

# Optimiertes optisches Blitzortungssystem und erste Messergebnisse

## Optimized Optical Lightning Detection System and First Results

M.Sc. Christian Paul, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Deutschland, christian.paul@unibw.de  
Prof. Dr., Fridolin H. Heidler, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Deutschland, fridolin.heidler@unibw.de  
Dr., Wolfgang Schulz, ALDIS – OVE Service GmbH, Wien, Österreich, w.schulz@ove.at

### Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein neuartiges optisches Blitzortungssystem vorgestellt. Das System, das nachfolgend mit OLDS (Optical Lightning Detection System) bezeichnet wird, basiert auf einer einzigen Videokamera, die in einer Achse zu einem konvexen Spiegel montiert ist. Diese Bauweise ermöglicht mit einer einzigen Kamera eine 360° Rundumsicht. Die Kamera ist in der Lage 60 Bilder pro Sekunde aufzunehmen. Das kurze Zeitintervall zwischen den einzelnen Bildern (16,6 ms) ermöglicht eine Differenzierung zwischen einzelnen Teilblitzen. Der eigentliche Ortungsvorgang basiert auf einer Richtungsbestimmung mit Hilfe des aufgenommenen Kamerabildes und auf einer Entfernungsberechnung über die Laufzeit des Donners. Insgesamt wurden 37 Blitze mit 52 Teilblitzen (Returnstrokes) im Zeitraum vom 09. Mai bis zum 13. August 2018 vom OLDS aufgezeichnet. Die Ortungsdaten des OLDS wurden mit den Ortungsdaten des europäischen Blitzortungsnetzwerks EUCLID verglichen. Dieser Vergleich zeigte eine Detektionsrate des EUCLID-Netzwerks von 95% für Blitze und 94% für Teilblitze. Ferner zeigte sich, dass das EUCLID-Netzwerk 84% der detektierten Blitze korrekt als Erd-Blitze klassifiziert, während die verbliebenen 16% der detektierten Blitze von EUCLID fälschlicherweise als Wolke-Blitze klassifiziert wurden. Im Mittel (arithmetisch) wies ein vom OLDS erfasster Blitz 1,4 Teilblitze, mit durchschnittlich 1,2 Fußpunkten auf. Die mittlere Entfernung der Fußpunkte aller Teilblitze zum Aufstellort des OLDS betrug 5,6 km. Das OLDS konnte die Blitze mit einer Abweichung von 238 m (arithmetisches Mittel) bzw. 171 m (geometrisches Mittel), verglichen mit den EUCLID Blitzortungsdaten, lokalisieren.

### Abstract

This paper introduces a newly developed optical lightning detection system (OLDS). The OLDS is based on a video system using a camera with a 360° panorama view and a frame rate of 60 frames per second. The OLDS locates the lightning from the direction of the illuminated lightning channel and the travel time of the thunder sound. The analysis is based on 37 flashes containing 52 strokes, which occurred during the time period from 9th of May 2018 to 13th of August 2018. The results are compared to data obtained by the European lightning location network EUCLID. The comparison revealed a flash detection efficiency of 95% and a stroke detection efficiency of 94% for EUCLID. EUCLID classified the fraction of 84 % correctly as cloud-to-ground lightning and only 16 % of the events were miss-classified as cloud-to-cloud lightning. On average (arithmetic mean), the flashes detected by the OLDS contained 1.4 return strokes with 1.2 different striking points. The average striking distance was about 5.6 km. The OLDS located the lightning with a deviation of 238 m (arithmetic mean) and 171 m (geometric mean) compared to the data of EUCLID.

