und unnötige Wartungseinsätze vermieden werden. Im Vergleich zu wissenschaftlichen Messsystemen ist die Genauigkeit des LM-S deutlich geringer ($\pm 10\%$), dafür ist es einfach zu installieren bei einem den Anforderungen angemessenen Systempreis.

2.2 Faseroptischer Stromsensor

Die Funktion des LM-S, insbesondere die physikalischen Hintergründe eines Faraday-Stromsensors, sind ausführlich beschrieben in [1] und sollen hier nicht in aller Tiefe wiederholt werden.

Wesentliches Merkmal der faseroptischen Strommessung ist, dass das Magnetfeld des zu messenden Stromes Einfluss nimmt auf polarisierte Lichtwellen, die definiert durch den Stromsensor geleitet werden. Dazu wird jeder Sensor über zwei Lichtwellenleiter mit den Auswerteeinheit verbunden. Der Stromsensor selbst ist damit komplett passiv aufgebaut. Er besteht nur aus Kunststoffen, Keramik und Glas, weshalb er ohne Beachtung von Trennungsabständen auf jeder Ableitung angebracht werden kann. In Windenergieanlagen sind die Ableitungen der Blitzschutzanlage teilweise in die GFK-Konstruktion der Rotorblätter eingebracht. In diesem Fall wird der Sensor an der Blattwurzel auf den Ableitungen angebracht, welche die einzelnen Rotorblätter mit der Ableitung der Rotornabe verbinden (**Bild 1**).

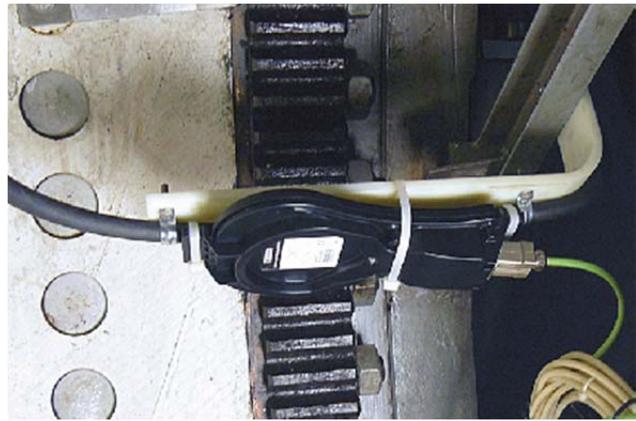


Bild 1 LM-S Blitzstromsensor in der Rotorblattwurzel einer Windenergieanlage

3 Untersuchte bauliche Anlagen

Neben einer Vielzahl von Installationen in Windenergieanlagen wurde das LM-S in mehreren berühmten Bauwerken in der ganzen Welt installiert. Fünf dieser Installationen werden im Folgenden zum Vergleich der Messungen mit den berechneten Risiken vorgestellt.

3.1 Hermannsdenkmal Detmold, Deutschland



Bild 2a Hermannsdenkmal in Detmold, Deutschland

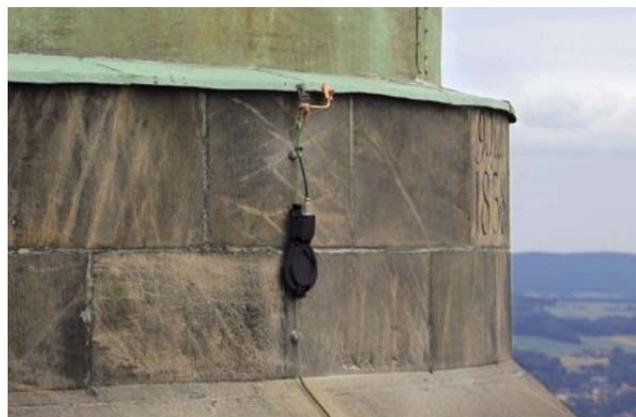


Bild 2b LM-S Blitzstromsensor am Hermannsdenkmal in Detmold, Deutschland

Mit einer Gesamthöhe von 53,46 m ist das Hermannsdenkmal die höchste Statue Deutschlands (**Bild 2a**). Es erinnert an die Schlacht im Teutoburger Wald, in der die Cherusker im Jahre 9 n.Chr. die Römische Legion besiegten. Das Denkmal steht auf der Spitze eines Hügels. Die Statue besteht im Inneren aus einer Stahlkonstruktion. Das Standbild selbst ist aus Kupfer gefertigt. An diesem Ort wurde das Blitzstrommesssystem LM-S in 2012 erstmalig im Probebetrieb installiert. Alle Informationen zum Projekt und alle Messdaten sind öffentlich zugänglich unter www.blitze-am-hermann.de.

