

Blitzentladungen gezielt auslösen und einfangen – Utopie oder Wirklichkeit?

Friedhelm Noack • Peter Hasse

Werden dünne Drähte mit Raketen unter Gewitterwolken hoch geschossen, können künstliche Blitzentladungen ausgelöst werden. Diese Triggertechnik wird inzwischen routinemäßig für Forschungs- und Testzwecke eingesetzt. Daneben gibt es Vorschläge und Versuche, Blitzentladungen gezielt durch die Anwendung von Laser-, Mikrowellen-, Flammen- oder Wasserstrahlen auszulösen. Keiner dieser Versuche hat bisher zu einem Erfolg geführt. Die Versuche, durch kleinräumige Veränderungen der Ionisierungsbedingungen an den Fangstangen (früher durch radioaktive Präparate, heute durch spezielle Elektrodenanordnungen oder Funkenerzeugung) verbesserte Schutzbedingungen zu schaffen, haben sich als wirkungslos erwiesen oder lieferten keine eindeutigen Beweise.

Die Versuche, Blitzentladungen zu triggern, entstanden zunächst aus dem Bestreben, die Natur der Blitzentladungen zu erforschen, Strom- und Feldverläufe zu messen und die Wirksamkeit der Schutzeinrichtungen zu erproben. Später kamen Überlegungen hinzu, die aus Laborversuchen bekannten Möglichkeiten zur Ionisierung von kurzen elektrischen Durchschlagstrecken auch auf natürliche Blitzentladungen zu übertragen.

Die Zielstellungen zur Entwicklung aktiver Blitzschutzsysteme gehen davon aus, dass es mit diesen Systemen möglich sein sollte, die Entladungen aus den Ge-

sind mit weiteren Erkenntnissen zum Entladungsmechanismus auch Verbesserungen möglich und notwendig, die sich z. B. aus der zunehmenden Errichtung sehr hoher Gebäude (ausgerechnet in gewitteraktiven Zonen) und großen Windenergieanlagen (WEA) ergeben. Die objektive Diskussion über die Wirksamkeit derartiger ionisierender Fangeinrichtungen wird durch massive Herstellerinteressen erheblich erschwert. Da mit diesen Produkten Gewinn zu erwirtschaften ist, werden sie verkauft (und z. T. in Standards verankert), ohne dass ein von der wissenschaftlichen Gemeinschaft akzeptierter Beweis ihrer Wirksamkeit erbracht wurde [1–2].

Prof. Dr.-Ing. habil. Friedhelm Noack (66) ist Direktor des Instituts für Elektrische Energie- und Hochspannungstechnik an der TU Ilmenau. Er ist Vorsitzender des Ausschusses für Blitzschutz und Blitzforschung (ABB) im VDE.
E-Mail: fg-eet@tu-ilmenau.de



Dr.-Ing. Peter Hasse (62), VDE, ist seit 1981 Geschäftsführer bei der Dehn + Söhne GmbH & Co. KG in Neumarkt (Oberpf) und stellvertretender Vorsitzender des ABB im VDE. Er ist im Rahmen von technisch-wissenschaftlichen Institutionen, wie ABB, DKE/VDE, NE und IEC, an den nationalen und internationalen Normungsarbeiten maßgeblich beteiligt.
E-Mail: peter.hasse@dehn.de