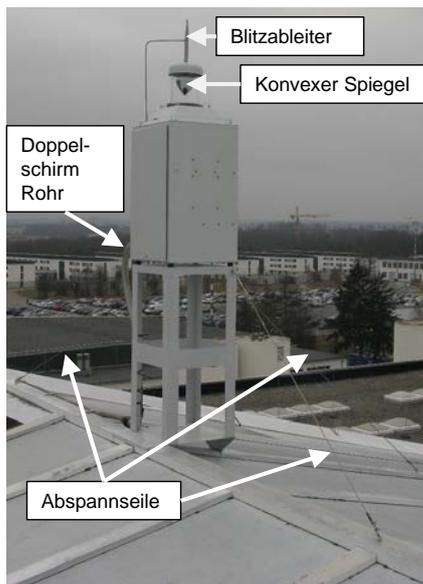
## 1 Einleitung

Ein Blitz besteht aus mehreren Teilblitzen (Returnstrokes) [1]. Jeder Teilblitz ist mit einem Stoßstrom verbunden, dessen maximaler Stromwert  $I_p$  mit dem Maximalwert des abgestrahlten elektrischen Feldes korreliert [2]. Die Helligkeit des Blitzkanals ist ebenfalls vom Wert des durch ihn fließenden Stroms abhängig [3-5]. Um Blitze zu orten, können verschiedenste Methoden genutzt werden. Es kann beispielsweise die Ankunftszeit des vom Blitz abgestrahlten elektrischen Feldes an einzelnen Messsensoren zur Ortung eines Blitzes genutzt werden (TOA-Methode). Bei dieser Methode werden mindestens 3 Sensoren benötigt, um einen Blitz zu orten [6-7]. Die Genauigkeit eines auf dieser Methode basierenden Blitzortungssystems liegt im Bereich einiger hundert Meter [8-9]. Das europäische Blitzortungssystem (EUCLID), dessen Daten in diesem

Beitrag verwendet werden, basiert in den Grundzügen auf der TOA-Methode. Das EUCLID-Netzwerk bestimmt jedoch zusätzlich einen Peilwinkel, der eine Ortung bereits mit lediglich 2 Sensoren ermöglicht.

Speziell langsam ansteigende Blitzströme mit niedrigen maximalen Stromwerten, strahlen nur schwache elektrische Felder ab, die vom EUCLID-Netzwerk nur schwer erfasst werden können. Beispielsweise Aufwärtsblitze, die nahezu ausschließlich aus einem einleitenden Langzeitstrom ICC bestehen, können von klassischen Blitzortungssystemen normalerweise nicht erfasst werden [8-10]. Daher werden optische Blitzortungssysteme zur Ergänzung klassischer Blitzortungssysteme genutzt. Die von Hopf vorgestellte „all-sky video camera“ basiert beispielsweise auf einem 360°-Panoramabild [12]. Doujak und Pack

konnten mit ihrem unkonventionellen optischen Blitzortungssystem bereits eine Ortungsgenauigkeit von weniger als 100 m erreichen [11].



**Bild 1** Fotografische Aufnahme des OLDS

Das in diesem Beitrag vorgestellte optische Blitzortungssystem (OLDS) verwendet ebenfalls 360°-Panoramabilder, die von einer einzigen Kamera aufgezeichnet werden. Die im OLDS eingesetzte Videokamera ist in der Lage 60 Bilder pro Sekunde aufzuzeichnen. Der Operationsradius liegt im Bereich von etwa 10 km um den Aufstellort des OLDS. Der Operationsradius ist begrenzt, da sich die ankommenden Donnergeräusche bei Blitzen in größeren Entfernungen nicht mehr eindeutig zuordnen lassen. Der Einschlagort des (Teil-)Blitzes wird beim OLDS aus der Richtung des leuchteten Blitzkanals und der Signallaufzeit des Donnergeräuschs ermittelt. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des OLDS werden die gewonnenen Daten anschließend mit den Daten des EUCLID-Systems verglichen [13]. Diese Analyse beinhaltet 37 Blitze mit insgesamt 52 Teilblitzen, die im Zeitraum vom 09. Mai bis zum 13. August 2018 erfasst wurden.