3.2 Burj Khalifa Dubai, Vereinigte Arabische Emirate



Bild 3a Burj Khalifa in Dubai, Vereinigte Arabische Emirate



Bild 3b LM-S Blitzstromsensor auf dem Burj Khalifa in Dubai, Vereinigte Arabische Emirate

Das Burj Khalifa in Dubai ist mit 828 m Höhe das höchste Gebäude der Welt (**Bild 3a**). Neben Büroflächen gibt es Privatwohnungen, Hotels, Restaurants und Aussichtspunkte. Aufzüge gibt es bis zu einer Höhe von 638 m. Für Installationsarbeiten darüber hinaus stehen lediglich Treppen und Leitern zur Verfügung. Bei Aufbauarbeiten für das Silvesterfeuerwerk 2013 wurden die Sensoren beschädigt und das System war bis Februar 2015 für 14 Monate außer Betrieb.

3.3 Großer Belt Brücke Seeland, Dänemark



Bild 4a Großer Belt Brücke in Seeland, Dänemark



Bild 4b LM-S Blitzstromsensor auf der Großer Belt Brücke in Seeland, Dänemark

Die Großer Belt Brücke in Dänemark verbindet die Dänischen Inseln Fünen mit Seeland (**Bild 4a**). Mit einer Gesamtlänge von 2.694 m besitzt sie eine Hauptspannweite von 1.624 m. Die Hauptpfeiler sind 254 m hoch, wobei die Straßenebene etwa 70m über dem Wasserspiegel verläuft.

3.4 Stephansdom Wien, Österreich



Bild 5a Stephansdom in Wien, Österreich



Bild 5b LM-S Blitzstromsensor am Stephansdom in Wien, Österreich

Die Domkirche St. Stephan zu Wien ist eines der wichtigsten gotischen Bauwerke in Österreich (**Bild 5a**). Das Hauptgebäude ist 34 m breit und 107 m lang bei etwa 65 m Höhe. Der Blitzstromsensor ist im Südturm installiert, welcher eine Höhe von 136,4 m hat.

3.5 Uhrnturm Graz, Österreich



Bild 6a Uhrnturm in Graz, Österreich



Bild 6b LM-S Blitzstromsensor im Uhrnturm in Graz, Österreich

Der Uhrnturm aus dem 13. Jahrhundert ist das berühmte Wahrzeichen der Stadt Graz (**Bild 6a**). Er besitzt vier Ziffernblätter mit einem Durchmesser von mehr als 5 Metern. Die Uhren waren ursprünglich mit nur einem Zeiger für die Stunden ausgestattet, was für die damalige Zeit durchaus üblich war. Die später installierten Minutenzeiger wurden kürzer angefertigt, um sie aus der Ferne von den Stundenzeigern unterscheiden zu können. Bis heute sind die Zeiger unverändert und damit aus heutiger Sicht vertauscht.

4 Die erwartete Anzahl von Blitzeinschlägen – Grundlagen

4.1 Übliche bauliche Anlagen

Die erwartete Anzahl von Blitzeinschlägen in eine bauliche Anlage wird weitestgehend nach dem Verfahren berechnet, das im internationalen Blitzschutz-IEC 62305-2 Ed.2:2010 [2] beschrieben ist. Im dortigen Anhang A wird die Anzahl direkter Blitzeinschläge N_D abgeschätzt zu:

$$N_D = N_G \cdot A_D \cdot C_D \cdot 10^{-6} \quad (\text{Gl. 1})$$

mit:

- N_G Erdblitzdichte ($1/(\text{km}^2 \cdot \text{year})$);
- A_D Einfangfläche der baulichen Anlage (m^2);
- C_D Standortfaktor der baulichen Anlage.

