

Positive Blitzentladungen

Vladimir A. Rakov

Bei der Erforschung positiver Blitze sind in den letzten beiden Jahrzehnten bemerkenswerte Fortschritte gemacht worden. Das Verständnis der Eigenschaften positiver Blitzentladungen ist jedoch immer noch deutlich geringer als das negativer Entladungen. Positive Wolke-Erde-Blitze scheinen in höherem Maße als negative den Wolke-Wolke-Entladungen verwandt. Einige Entladungsprozesse in der Wolke verursachen offensichtlich elektrische und magnetische Feldsignale, deren Charakteristika in Verlauf und Amplitude positiven Erdblitzes ähnlich sind. Es ist deshalb schwierig positive Erdblitzes aufgrund des abgestrahlten Felds ohne zusätzliche Informationen über den Kanalverlauf sicher zu identifizieren.

Positive Blitzentladungen haben in letzter Zeit aus folgenden Gründen beträchtliches Interesse geweckt:

- Die höchsten Strom-Scheitelwerte (bis etwa 300 kA) und der höchste Ladungstransfer zur Erde (einige 100 C) werden positiven Blitzen zugeordnet (Bild 1),
- positive Blitze können der dominierende Entladungstyp von Wolke-Erde-Blitzen sein, z. B. während der kalten Jahreszeit oder im Endstadium einer Gewitterwolke,
- positive Blitze wurden vor kurzem als Hauptquelle für bestimmte Erscheinungen in der mittleren und oberen Atmosphäre (z. B. Sprites) erkannt,
- zuverlässige Identifikation positiver Entladungen ist von großer Bedeutung für viele Untersuchungen, die auf Daten von Blitz-Ortungssystemen basieren.

Die verschiedenen Charakteristika positiver Blitzentladungen werden in diesem Übersichtsbeitrag behandelt. Im Besonderen wird gezeigt, dass die bekannte Statistik der 26 von K. Berger gemessenen positiven Entladungen [1] wahrscheinlich eine Mischung aus zwei verschiedenen Entladungstypen ist.

Positive Blitze: Generelle Merkmale

Positive Blitze bestehen üblicherweise nur aus einer Hauptentladung, während etwa 80 % der negativen Blitze zwei oder mehr Teilblitze enthalten [2]. Zwar gibt es multiple positive Blitze, sie sind jedoch relativ selten. Auf der Basis der Messung des elektrischen Felds (1995 bis 1997 in Deutschland) fand F. Heidler [3], dass von 36 positiven Blitzen 32 nur eine Hauptentladung enthielten. Die restlichen vier Blitze bestanden aus zwei Teilblitzen. Andererseits wird in [4] erwähnt, dass von 2,7 Mio. positiven Blitzen 1 002 mehr als zehn Teilblitze enthielten. Diese Daten beruhen auf Messungen des nordameri-

kanischen Blitz-Ortungssystems (U. S. National Lightning Detection Network NLDN der Global Atmospheric Inc. [5]) während 14 ausgewählten Sommermonaten in den Jahren 1991 bis 1995. Eine Reihe der genannten 1 002 Ereignisse sind jedoch wahrscheinlich Wolke-Wolke-Blitze, die fälschlicherweise als positive Blitze identifiziert wurden.

Positiven Hauptentladungen folgen häufig Langzeitströme die typischerweise einige 10 ms bis einige 100 ms dauern [6–8]. Aus simultanen Messungen des elektrischen Felds mit mehreren Messstationen hat M. Brook et al. [9] auf Langzeitströme

bei positiven Blitzen geschlossen: Mit mehr als 10 kA (für eine Zeitdauer bis zu 10 ms) übertreffen sie die Langzeitströme negativer Blitze um etwa eine Größenordnung. Direkt gemessene positive Langzeitströme im Bereich von einigen kA bis einigen 10 kA sind in Bild 1 nach dem einleitenden Impuls-Blitzstrom zu erkennen (Wintergewitter in Japan, [10]). Derart hohe Langzeitströme sind vermutlich die Ursache des ungewöhnlich großen Ladungstransfers bei positiven Blitzen. Für einen positiven Blitz in einem Wintergewitter in Japan wurde [9] ein Ladungstransfer während der ersten 4 ms von über 300 C abgeleitet. Der von K. Berger [11] abgeschätzte Ladungstransfer während der ersten 2 ms für positive Blitze bei Sommergewittern in der Schweiz war in der Größenordnung von mehreren 10 C. Auf der Basis direkter Strommessungen berichtet K. Miyake et al. [12] einen Ladungstransfer in der Größenordnung von 1 000 C sowohl für positive als auch für negative Blitze bei japanischen Wintergewittern. Dies können jedoch untypische Entladungsformen sein, da sich die Spitze des Messobjekts sehr nahe oder innerhalb der Wolken befand.