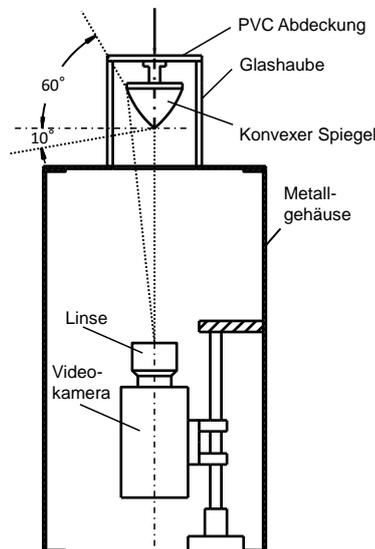
## 2 Optisches Blitzortungssystem

Bild 1 zeigt ein Foto des OLDS, das auf dem Dach der Universität der Bundeswehr München, in etwa 22 m Höhe über Grund, montiert ist. Das Kamerasystem ist elektromagnetisch abgeschirmt in einem Aluminium-Gehäuse untergebracht. Das Gehäuse ist mit drei Abspannseilen, zur mechanischen Stabilisierung, am Dach befestigt. Alle Zuleitungen wurden in Doppelschirmrohren verlegt. Des Weiteren befindet sich auf dem OLDS ein Blitzableiter zum Schutz gegenüber direkten Blitzeinschlägen.

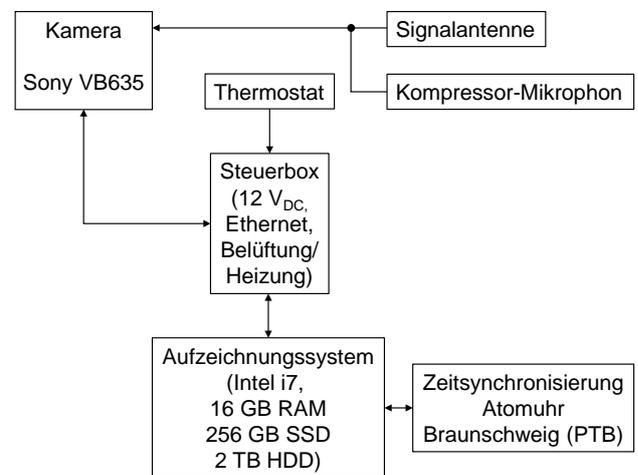
Der vom OLDS aufgezeichnete Blitzkanal wird mit 60 Bildern pro Sekunde gesamt, folglich können Teilblitze mit einer minimalen Zeitdifferenz von 16,7 ms erfasst werden.

Bild 2 zeigt eine schematische Darstellung des Videosystems, das sich innerhalb des OLDS befindet.

Die Videokamera ist vertikal, unterhalb eines rotations-symmetrischen konvexen Spiegels, montiert. Diese Anordnung ermöglicht eine 360°-Panoramaaufnahme der Umgebung mit nur einer Kamera. Der vertikale Aufnahmebereich (Elevationswinkel) liegt dabei zwischen -10° und 60° (Horizont: 0°).



**Bild 2** Schematische Zeichnung des Videosystems innerhalb des OLDS

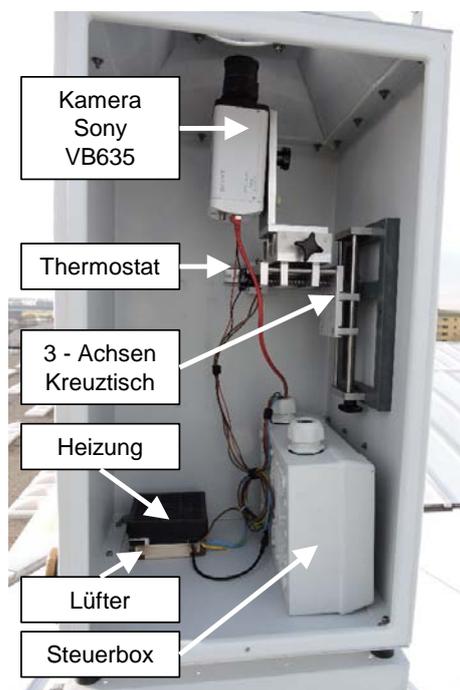


**Bild 3** Funktionsdiagramm des OLDS

Bild 3 zeigt das Funktionsdiagramm des Gesamtsystems. Die Videokamera vom Typ „Sony – VB635“ hat eine Auflösung von 1920x1080 Pixeln, mit einem Objektiv variabler Brennweite von 5 bis 50 mm. Zusätzlich ist ein Graufilter montiert, um den Kontrast zu verstärken. Zur Aufnahme des Donnergeräuschs wird ein Kompressor-Mikrofon verwendet, das mit dem „line-in“-Eingang der Kamera verbunden ist. Das Kompressor-Mikrofon unterdrückt die Umgebungsgeräusche, nur signifikante Änderungen des