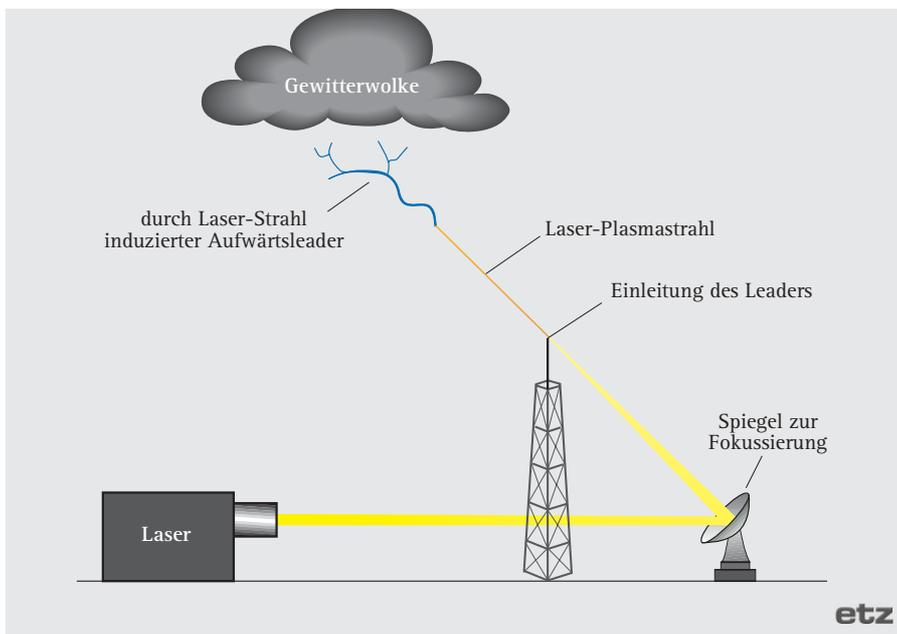


Bild 1. Anordnung zur Lasertriggerung eines Aufwärtsleaders von der Spitze eines hohen Turms

witterzellen auf bestimmte Punkte zur Erde abzuleiten. Damit soll ein direkter Blitzeinschlag in besonders gefährdete Gebäude und Anlagen verhindert werden. Diese Vorstellungen wurden im Besonderen durch die Entwicklung der Lasertechnik gefördert.

Zum anderen wurden Vorschläge entwickelt, die Schutzwirkung der seit über 250 Jahren vom Prinzip her bekannten und bewährten simplen passiven Fangeinrichtungen zu „verbessern“. Natürlich

Blitztriggerung mit Raketen

Das franklinische Drachenexperiment aus dem Jahre 1752 zur Ableitung von Ladungen aus einem Gewitterfeld über eine Schnur wurde ein Jahr später in modifizierter Form wieder aufgegriffen. Im Oktober 1753 gelang es Prof. *Gaicommo Battista Beccaria* in Turin/Italien mit Raketen, die dünne Drähte hinter sich herzogen, die Gewitterelektrizität nachzuweisen. Ab 1966 wurden durch Prof. *Morris M. Newman*, Florida/USA von ei-

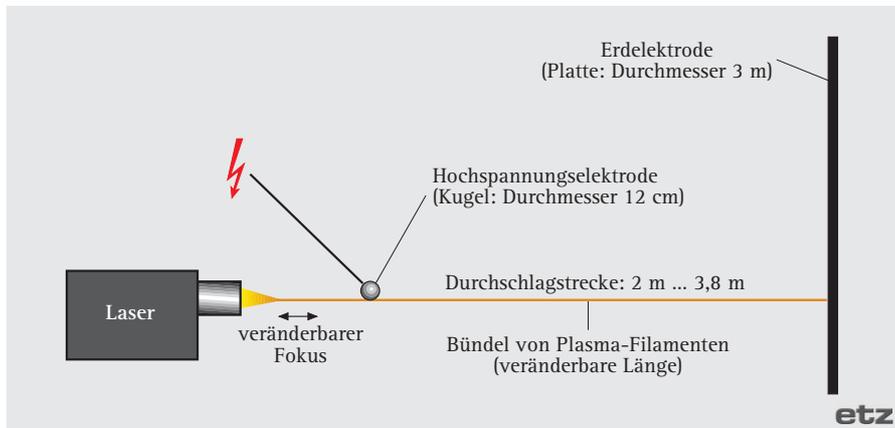


Bild 2. Laboranordnung zur Erzeugung laserstrahlgeführter Hochspannungsdurchschläge (nach [8])

nem Forschungsschiff aus mit dünnen Stahldrähten Blitze getriggert, deren Stromverlauf am Fußpunkt gemessen werden konnte. Die Experimente der Electricité de France (EDF, [3]) in St. Privat d'Allier im Massif Central in Frankreich bewiesen einige Jahre später, dass die Blitztriggerung auch auf dem Land möglich ist; ab 1973 wurden zahlreiche Blitzentladungen gemessen. In den folgenden Jahren wurden (z. T. zeitweilig) Blitztriggerstationen bei Bordeaux/Frankreich, in New Mexico/ USA, an der Elfenbeinküste (Afrika), in den USA, Japan und Deutschland in Betrieb genommen.