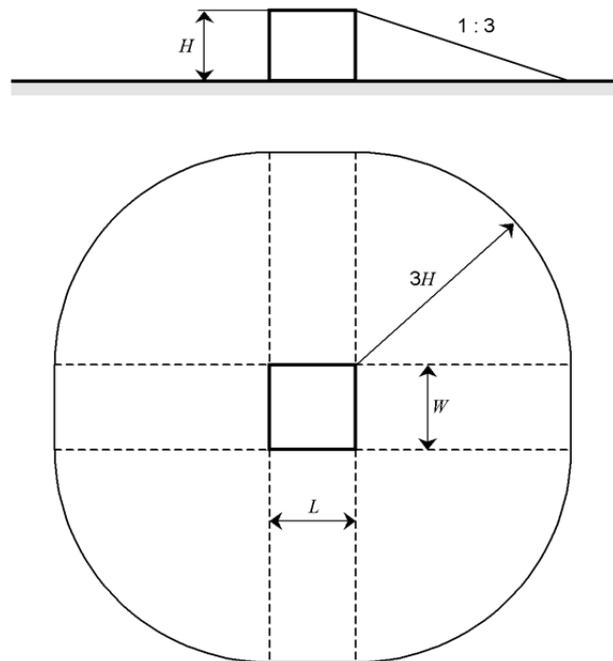


Bild 7 Einfangfläche A_D einer freistehenden baulichen Anlage

Für freistehende bauliche Anlagen auf einem ebenen Gelände wird die Einfangfläche A_D durch eine Begrenzungslinie gebildet, die sich aus der Schnittlinie einer Geraden mit einer Steigung von $1/3$ mit der Erdboden-

Oberfläche ergibt (**Bild 7**). Die Gerade wird jeweils als Tangente an den höchsten Punkten der baulichen Anlage angesetzt (sie berührt hier) und um die gesamte bauliche Anlage herumgeführt. Für eine freistehende, rechteckförmige bauliche Anlage mit Länge L , Breite W und Höhe H auf einer ebenen Fläche ergibt sich die Einfangfläche damit zu:

$$A_D = L \cdot W + 2 \cdot (3 \cdot H) \cdot (L + W) + \pi \cdot (3 \cdot H)^2 \quad (\text{Gl. 2})$$

mit L , W und H angegeben in Meter.

Der Wert "3" in (2) gilt für eine typische Höhe der baulichen Anlage von 20 m. Damit wird aber grundsätzlich die Anzahl der Blitzeinschläge in niedrigere bauliche Anlagen unterschätzt, und vor allem in bauliche Anlagen mit einer Höhe von mehr als 20 m überschätzt [6]. Deshalb wird in (2) für bauliche Anlagen mit $H > 20$ m der Wert 3 ersetzt durch den Parameter m , der wie folgt bestimmt wird:

$$m = 13,4 \cdot H^{-0,5} \quad (\text{Gl. 3})$$

Die relative Lage der baulichen Anlage, bestimmt durch umgebende Objekte oder eine exponierte Lage, wird über einen Standortfaktor C_D berücksichtigt (**Tabelle 1**).

Tabelle 1 Standortfaktor der baulichen Anlage C_D

Relative Lage	C_D
Bauliche Anlage umgeben von höheren Objekten	0,25
Bauliche Anlage umgeben von Objekten mit gleicher oder niedrigerer Höhe	0,5
Freistehende bauliche Anlage: keine weiteren Objekte in der Nähe	1,0
Freistehendes bauliche Anlage auf einer Bergspitze oder einer Kuppe	2,0

Eine genauere Berechnung des Einflusses umgebender Objekte könnte unter Berücksichtigung der relativen Höhe der baulichen Anlage in Bezug auf die umgebenden Objekte und den Erdboden innerhalb einer Entfernung von $3H$ von der baulichen Anlage durchgeführt werden. Dafür wird $C_D = 1$ angenommen.

4.2 Hohe bauliche Anlagen

Für hohe bauliche Anlagen ist die in IEC 62305-2 dargestellte Methode nicht zufrieden stellend. Hierfür kann nach Eriksson [7, 9], die Gesamtzahl von Einschlägen N_{Tall} ermittelt werden zu:

$$N_{\text{Tall}} = N_G \cdot 24 \cdot H^{2,05} \cdot 10^{-6} \quad (\text{Gl. 4})$$

mit:

H effektive Höhe der baulichen Anlage.

Die Beziehung in (4) wurde ermittelt für effektive Höhen im Bereich 100 m ... 550 m. Der Begriff "effektive Hö-

he" berücksichtigt, dass hohe bauliche Anlagen, z.B. Türme, auf der Spitze eines Berges oder Hügels errichtet worden sein könnten. Damit wird die eigentliche Höhe des Turmes überlagert vom zusätzlichen Einfluss seiner Position. Natürlich ist im Falle von hohen baulichen Anlagen, die auf ebener Fläche errichtet sind, die effektive Höhe gleich der tatsächlichen Höhe.