Geräuschpegels, wie beispielsweise Donnerrollen, werden aufgezeichnet. Ein Teil des Mikrofon-Kabels ist in ungeschirmten Rohren verlegt und fungiert somit als elektrische Signalantenne. Das vom Blitz abgestrahlte elektrische Feld erzeugt eine Spannungseinkopplung im Mikrofon-Kabel, die als zusätzliches charakteristisches Geräusch wahrgenommen werden kann. Die Zeitdifferenz zwischen diesem charakteristischen Geräusch und dem ankommenden Donnerrollen, wird als Signallaufzeit des Donnergeräuschs ausgewertet.

Bild 4 zeigt eine fotografische Aufnahme des OLDS mit geöffnetem Gehäusedeckel. Die Kamera ist an einem in der Höhe verstellbaren Schlitten montiert, der gleichzeitig eine Bewegung in der XY-Ebene ermöglicht. Diese Konstruktion ermöglicht eine präzise Justierung der Kamera in der Rotationsachse des konvexen Spiegels. Die Kamera wird durch eine 12 V Gleichspannungsquelle versorgt, die in einer zusätzlichen Kontrollbox untergebracht ist. Die Kontrollbox verfügt über eine Ethernet-Schnittstelle zur Verbindung der Kamera mit dem Aufzeichnungssystem. Das Aufzeichnungssystem befindet sich im zweiten Obergeschoss des Universitätsgebäudes, etwa 10 m unterhalb des OLDS. Im OLDS-Gehäuse sind zusätzlich eine Lüftung sowie eine temperaturgeregelte Heizung verbaut, um die Bildung von Feuchtigkeit und somit ein Beschlagen des Kameraobjektivs zu verhindern.

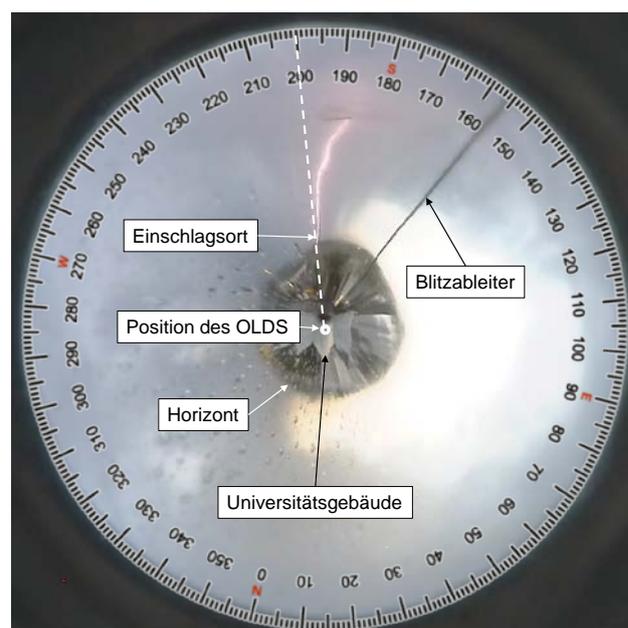


**Bild 4** Fotografische Aufnahme des OLDS bei geöffnetem Gehäusedeckel.

Das Aufzeichnungssystem basiert auf einem Computer mit einem Prozessor vom Typ „Intel-Core i7“, 16 GB Arbeitsspeicher sowie einer 256 GB großen SSD-Festplatte. Zusätzlich ist eine 2 TB große HDD-Festplatte installiert, die vom Aufzeichnungssystem als Ringspeicher verwendet

und somit kontinuierlich beschrieben wird. Die maximale Aufnahmedauer beträgt 14 Tage. Innerhalb dieses Zeitfensters ist der Bediener des OLDS gezwungen, relevantes Videomaterial extern zu sichern und somit ein Überschreiben durch das System zu verhindern. Das Aufzeichnungssystem erzeugt zu jedem aufgenommen Einzelbild einen Zeitstempel. Dieser ist mit dem Zeitserver der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) verbunden. Die Zeitsynchronisierung ist dabei mittels eines NTP-Clients realisiert, das Synchronisierungs-Intervall beträgt 1 Minute. Die maximale zeitliche Abweichung beider Systeme beträgt weniger als 1 ms.