Wissenschaftliche Untersuchungen werden kontinuierlich vor allem durch Prof. Dr. Martin A. Uman und Prof. Dr. Vladimir A. Rakov von der Universität Florida am „International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT)“ in Camp Blanding, Florida/USA [4] durchgeführt.

Zur Auslösung eines Aufwärtsblitzes wird ein dünner Draht einige 100 m hoch geschossen. Durch das Verdampfen des Drahts wird ein leitfähiger Kanal geschaffen, in welchem dann Abwärtsblitze, entsprechend den natürlichen Folgeblitzen, abgeleitet werden. In ihrer Empfindlichkeit gegenüber den meteorologischen Bedingungen bei Gewittern (Wind, Regen, Schnee, Nebel) sind alle „nicht konventionellen“ Verfahren der Drahttriggerung weit unterlegen. Dazu kommt, dass die Leitfähigkeit von Kupfer mit $\gamma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ S/m}$ um viele Größenordnungen größer ist als die Leitfähigkeit von Meerwasser mit $\gamma \approx 4 \text{ S/m}$ oder eines durch Laser erzeugten Plasmakanals von etwa $\gamma \approx 10^{-3} \text{ S/m}$.

Es muss festgestellt werden, dass für die erfolgreiche Durchführung der Experimente ein großer Erfahrungsschatz erforderlich ist und dass längst nicht alle Raketenschüsse erfolgreich triggern. Für

praktische Schutzzwecke wäre diese Technik denkbar ungeeignet, da herabfallende Drähte und Raketenreste Gefährdungen darstellen können.

Blitztriggerung mit Laserstrahlen

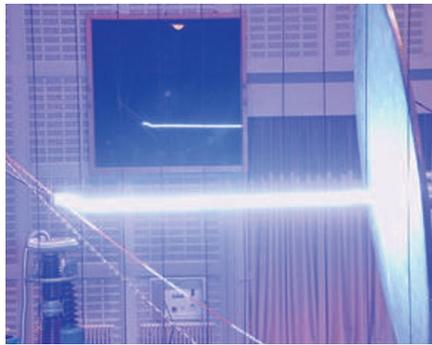
Seit den 1970er-Jahren ist aus Laborversuchen in zahlreichen Ländern (USA, Japan, Sowjetunion) bekannt, dass sich durch Laserstrahlen die Durchschlagsspannung elektrischer Funkenstrecken herabsetzen und der Durchschlagkanal geradlinig führen lässt. Daraus lässt sich jedoch noch nicht ableiten, dass eine Blitztriggerung unter natürlichen Bedingungen tatsächlich möglich ist [5].

Versuche mit Hochenergie-Infrarotlasern (Kohlendioxid- oder Neodymium-Laser) zeigten, dass entlang des Strahls hoch ionisierte, hoch dichte „Plasmaperlen“ entstehen, die ihrerseits wieder die Strahlausbreitung behindern. Wahrscheinlich ist dieser geperlte Plasmakanal von sich aus nicht in der Lage, das elektrische Feld so zu beeinflussen, dass ein Blitz tatsächlich getriggert wird. Feldversuche im Rahmen eines internationalen Programms zur Gewitterforschung (1978/1979) schlugen fehl. Deshalb wurde vorgeschlagen, einen hohen Metallturm (zur Beeinflussung des elektrischen Felds) in Kombination mit einem Laserstrahl (zur Auslösung eines sich selbst fortpflanzenden Aufwärtsleaders von der Turmspitze) einzusetzen (Bild 1). Versuche in Japan (seit 1995/1999) an einem 50 m hohen Turm auf einem 200 m hohen Berg mit mehrfachen 1-kJ/50-ns-Impulsen lieferten nicht die erwarteten Ergebnisse.

Die von den zur Zeit verfügbaren Lasern erzeugten Anfangsleitfähigkeiten der Plasmakanäle liegen etwa bei $\gamma = 10^{-3} \text{ S/m}$, d. h. drei bis vier Zehnerpotenzen unter einer Leitfähigkeit von etwa $1 \text{ S/m} \dots 10 \text{ S/m}$, die nach theoretischen



Bild 3. Stoßspannungsdurchschlag [6–7]
a) ohne Laser



b) laserstrahlgeführt

Analysen notwendig ist, um den Übergang von einem Plasmakanal in einen thermisch ionisierten Leader-Kanal innerhalb von $1 \mu\text{s}$ zu ermöglichen. Der gegenwärtige Stand der Erkenntnisse ist, dass ohne den Einsatz von Mehrfach-Laserstrahlen eine Triggerung von Blitzen nicht möglich ist.