Im Falle von hohen baulichen Anlagen kommt es darüber hinaus zur Entwicklung von Aufwärtsblitzen. Der Prozentsatz dieser Aufwärtsblitze wächst mit zunehmender Höhe der baulichen Anlage. Um diesen Effekt zu untersuchen, kann der Prozentsatz von Aufwärtsblitzen P_U als Funktion der effektiven Höhe der baulichen Anlage H nach [8, 9] angegeben werden zu:

$$P_U = 52,8 \cdot \ln(H) - 230 \quad (\text{Gl. 5})$$

Diese Unterscheidung in Aufwärts- und Abwärtsblitze ist aber nur erforderlich, wenn die Blitzströme detailliert untersucht werden sollen. Wenn nur die Gesamtzahl von Blitzeinschlägen ermittelt werden soll, sind die Ergebnisse nach (4) ausreichend, da sie beide Entladungstypen beinhalten.

5 Erwartete Anzahl von Blitzeinschlägen in die untersuchten baulichen Anlagen

5.1 Hermannsdenkmal, Detmold

Die Statue von Hermann, das Hermannsdenkmal, kann als scharfe Spitze mit einer Höhe von 53,5 m (Spitze des Schwertes) und vernachlässigbarer Länge und Breite aufgefasst werden. Die Statue steht alleine auf einer Hügelspitze. Der Wert der Blitzdichte wurde vom deutschen Blitzortungsnetzwerk BLIDS zur Verfügung gestellt. Die Daten für die Berechnung sind in **Tabelle 2** zusammen gestellt.

Tabelle 2 Daten für die Berechnung von N_D für das Hermannsdenkmal

L	W	H	C_D	N_G
1 m	1 m	53,5 m	2	2,6/(km ² ·year)

Nach (3) ergibt sich $m = 1,83$. Dies führt nach (2) zu einer Einfangfläche von $A_D = 30.570 \text{ m}^2$. Daraus ergibt sich schließlich aus (1) die Anzahl der direkten Blitzeinschläge zu $N_D = 0,159/\text{Jahr}$, d.h. ein Direkteinschlag erfolgt alle 6,3 Jahre.

5.2 Burj Khalifa, Dubai

Der Turm Burj Khalifa ist natürlich eine (sehr) hohe bauliche Anlage. Er kann wiederum als scharfe Spitze mit einer Höhe von 828 m (Spitze der Antenne) aufgefasst werden. Er steht auf ebener Fläche, damit ist die effektive Höhe gleich der tatsächlichen. Benachbarte bauliche Anlagen existieren zwar, sind aber deutlich niedriger, so dass sie vernachlässigt werden können. Die Blitzdichte musste aus „NASA's global map of lightning frequency“ abge-

schätzt werden. Die Daten für die Berechnung sind in **Tabelle 3** zusammen gestellt.

Tabelle 3 Daten für die Berechnung von N_D für Burj Khalifa

H	N_G
828 m	2,0/(km ² ·year)

Für Burj Khalifa als hohe bauliche Anlage wird (4) genutzt. Daraus ergibt sich die enorme Anzahl von direkten Blitzeinschlägen $N_{Tall} = 46/\text{Jahr}$. Nach (5) würde sich ein Prozentsatz von 125% Aufwärtsblitze ergeben. Das ist natürlich offensichtlich nicht möglich; es zeigt damit, dass eine bauliche Anlage mit einer Höhe wie der Burj Khalifa klar außerhalb des Gültigkeitsbereichs von (5) liegt. Als erste Annahme wird der Anteil der Aufwärtsblitze zu 80% angenommen, also 37/Jahr.

5.3 Großer Belt Brücke, Dänemark

Im Falle der Brücke über den Großen Belt sind insbesondere die beiden Hauptpfeiler von Bedeutung. Diese sind mit dem Blitzstrommesssystem ausgerüstet. Jeder der beiden Hauptpfeiler kann als dünne Struktur (Länge 25 m, Breite 8 m) mit einer Höhe von 254 m aufgefasst werden. Wegen ihrer Entfernung voneinander können sie darüber hinaus als unabhängige bauliche Anlagen auf ebener Fläche betrachtet werden. Der Wert der Blitzdichte kommt vom deutschen Blitzortungssystem BLIDS in Zusammenarbeit mit dem Europäischen System EUCLID. Die Daten für die Berechnung sind in **Tabelle 4** zusammen gestellt.