Bild 5 zeigt ein Einzelbild einer Videoaufnahme des OLDS Kamerasystems. Auf dem Bild ist der leuchtende Blitzkanal eines Teilblitzes zu sehen. Der sichtbare innere Kreis entspricht dem Horizont (Elevationswinkel:  $0^\circ$ ). Der sichtbare äußere Kreis entspricht dem Himmel (Elevationswinkel:  $60^\circ$ ). Der Erdboden (Elevationswinkel:  $-10^\circ$  bis  $0^\circ$ ) ist innerhalb des inneren Kreises abgebildet. Die Unterscheidung zwischen Wolke- und Erd-Blitzen kann sehr einfach anhand ihrer Berührungspunkte mit den beiden Kreisen erfolgen. Nur ein Erd-Blitz berührt sowohl den äußeren wie auch den inneren Kreis. Ein Wolke-Blitz findet nahezu ausschließlich zwischen diesen beiden Kreisen statt. Eine Berührung des inneren Rings findet niemals statt.



**Bild 5** Leuchtender Blitzkanal eines Returnstrokes in einem vom OLDS aufgezeichneten Einzelbild.

Um eine Bestimmung der Richtung des Teilblitzes durchführen zu können, wurde das Bild mit einer Kompassrose überblendet, die auf den äußeren der beiden Kreise projiziert wird. Ein Winkel von  $0^\circ$  markiert Norden, folglich markiert ein Winkel von  $180^\circ$  Süden. Der Fußpunkt des Blitzkanals in Bild 5 ist bei etwa  $200^\circ$  anzunehmen. Der Einschlagort wird sowohl über die beschriebene Feststellung der Richtung, als auch über die Laufzeit des Donner-

geräuschs bestimmt. Dabei wird eine Ausbreitungsgeschwindigkeit des Donnerrollens von 343 m/s (Schallgeschwindigkeit) angenommen. Somit besteht ein vollständiger Messdatensatz aus dem Richtungswinkel, der berechneten Entfernung sowie dem erzeugten PTB synchronisierten Zeitstempel. Die schwarze Linie in Bild 4 (etwa 164 °) zeigt die Projektion des am OLDS-Gehäuse montierten Blitzableiters (siehe Bild 1).

### 3 Europäisches Blitzortungssystem

Das EUCLID-Netzwerk basiert auf einer Kooperation der Blitzortungssystembetreiber in Europa. Bild 6 zeigt einen Ausschnitt einer Europakarte mit den Standorten des OLDS und der EUCLID-Sensoren. Das EUCLID-Netzwerk umfasst insgesamt 169 Sensoren, davon sind 34 vom Typ „IMPACT ES/ESP“ und 135 vom Typ „LS700X“ (Stand: Mai 2019). Alle verwendeten Sensormodelle werden von der Firma Vaisala hergestellt und arbeiten im selben Frequenzbereich (1-350 kHz). Ferner arbeiten die Sensoren mit individuellen Verstärkungen und Trigger-Schwellen um die Empfindlichkeit lokalen Gegebenheiten anzupassen.



**Bild 6** Europakartenausschnitt mit den Standorten des OLDS und der EUCLID-Sensoren (Stand: Mai 2019)

Die Daten aller im Netzwerk betriebener Sensoren werden in „Echtzeit“, durch einen Zentralcomputer, verarbeitet. Dies soll die Einheitlichkeit der Daten innerhalb des europäischen Blitzortungssystems sicherstellen. Weitere Informationen zur gegenwärtigen Leistungsfähigkeit des EUCLID-Systems können [9] entnommen werden.