Vorgeschlagen wurde in den USA auch der Einsatz von Ultraviolettlasern mit ultrakurzen Femtosekunden-Pulsen ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$), die durch Multiphotonionisation ein Plasma von geringer Dichte erzeugen, das für die Laserstrahlung durchlässig ist. Um einen Plasmakanal ausreichender Leit-

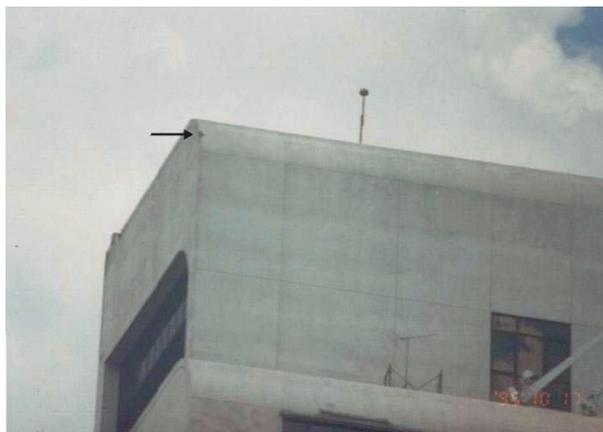


Bild 4. Wasserkanone zur Blitztriggerung [12]



Bild 5. Blitzschäden am „Shahzan Tower“ [17] („Bypass-Schäden“ innerhalb des vom Hersteller der Dynasphere angegebenen Schutzraums)

a) Frontansicht des Gebäudes



b) „Bypass-Schäden“ (li. neben Dynasphere), mit Pfeil markiert

fähigkeit für eine genügend lange Zeit (einige Mikrosekunden) zu erzeugen, müsste ein zusätzlicher Laserstrahl eingesetzt werden. Solche Laser werden von Forschergruppen in den USA und Japan entwickelt.

Einen anderen Weg ist eine deutsch-französische Forschergruppe gegangen [6–8]: Sie entwickelten einen mobilen Laser mit 5 TW Spitzenleistung, Pulsdauern von 70 fs... 100 fs, 350 mJ Pulsenergie und 10 Hz Wiederholungsfrequenz. Die ultrakurzen Hochleistungs-Laserpulse ha-

ben eine starke elektromagnetische Wirkung; die Laserpulse verändern den Brechungsindex der Luft. In einem dynamischen Gleichgewicht zwischen Selbstfokussierung und laserinduzierter Brechung entstehen dünne, hoch ionisierte Filamente, die einen Durchmesser von $100 \mu\text{m}$ aufweisen und bis zu 200 m lang sein können. Aus dem ursprünglich infraroten Laserstrahl entsteht ein Filamentbündel weißen Lichts mit einem Spektrumkontinuum von $\lambda = 300 \text{ nm}$ bis 4,6 mm. Damit konnten Reichweiten von

10 km... 15 km erreicht werden. Aus der Spektralanalyse des aufgefangenen Streulichts können die chemische Zusammensetzung der Luft und kleinste Luftverschmutzungen bestimmt werden.

Es wird vermutet, dass der Laser neben seiner Anwendung als Atmosphären-Detektor auch zur Blitztriggerung entwickelt werden könnte. Für die ionisierten Filamente wurde eine Elektronendichte von $6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ abgeschätzt. Im Hochspannungslabor der TU Berlin [9] wurden im Jahr 2001 Durchschlagversuche an einer Elektrodenanordnung mit etwa 2 m... 3,8 m Elektrodenabstand und Blitzstoßspannungen ($1,2/50 \mu\text{s}$) bis etwa 2 MV durchgeführt (Bild 2).

Der Laserstrahl wurde leicht fokussiert und sehr dicht an der Hochspannungselektrode vorbei geführt. Der Startpunkt des Filamentbündels ($0,5 \text{ cm} \dots 1 \text{ cm}$ Durchmesser und 4 m... 5 m Länge) konnte eingestellt werden. Wenn die Plasmafilamente die Strecke überbrückten ($R \approx 10^5 \dots 10^6 \Omega$), wurden laserstrahlgeführte, geradlinige Durchschläge erreicht, wobei die Durchschlagsspannung auf etwa 68 % gegenüber der in der natürlichen Luftstrecke reduziert wurde (Bild 3).