Aus Messungen des elektrischen Felds ist bekannt, dass den positive Hauptent-

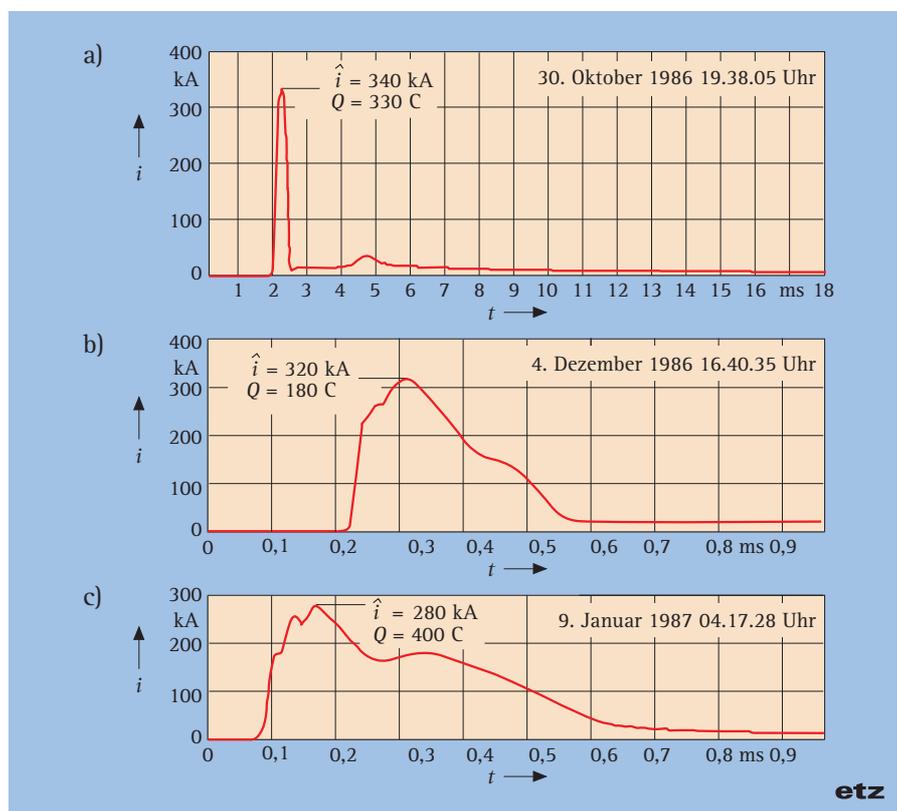


Bild 1. Ströme von drei positiven Blitzen in Japan [10]

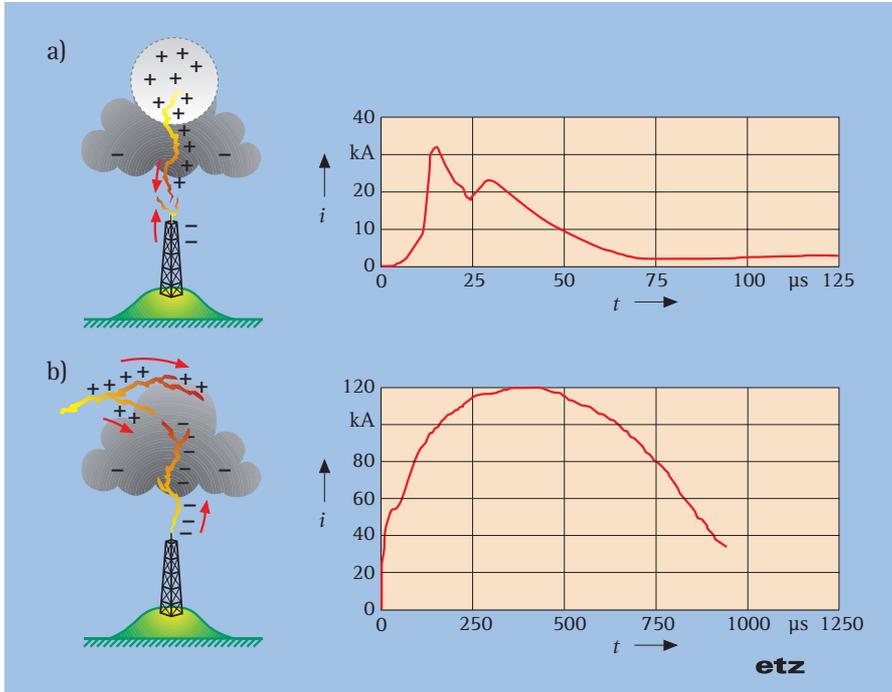


Bild 2. Beispiele zweier Typen von positiven Blitzstrom-Verläufen

(nach Messungen von K. Berger [1, 11]):

a) „Mikrosekunden“-Stromverlauf

b) „Millisekunden“-Stromverlauf

ladungen eine signifikante Entladungsaktivität innerhalb der Wolke vorausgeht. Im Mittel dauert diese Aktivität mehr als 100 ms [6] oder 200 ms [7]. Diese Beobachtung legt den Schluss nahe, dass positive Entladungen zur Erde von einem Seitenast einer ausgedehnten Wolkenentladung initiiert werden können.