Tabelle 4 Daten für die Berechnung von N_D und N_{TALL} für die Brücke über den großen Belt

L	W	H	C_D	N_G
25 m	8 m	254 m	1	1,0/(km ² ·year)

Zunächst wird jeder der beiden Hauptpfeiler als übliche bauliche Anlage eingestuft, d.h. das Verfahren nach IEC 62305-2 wird angewendet. Nach (3) ergibt sich $m = 0,84$. Dies führt nach (2) zu einer Einfangfläche von $A_D = 157.500 \text{ m}^2$. Daraus folgt schließlich mit (1) die Anzahl der direkten Blitzeinschläge zu $N_D = 0,158/\text{year}$, d.h. ein Direkteinschlag erfolgt alle 6,3 Jahre.

Werden die beiden Hauptpfeiler dagegen als hohe baulichen Anlagen angesehen, wird (4) genutzt, und die Anzahl von direkten Blitzeinschlägen ergibt sich zu $N_{Tall} = 2,04/\text{Jahr}$. Nach (5) sind davon 62% Aufwärtsblitze, d.h. 1,27/Jahr.

Dieser Vergleich zeigt den enormen Einfluss der Höhe einer baulichen Anlage auf die Anzahl von Blitzeinschlägen. Hohe Anlagen weisen eine ausgeprägte elektrische Feldüberhöhung auf, wodurch sich insbesondere das Phänomen von Aufwärtsblitzen einstellt. Dieses tritt bei üblichen (also deutlich niedrigeren) baulichen Anlagen nicht gleichermaßen auf.

Es ist offensichtlich [6, 7, 8, 9], dass die beiden Hauptpfeiler als hohe bauliche Anlagen einzustufen sind. Damit wird im Folgenden der Wert der erwarteten Blitzeinschläge N_{Tall} weiter verwendet.

5.4 Stephansdom, Wien

Der Stephansdom steht mitten in Wien, ragt aber deutlich über die benachbarte Bebauung heraus. Der Turm ist wesentlich höher als das Hauptgebäude, so dass für die Abschätzung der Einfangfläche der Stephansdom als ausschließlich aus dem Turm bestehend betrachtet werden kann, d.h. die Einfangfläche des Turms deckt die Einfangfläche des Hauptgebäudes weitestgehend mit ab. Daher wird auch der Stephansdom in erster Näherung als rechteckförmige bauliche Anlage mit einer Grundfläche von 1 m x 1 m und einer Höhe von 137 m betrachtet. Der Wert der Blitzdichte kommt vom österreichischen Blitzortungssystem ALDIS. Die Daten für die Berechnung sind in **Tabelle 5** zusammen gestellt.

Tabelle 5 Daten für die Berechnung von N_D für den Uhrturm

L	W	H	C_D	N_G
1 m	1 m	137 m	1	1,1/(km ² ·year)

Nach (3) ergibt sich $m = 1,14$. Dies führt nach (2) zu einer Einfangfläche von $A_D = 77.900 \text{ m}^2$. Daraus ergibt sich schließlich aus (1) die Anzahl der direkten Blitzeinschläge zu $N_D = 0,086/\text{Jahr}$, d.h. ein Direkteinschlag erfolgt alle 11,7 Jahre.

Wird der Stephansdom dagegen als hohe bauliche Anlage eingeordnet, wird (4) genutzt, und die Anzahl von direkten Blitzeinschlägen ergibt sich zu $N_{Tall} = 0,63/\text{Jahr}$. Nach (5) sind davon 30% Aufwärtsblitze, d.h. 0,19/Jahr.

Es spricht auch hier einiges dafür, den Stephansdom als hohe bauliche Anlage einzuordnen, d.h. es wird im Folgenden der Wert N_{Tall} verwendet.

5.5 Uhrturm, Graz

Der Uhrturm wird in erster Näherung als rechteckförmige bauliche Anlage mit einer Grundfläche von 8 m x 8 m und einer Höhe von 28 m betrachtet. Wenn man das Dach detaillierter modelliert, werden dadurch die Ergebnisse kaum beeinflusst. Der Uhrturm steht alleine auf einer Hügelspitze. Der Wert der Blitzdichte kommt wieder vom österreichischen Blitzortungssystem ALDIS. Die Daten für die Berechnung sind in **Tabelle 6** zusammen gestellt.