### 4 Messergebnisse

Im Zeitraum vom 09.05.18 bis 13.08.18 konnten 37 Blitze mit insgesamt 52 Teilblitzen aufgezeichnet werden. 29 der 37 Blitze waren von negativer Polarität, die verbliebenen 8 Blitze waren von positiver Polarität.

Da die Zeitdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einzelbildern mit 16,7 ms relativ kurz ist, kann der aufleuchtende Blitzkanal jedes Teilblitzes sicher vom OLDS erfasst werden. Ferner kann eine Feststellung der Anzahl an Fußpunkten erfolgen.

#### 4.1 Anzahl der Teilblitze

Alle 8 positiven Blitze wiesen keine Folgeblitze auf. Bei 16 der 29 verbliebenen negativen Blitze (55%) trat lediglich ein erster Teilblitz auf, es konnte kein Folgeblitz identifiziert werden. Die verbliebenen 13 negativen Blitze (45%) wiesen maximal 3 Teilblitze auf. Im arithmetischen Mittel (AM) traten 1,4 und im geometrischen Mittel (GM) 1,3 Teilblitze pro Blitz auf. In der Literatur traten bei vergleichbaren Untersuchungen 3-5 Teilblitze pro Blitz auf [1]. Im Mittel ist nach [14][15] mit 4,6 Teilblitzen pro Blitz zu rechnen.

#### 4.2 Anzahl der Fußpunkte

Alle 8 positiven Blitze wiesen nur einen Fußpunkt auf. Von den verbliebenen 29 negativen Blitzen waren 13 multiple Blitze. 6 dieser 13 multiplen Blitze wiesen maximal 3 unterschiedliche Fußpunkte auf. Im Mittel (AM) traten somit 1,2 Fußpunkte pro Blitz auf. Gemäß der Literatur ist mit etwa 1,4 bis zu 1,7 Fußpunkten pro Blitz zu rechnen [16][17][18][19].

#### 4.3 Detektionsrate von EUCLID

Das EUCLID-Netzwerk hat von den 37 aufgezeichneten Blitzen 35 erfasst. Dies entspricht einer Detektionsrate von 95%. Ferner konnten 49 der 52 Teilblitze vom EUCLID-System erfasst werden. Dies entspricht einer Detektionsrate von 94% für Teilblitze. 41 dieser 49 erfassten Teilblitze wurden vom EUCLID-Netzwerk als Erd-Blitze klassifiziert. Die verbliebenen 8 erfassten Teilblitze hat das EUCLID-Netzwerk als Wolke-Blitze klassifiziert. Somit wurden insgesamt 16% der erfassten Teilblitze vom EUCLID-Netzwerk falsch klassifiziert.

#### 4.4 Maximale Stromwerte von EUCLID

Tabelle 1 zeigt den arithmetischen (AM) und geometrischen (GM) Mittelwert sowie den minimalen und maximalen Stromwert  $I_p$  der 49 vom EUCLID-Netzwerk erfassten Teilblitze.

Die 8 positiven Teilblitze weisen einen maximalen Stromwert  $I_p$  im Bereich von 7,6 kA bis zu 155,6 kA auf. Im Mittel (AM) beträgt der maximale Stromwert 48,6 kA (GM: 33,4 kA). Die verbliebenen 41 negativen Teilblitze weisen betragsmäßig einen maximalen Stromwert  $I_p$  im Bereich von 4,2 kA bis zu 35,2 kA auf. 27 der 41 Teilblitze waren Erstblitze mit einem maximalen Stromwert  $I_p$  im Bereich von 4,2 kA bis zu 34,6 kA. Im Mittel (AM) beträgt der maximale Stromwert 11,9 kA (GM: 10,2 kA). Der maximale Stromwert  $I_p$  der 14 Folgeblitze wies einen Wert

tebereich von 4,6 kA bis zu 35,2 kA auf. 8 der 14 Folgeblitze verliefen im gleichen Blitzkanal (Folge-G), wie der vorausgehende Erstblitz. Ihr maximaler Stromwert  $I_p$  liegt im Bereich von 6,6 kA bis zu 35,2 kA. Im Mittel (AM) beträgt der maximale Stromwert 12,9 kA (GM: 11,2 kA). Die verbliebenen 6 Folgeblitze nutzten einen anderen Blitzkanal (Folge-A), wie der vorausgehende Erstblitz. Ihr maximaler Stromwert  $I_p$  liegt im Bereich von 4,6 kA bis zu 17,3 kA. Im Mittel (AM) beträgt der maximale Stromwert 10,5 kA (GM: 9,7 kA).