Für eine erfolgreiche Triggerung ist es notwendig, dass der Laserpuls wenige Mikrosekunden nach dem Maximum des Hochspannungsimpulses einsetzt. In einigen Fällen wurde der Durchschlag nur über einen Teil der Durchschlagstrecke vom Laser geleitet, und danach entwickelte sich der natürliche Durchschlagmechanismus (Leader).

Trotz dieser bemerkenswerten Ergebnisse und des damit verbundenen euphorischen Medienspektakels muss festgestellt werden, dass eine Durchschlagentwicklung über größere Entfernungen, im Besonderen unter den Freiluftbedingungen eines Gewitters, noch nicht durchgeführt wurde und damit noch keine Aussage darüber möglich ist, ob sich das System zur Blitztriggerung eignet.



Mikrowellen- und Flammenstrahlen

Japanische Forscher schlugen 1996 vor, einen Hochenergie-Mikrowellenstrahl zu nutzen, um einen schwach ionisierten Plasmastrahl zu erzeugen. Der Vorteil sollte eine geringere Dämpfung des Strahls bei Regen und Schnee gegenüber Laserstrahlen sein. Weitere Aktivitäten sind nicht bekannt.

Ebenfalls aus Japan wurde 1996 über einen Versuch berichtet, eine hoch ionisierte transiente Flamme zur Blitztriggerung einzusetzen. Auf der Spitze eines 50 m hohen Turms wurde unter Gewitterbedingungen durch einen Raketenmotor ein transienter Flammenstrahl von 10 m Länge erzeugt, der sich mit einer Geschwindigkeit von 1 000 m/s ausbreitete. Es wurde kein Blitz ausgelöst.

Wasserstrahlen zur Blitztriggerung?

1960 war beobachtet worden, dass ein Blitzeinschlag in eine Meerwasserfontäne erfolgte, die durch eine Unterwasserexplosion ausgelöst wurde.

Die japanischen Untersuchungen 1992/1993 in einem Prüffeld mit einer 3,5-m-Überschlagsstrecke und 2,5 MV Stoßspannung zeigten, dass ein Überschlag entlang des Wasserstrahls stattfinden kann, wobei bei reinem Wasser (65 Ω m) die Durchschlagsspannung um etwa 20 % und bei Salzwasser (0,8 Ω m) um etwa 50 % geringer ist als bei der reinen Luftstrecke. Aus den Erfahrungen mit der Triggerung wird geschätzt, dass die Salzwasserstrahlen über bestimmte Zeiten mindestens 100 m hoch sein müssten. Außerdem wird es neben der Umweltbelastung als besonders fragwürdig angesehen, ob sich wegen des Zerfalls der Wassersäulenspitze überhaupt ein Leitpfad für eine Entladung einstellen kann. Unbeeindruckt davon wurde 2002 von der US-Firma Bolt Blocker, San Diego, Kalifornien/USA [10] das Konzept für eine patentierte Wasserkanone [11] vorgestellt (Bild 4,) (die zwar erst noch entwickelt und erprobt werden muss), die aber geeignet sein soll, Sportstadien durch kurzzeitige Fontänen zu schützen [12].

Es wird eingeschätzt, dass es trotz weiterer Entwicklungen in der Lasertechnik in absehbarer

Zeit wohl keine allgemein verfügbaren (und bezahlbaren) aktiven Schutzsysteme geben wird, mit denen Blitze gezielt ausgelöst und abgeleitet werden können.

Early Streamer Emission devices (ESE) – ionisierende Fangeinrichtungen

B.Sc. Zainal Abidin Hartono und B.Sc. Ibrahim Robiah haben sowohl auf der 25th International Conference on Lightning Protection (ICLP) im September 2000 in Griechenland [13] als auch auf dem VI. International Symposium on Lightning Protection (SIPDA) im November 2001 in Brasilien [14] von ihren Untersuchungen über die Wirksamkeit von ionisierenden Fangeinrichtungen berichtet (vgl. auch Konferenzberichte [15–16]).