Tabelle 6 Daten für die Berechnung von N_D für den Uhrturm

L	W	H	C_D	N_G
8 m	8 m	28 m	2	2,4/(km ² ·year)

Nach (3) ergibt sich $m = 2,5$. Dies führt nach (2) zu einer Einfangfläche von $A_D = 18.130 \text{ m}^2$. Daraus ergibt sich schließlich aus (1) die Anzahl der direkten Blitzeinschläge zu $N_D = 0,087/\text{Jahr}$, d.h. ein Direkteinschlag erfolgt alle 11,5 Jahre.

6 Messergebnisse

Für die ausgewählten baulichen Anlagen werden die Messergebnisse mit der erwarteten Anzahl von direkten Blitz-

einschlägen verglichen. Zurzeit wird dieser Vergleich nur für die Anzahl der Blitzeinschläge vorgenommen. Wegen der noch zeitlich begrenzten Betriebszeit des Blitzstrommesssystems und damit der begrenzten Anzahl von Blitzeinschlägen erscheint es noch nicht sinnvoll, weitere Analysen zu den Blitzstromparametern Scheitelwert, Ladung und Spezifische Energie vorzunehmen. Dafür ist eine breitere statistische Basis erforderlich.

Tabelle 7 Betriebsdaten für die installierten Blitzstrommesssysteme

<i>Untersuchte bauliche Anlage</i>	<i>Blitzstrommesssystem installiert seit</i>	<i>Monate Betrieb</i>
Hermannsdenkmal, Detmold	Juli 2012 – April 2015	34
Burj Khalifa, Dubai	Aug. 2013 – April 2015 (14 Mon. Unterbrechung)	7
Großer Belt Brücke, Seeland	June 2013 – April 2015	23
Stephansdom, Wien	Mai 2014 - April 2015	12
Uhrturm, Graz	Juli 2013 – April 2015	22

Tabelle 7 zeigt die Betriebsdaten des Blitzstrommesssystems bis Ende April 2015. **Tabelle 8** gibt die Anzahl der gemessenen direkten Blitzeinschläge an seit dem jeweiligen Beginn der Aufzeichnungen, zusammen mit der Anzahl der erwarteten direkten Blitzeinschläge, so wie gemäß Abschnitt 5 berechnet. N_{Meas} ist die real gemessene Anzahl der Blitzeinschläge im Betriebszeitraum, N_{Exp} ergibt sich aus den pro Jahr gültigen Werten für N_D und N_{Tall} multipliziert mit dem Betriebszeitraum (Tabelle 7).

<i>Untersuchte bauliche Anlage</i>	<i>Anzahl gemessener Blitzeinschläge N_{Meas}</i>	<i>Anzahl erwarteter Blitzeinschläge N_{Exp}</i>
Hermannsdenkmal, Detmold	1	0,45
Burj Khalifa, Dubai	4	61 - 12 abwärts - 49 aufwärts
Großer Belt Brücke, Seeland	1	7,8 - 3,0 abwärts - 4,8 aufwärts
Stephansdom, Wien	0	0,63 - 0,44 abwärts - 0,19 aufwärts
Uhrturm, Graz	0	0,16

Tabelle 8 Gemessene und erwartete direkte Blitzeinschläge

Wie direkt ersichtlich, ist die Betriebszeit der Blitzstrommesssysteme für übliche bauliche Anlagen (Abschnitte 5.1 und 5.5) zu kurz, um einen sinnvollen Vergleich gemessener und erwarteter Werte vorzunehmen. Da Blitzeinschläge hier nur rel. selten vorkommen, sind längere Aufzeichnungszeiträume erforderlich.