| Polarität | Typ     | Anzahl | $I_p$ [kA]<br>AM/GM | $I_{p,min}$<br>[kA] | $I_{p,max}$<br>[kA] |
|-----------|---------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Positiv   | Erster  | 8      | 48,6 /<br>33,4      | 7,5                 | 155,6               |
| Negativ   | Erster  | 27     | 11,9 /<br>10,2      | 4,2                 | 34,6                |
|           | Folge-A | 6      | 10,5 / 9,7          | 4,6                 | 17,3                |
|           | Folge-G | 8      | 12,9 /<br>11,2      | 6,6                 | 35,2                |

AM: Arithmetischer Mittelwert GM: Geometrischer Mittelwert

Folge-A: Folgeblitz im neuen Blitzkanal

Folge-G: Folgeblitz im gleichen Blitzkanal

**Tabelle 1** Stromparameter der 49 vom EUCLID-Netzwerk erfassten Teilblitze

#### 4.5 Ortungsgenauigkeit des OLDS

Die folgende Analyse der Ortungsgenauigkeit bezieht sich auf die bereits vorgestellten Messdaten der 49 vom EUCLID-Netzwerk erfassten Teilblitze. Die Ortungsgenauigkeit des OLDS versteht sich als die Abweichung zu den vom EUCLID-Netzwerk bestimmten Winkeln und Entfernungen vom Aufstellort des OLDS. Der Operationsradius des OLDS umfasste einen Bereich von 990 m bis zu 11,7 km um den Aufstellort des OLDS. Im arithmetischen Mittel betrug die Entfernungsabweichung zwischen den Datensätzen des OLDS und des EUCLID-Netzwerks 238 m (GM. 171 m). Der arithmetische Mittelwert der Winkelabweichung betrug  $2,7^\circ$  (GM:  $1,9^\circ$ ).

## 5 Diskussion

In diesem Beitrag wird ein neuartiges optisches Messgerät vorgestellt, mit dem Blitze analysiert und lokalisiert werden können. Die Überprüfung der Leistungsfähigkeit des vorgestellten Systems wurde anhand von Ortungsdaten des EUCLID-Systems überprüft.

Die optische Erfassung von Blitzen bietet den großen Vorteil, dass jeder Blitz bzw. jeder Teilblitz sicher, anhand seines leuchtenden Blitzkanals, erfasst werden kann. Ferner können Folgeblitze im gleichen oder benachbarten (neuen) Blitzkanal erfasst werden. Somit ist eine exakte Bestimmung der Anzahl an Fußpunkten pro Blitz möglich. Auch die erzielte Ortungsgenauigkeit des optischen Messsystems von 238 m liegt im Bereich der Ortungsgenauigkeit des kommerziellen EUCLID Blitzortungssystems.

## 6 Danksagung

Die Autoren danken EUCLID für die Bereitstellung der Blitzortungsdaten für diese Studie.