Ihre Beobachtungen richteten sich hauptsächlich auf ESE-Einrichtungen, die seit 1990 in Kuala Lumpur (der Hauptstadt Malaysias) und den umgebenden Satelliten-Städten im Klang Valley installiert worden sind.

Kuala Lumpur mit 200 Gewittertagen pro Jahr und besonders das Gebiet des Klang Valley mit über 250 Gewittertagen pro Jahr (und mehr als 20 Blitzen pro km² und Jahr) bieten ideale Voraussetzungen für derartige Beobachtungen unter natürlichen Bedingungen.

Z. A. Hartono und I. Robiah gingen bei ihren über zehn Jahre andauernden Untersuchungen wie folgt vor:

- Zuerst katalogisierten sie die zu beobachtenden mit Blitzschutzanlagen versehenen Gebäude nach Baujahr, Höhe, Länge, Breite; dabei nahmen sie auch Daten über benachbarte Gebäude auf,
- weiterhin registrierten sie die Daten der installierten Fangeinrichtungen (Datum der Installation, Typ/Hersteller, Anzahl),

- vor dem ersten Blitzschlag fotografieren sie die so ausgerüsteten Gebäude,
- nach Gewittern kontrollierten sie diese Gebäude auf sichtbare Blitzschäden und machten ggf. von jeweils denselben Standorten aus wieder Fotografien (mit eingblendetem Datum), zählten und lokalisierten die Einschlagpunkte – also beschädigte Stellen am Gebäude, herrührend von Blitzen, die nicht von den Fangeinrichtungen aufgefangen wurden und nannten sie „Bypass-Schäden“.

In [14] finden sich die so gewonnenen Daten von mehr als 100 Gebäuden mit insgesamt mehr als 200 derartiger „Bypass-Schäden“, die bis zum Mai 2001 ermittelt wurden. Die meisten Gebäude waren mit zentral angeordneten ESE-Geräten (elf verschiedene Typen unterschiedlicher Hersteller) nach Herstellerangaben ausgerüstet. An drei Gebäuden war die Anzahl der „Bypass-Schäden“ besonders groß:

- elf (seit 1990) in den 170 m hohen mit einer Dynasphere-Fangeinrichtung versehenen „Shahzan Tower“ (Bild 5),
- sieben (seit 1995) in das ebenfalls 170 m hohe und mit zwei Dynasphere-Fangeinrichtungen ausgerüsteten Gebäude „Villa Putri“ (Bild 6), wo vier „Bypass-Schäden“ nach Gewittern innerhalb von nur sieben Monaten fotografiert wurden,
- zwei (seit 1998) an dem (nur) 20 m hohen „Royal Selangor Club“ (ausgerüstet mit einem Dynasphere).

In [17–18] berichten Z. A. Hartono und I. Robiah, dass auf größeren/höheren Gebäuden, die seit 1990 mit zentral angeordneten ESE-Geräten ausgerüstet waren und trotzdem „Bypass-Schäden“ erlitten, seit 1995 weitere ESE-Einrichtungen nachgerüstet wurden und an ihnen wiederum „Bypass-Schäden“ auftraten, darunter auch solche „Bypass-Schäden“,



Bild 6. „Bypass-Schäden“ am Villa-Putri-Gebäude, ausgerüstet mit zwei ESE-Fangeinrichtungen [17]
a) Gesamtansicht des mit zwei Dynasphere versehenen Gebäudes



b) Nahaufnahme: Die schwarzen Pfeile zeigen auf die „Bypass-Schäden“ (innerhalb des vom Hersteller angegebenen Schutzraums)



Bild 7. „Bypass-Schäden“ (Pfeil) dicht unterhalb des ESE-Geräts Dynasphere [17]

a) Gesamtansicht

b) vom Blitz getroffene Dachecke

die sich zwischen zwei dicht nebeneinander stehenden ESE-Einrichtungen ereigneten.

In diesem Bericht ist weiterhin ein „Bypass-Schaden“ dokumentiert (Bild 7), der sich nur einige Meter neben und einige Meter unterhalb eines Dynasphere-Geräts ereignet hat. In [13] wird empfohlen, ESE-Geräte nicht für den Schutz von Gebäuden einzusetzen, besonders nicht in Gebieten mit hoher Gewitterhäufigkeit. In [14] wird in der Zusammenfassung der hier geschilderten umfangreichen Untersuchungen festgestellt, dass ESE-Geräte keinen größeren Schutz als herkömmliche Fangeinrichtungen bieten.