Für die hohen baulichen Anlagen stehen allerdings bereits Daten zur Verfügung. Allerdings ist in beiden Fällen

(Burj Khalifa und Großer Belt Brücke) die Anzahl gemessener Direkteinschläge wesentlich kleiner als die Anzahl der erwarteten. Mögliche Gründe für diese Abweichung sind:

- Gleichung (4) überschätzt die Anzahl der Direkteinschläge in solche ein Gebäude wie den Burj Khalifa. Der Gültigkeitsbereich von (4) ist für ein Gebäude mit einer Höhe von über 800 m nicht mehr gegeben.
- Die Blitzdichte in Dubai könnte wesentlich geringer sein als nach „NASA’s global map of lightning frequency“ abgeschätzt. Dies könnte auch für die Großer Belt Brücke gelten.
- Das Blitzstrommesssystem registriert nicht alle Blitzströme mit gleicher Wahrscheinlichkeit. Die Kalibrierung des Systems zeigt, dass im Messbereich $5\text{ kA} \leq \hat{I} \leq 200\text{ kA}$ der Strommessfehler kleiner 10% ist. Wenn allerdings auf einen Aufwärtsblitz kein Abwärtsblitz mit „klassischen“ Blitzstromparametern folgt, könnte der Triggerlevel des Systems im Bereich von 5 kA nicht erreicht werden. Dies könnte insbesondere für eine größere Anzahl von Aufwärtsblitzen der Fall sein.
- Wenn nur die Anzahl der erwarteten Abwärtsblitze mit den Messungen verglichen wird, stellt sich eine zumindest befriedigende Übereinstimmung heraus. Das könnte ebenso wieder mit der hohen Anzahl von Aufwärtsblitzen, die wegen der vermutlich geringeren Stromstärke nicht vom System registriert werden, erklärt werden. Obwohl das Messsystem dynamisch in der Lage ist, Folgeblitze oder sogar Langzeitströme zu erfassen, stellt die minimale Amplitude von 5 kA hier die wesentliche Einschränkung dar, falls auf einen stromschwachen Aufwärtsblitz kein Abwärtsblitz folgt.
- Bei einigen baulichen Anlagen ist das Blitzstrommesssystem nur an einer von mehreren parallelen Ableitungen installiert. Hier ist es abhängig von der konkreten Blitzeinschlagstelle, welcher Anteil des gesamten Blitzstroms über die überwachte Ableitung fließt. Ist dieser Anteil kleiner 5 kA, wird der Impuls nicht mehr sicher als Blitzstrom erkannt. Damit wird in diesen baulichen Anlagen ein Teil der direkten Blitzeinschläge, nämlich die stromschwächeren, nicht oder nur mit geringerer Wahrscheinlichkeit registriert. An einigen Bauwerken sind bis zu 3 Sensoren an mehreren Ableitungen installiert. Eine Messung wird dann aufgezeichnet, wenn der Strom in mindestens einem der Sensoren die untere Schwelle von 5kA überschreitet. Stromaufteilung in den verschiedenen Ableitungen sowie die dadurch bedingte untere Messschwelle sind Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.

Einige dieser Fragen könnten beantwortet werden (1) nach einer längeren Betriebszeit der Blitzstrommesssysteme, (2) wenn die Blitzstromparameter der gemessenen Blitzströme mit in die Untersuchung integriert werden und (3) wenn die konkrete Einbausituation der Blitzstrommesssysteme noch besser analysiert ist.

7 Literatur

- [1] M. Wetter, A. Kiefer, A. Zirkel: Blitzstrommessung in Windenergieanlagen. 9. VDE/ABB Blitzschutztagung, 2011, Konferenzband S. 59 – 63.
- [2] IEC 62305-2, "Protection against Lightning - Part 2: Risk management". Edition 2, 2010.
- [3] K. Scheibe, C. Birk, S. Schmarbeck, "Blitzstrommessung für künftige Offshore-Windparks in der Nordsee", 8. VDE/ABB Blitzschutztagung, 2009, Konferenzband S. 51-56.
- [4] M. Manhardt, F. Heidler, K. Stimper, "Enhanced Lightning Measuring Setup at the Peissenberg Tower and First Results", 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cagliari, Italy, 2010. Paper 1A-1239.
- [5] IEC 1662, "Assessment of the risk of damage due to lightning". 1995.
- [6] Z. Flisowski, and C. Mazzetti, "Risk analysis," in Lightning Protection, V. Cooray, Ed. IET Power and Energy Series, London, 2010, pp. 443-474.
- [7] A.J. Eriksson, "Lightning and tall structures", in Trans. South African IEE 69, 1978, pp. 2-16.
- [8] A.J. Eriksson, D.V. Meal, "The incidence of direct lightning strikes to structures and overhead lines," in Lightning and Power Systems, London, 1984. IEE Conf. Publ. No. 236, pp. 67-71.
- [9] CIGRE WG C4.407, "Lightning Parameters for Engineering Applications," Report No. 549, 2013.