## 7 Literatur

- [1] V.A. Rakov and M.A. Uman, "Lightning - Physics and Effects", Cambridge University Press, 2003.
- [2] V. Cooray, "Lightning - Electromagnetics", Institute of Engineering and Technology, 2012.
- [3] G. Diendorfer, M. Mair and W. Schulz, "Detailed brightness versus lightning current amplitude correlation of flashes to the Gaisberg tower", ICLP Poland, 2002.
- [4] G. Diendorfer, M. Viehberger, M. Mair and W.Schulz, "An attempt to determine currents in lightning channel branches from optical data of a high speed video system", Int. Aerospace and Ground Conf. Lightning and Static Electricity, UK, I03-8 PMY, 2003.
- [5] V.P. Idone and R.E. Orville, "Correlated peak relative lightning intensity and peak current in triggered lightning subsequent return strokes", J.Geophys. Res., Vol. 90, S. 6159-6164, 1985.
- [6] F. Heidler and K. Stimpfer, "Lightning and Lightningprotection", VDE-Verlag, 2009.
- [7] G. Diendorfer and F. Rachidi, "Measurement techniques for lightning currents indirect measurement of lightning peak currents using far fields and LLSs", EMCSI Washington D.C., 2017.
- [8] A. Nag, M.J. Murphy, W. Schulz and K.L. Cummins, "Lightning locating systems: Insights on characteristics and validation techniques", J.Geophys. Res. - Earth and Space Science, Vol. 2, S. 65-93.
- [9] W. Schulz, G. Diendorfer, S. Pedeboy 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, S. 595-605, 2016.
- [10] G. Diendorfer, H. Pichler and W. Schulz, "LLS Detection of Upward Initiated Lightning Flashes", APL Nagoya, 2015.
- [11] C. Doujak and S.Pack, "Unconventional optical lightning-locating-system", VIII SIPDA Sao Paulo, 2005
- [12] C. Hopf, "Transient electric fields by close lightning discharges", Dissertation an der Universität der Bundeswehr München, 1995.
- [13] W. Schulz, C. Vergeiner, H. Pichler, G. Diendorfer and K. Cummins, "Location accuracy evaluation of the Austrian lightning location system ALDIS", 22nd ILDC Broomfield, 2012.
- [14] V.A. Rakov and M.A. Uman, "Some properties of negative cloud-to-ground lightning", ICLP Interlaken, 1990.
- [15] V.A. Rakov and M.A. Uman, "Some properties of negative cloud-to-ground lightning flashes versus

stroke order", J. Geophys. Res., Vol. 95, S. 5447-5453, 1990.

- [16] V. A. Rakov, M. A. Uman, and R. Thottappillil, "Review of lightning properties from electric field and TV observations," J. Geophys. Res. Atmos., vol. 99, no. D5, S. 10745-10750, 1994.
- [17] A. Hermant, Traqueur d'orages, 2000.
- [18] W. C. Valine and E. P. Krider, "Statistics and characteristics of cloud-to-ground lightning with multiple

ground contacts," J. Geophys. Res. Atmos., vol. 107, no. D20, S. 4441, 2002.

- [19] M. M. F. Saba, M. G. Ballarotti, and O. J. Pinto, "Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations," J. Geophys. Res. Atmos., vol. 111, no. D3, p. D03101, 2006.

## 8 Autor (en)



Christian Paul, geboren 1991. Studierte von 2010 bis 2015 Elektrotechnik an der RWTH Aachen. Er erlangte 2013 den Bachelor of Science im Bereich elektrischer Antriebe. 2015 erlangte er den Master of Science im Bereich hochspannungstechnischer Schaltgeräte. Seit 2016 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Blitzforschung an der Universität der Bundeswehr München.



Fridolin H. Heidler, geboren 1955. Erlangte 1978 den Bachelor of Science und 1982 den Master of Science im Bereich Elektrotechnik an der TU München. 1987 folgte die Promotion zum Dr. Ing. an der Universität der Bundeswehr München. Von 1987 bis 1991 war er Mitarbeiter der IABG im Bereich elektrodynamischer Berechnungen. Seit 1991 arbeitet er am Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Blitzforschung an der Universität der Bundeswehr München. Im Jahr 2007 erfolgte eine Berufung auf die Professur für Hochspannungstechnik. Derzeitig ist er Autor bzw. Co-Autor von mehr als 160 wissenschaftlichen Publikationen.



Wolfgang Schulz, geboren 1966. Erlangte 1992 den Diplom-Ingenieur an der TU Wien. Von 1992 bis 1997 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Wien tätig und promovierte 1997 zum Dr. Ing.. Derzeitig ist er Mitarbeiter beim Österreichischen Blitzortungssystem (ALDIS). Er ist Autor bzw. Co-Autor von mehr als 100 wissenschaftlichen Publikationen.