Literatur

- [1] Noack, F.: Über die Wirksamkeit von ESE-Fangeinrichtungen. S. 9–20 in VDE-Fachbericht 56. Der Blitzschutz in der Praxis. 3. VDE/ABB-Blitzschutztagung. Ausschuss für Blitzschutz und Blitzforschung (ABB) im VDE (Hrsg.). Vorträge der 3. VDE/ABB-Blitzschutztagung am 28.10.–29.10.1999 in Neu-Ulm. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG, 1999
- [2] Noack, F.: Early Streamer Emission devices – Verbesserung des Blitzschutzes? etz Elektrotech. + Autom. 123 (2002) H. 3–4, S. 22–24
- [3] Electricité de France (EDF), Paris/Frankreich: www.edf.fr
- [4] International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT), Camp Blanding, Florida/USA: www.lightning.ece.ufl.edu
- [5] Rakov, V. A.: Review of „non-conventional“ approaches to triggering lightning discharges. S. 1–8 in Recent Res. Devel. Geophysics Vol. 4. Trivandrum, Kerala/Indien: Research Signpost, 2002
- [6] Wille, H.; Rodriguez, M.; Kasparian, J.; Mondelain, D.; Yu, J.; Mysyrowicz, A.; Sauerbrey, R.; Wolf, J. P.; Wöste, L.: Teramobile: A mobile femtosecond-terawatt laser and detection system. Eur. Phys. J. AP 20 (2002) H. 3, S. 183–190
- [7] Französisch-deutsches Forschungsprojekt „Teramobile“, Lyon/Frankreich: www.teramobile.org
- [8] Rodriguez, M.; Sauerbrey, R.; Wille, H.; Wöste, L.; Fujii, T.; André, Y.-B.; Mysyrowicz, A.; Klingbeil, L.; Rethmeier, K.; Kalkner, W.; Kasparian, J.; Salmon, E.; Yu, J.; Wolf, J.-P.: Triggering and guiding megavolt discharge by use of laser-induced ionized filaments. Opt. Lett. 27 (2002) H. 9, S. 772–774
- [9] Technische Universität Berlin, Institut für Energie- und Automatisierungstechnik, Fachgebiet Energieversorgung/Hochspannungsnetze: http://ihs.ee.tu-berlin.de
- [10] Boltblocker Inc., San Diego, Kalifornien/USA: www.boltblocker.com
- [11] Palmer, D. A.: Method and apparatus for the artificial triggering of lightning. Patentschrift. US-Patent 6,012,330 vom 11.1.2000
- [12] Palmer, D. A.: Water Jet Triggering System for the Protection of People and High-Value Assets from Lightning. Whitepaper. Online-Dokument unter www.boltblocker.com/BoltBlocker.pdf
- [13] Hartono, Z. A.; Robiah, I.: A study of non-conventional air terminals and stricken points in a high thunderstorm region. S. 357–361 in Proceedings of the 25th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 18.9.–22.9.2000, Rhodos/Griechenland. Rion/Griechenland: University of Patras, 2000
- [14] Hartono, Z. A.; Robiah, I.; Darvenzia, M.: A database of lightning damage caused by bypasses of air terminals on buildings in Kuala Lumpur, Malaysia. S. 211–216 in Proceedings of the VI. International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), 19.11.–23. 11. 2001 in Santos/Brasilien. São Paulo/Brasilien: Institute of Electrotechnics and Energy of the University, 2001
- [15] Zischank, W.; Heidler, F.; Brocke, R.; Zahlmann, P.: ICLP 2000 – Internationale Blitzschutzkonferenz. etz Elektrotech. + Autom. 122 (2001) H. 1–2, S. 14–19
- [16] Hasse, P.: Blitzschutzkonferenz – International Symposium on Lightning Protection. etz Elektrotech. + Autom. 123 (2002) H. 3–4, S. 39–41
- [17] Hartono, Z. A.; Robiah, I.: The field intensification method (FIM): An assessment based on observed bypass data on real buildings in Malaysia. Public comment submitted to the Australian standardization committee. EL-24, September 2002
- [18] Standards Australia. Committee EL-024 Protection against lightning, Sydney/Australien: <https://committees.standards.au/COMMITTEES/EL-024>