Mehrere Blitzforscher [6, 13] berichten, dass positive Blitzentladungen häufig lange horizontale Kanäle von bis zu einigen 10 km aufweisen

Anscheinend können positive Leitblitze sowohl kontinuierlich als auch in Ruckstufen vorwachsen. Dies steht im Gegensatz zu negativen Leitblitzen, die immer in Ruckstufen aufleuchten. Auch ist aus Messungen des elektrischen und magnetischen Felds bekannt, dass positive Blitze

seltener kurze Impulse vor der Hauptentladung aufweisen als negative. Ferner ist die VHF-Abstrahlung positiver Leitblitze normalerweise geringer als die negativer.

Strom-Scheitelwerte: Statistische Verteilung

Eine wirklich gesicherte statistische Verteilung für Strom-Scheitelwerte positiver Blitze liegt gegenwärtig nicht vor. Der in [1] analysierte Datensatz der 26 von K. Berger gemessenen positiven Blitzströme ist offenbar eine Mischung von zwei Entladungstypen:

- Entladungen, die durch einen von der Wolke vorwachsenden positiven Leitblitz und eine einige 10 m lange, von der Turmspitze ausgehende negative Fangentladung eingeleitet werden,

- Entladungen, die von einem sehr langen, von der Turmspitze ausgehenden negativen Aufwärts-Leitblitz eingeleitet werden. Dieser „kontaktiert“ innerhalb der Wolke einen entgegengesetzt geladenen Entladungskanal.

Diese beiden Typen positiver Entladungen unterscheiden sich durch die Höhe über dem Turm, in der sich die aufwärts gerichtete Fangentladung mit dem entgegengesetzt geladenen Kanal (herabwachsender positiver Leitblitz oder positiv geladener Entladungskanal innerhalb der Wolke) verbindet. Es ist zu erwarten, dass diese unterschiedlichen Entladungsformen auch zu sehr unterschiedlichen Blitzströmen im Turm führen (Bild 2). Eine Skizze des möglichen Entladungsprozesses ist in Bild 2 jeweils links gezeigt.

Der „Mikrosekunden“-Stromverlauf in Bild 2a resultiert wahrscheinlich aus Vorgängen, die einem negativen Abwärtsblitz ähnlich sind, während der „Millisekunden“-Stromverlauf in Bild 2b wohl auf einen Ladungstransfer zur Erde wie bei M-Komponenten [20] zurückzuführen



Prof. Dr. Vladimir A. Rakov lehrt an der Universität von Florida/USA an der Fakultät für Elektro- und Computertechnik. In mehr als 200 Veröffentlichungen hat er sich mit verschiedenen Aspekten der Blitzforschung befasst. V. A. Rakov studierte an der Polytechnischen Universität Tomsk/Russland, wo er auch promoviert wurde. Er ist Mitglied zahlreicher Organisationen (IEEE, SAE) und wissenschaftlichen Komitees (CIGRE, ICLP, ICOLSE).
E-Mail: rakov@ece.ufl.edu

M-Komponenten

Bei einer negativen Wolke-Erde-Blitzentladung wird auf der Erde ein Strom mit negativer Polarität gemessen. Nur in diesem Typ von Blitzentladung wird eine sehr komplexe Abfolge von Stromanteilen beobachtet. Dabei tritt zunächst der erste Hauptblitz auf, der ein stromstarker Impuls von einigen 10 kA Scheitelwert ist und dessen Scheitelwert, Ladung und spezifische Energie einer Normalverteilung unterliegt. Wichtig ist, dass die Stromsteilheit des ersten Hauptblitzes relativ gering ist. Nun kommt es bei etwa 50 % aller negativen Wolke-Erde-Blitzen zur Ausbildung von negativen Folgeblitzen. Der Scheitelwert, die Ladung und die spez. Energie dieser negativen Folgeblitze ist im Vergleich zum ersten Hauptblitz deutlich geringer. Der wichtige Unterschied ist jedoch, dass die Stromsteilheit des negativen Folgeblitzes etwa zehnfach größer ist als beim ersten Hauptblitz. Das macht den negativen Folgeblitz so gefährlich für induzierte Spannungen. Wichtig ist weiterhin, dass die negativen Folgeblitze mehrfach nacheinander im Abstand von einigen 10 ms bis 100 ms

auftreten. Innerhalb des negativen Folgeblitzes wird nun ein Phänomen beobachtet, wie von Rakov [20] beschrieben:

Im Anschluss an den negativen Folgeblitz schließt sich unmittelbar eine Langzeitstromkomponente an, also ein Gleichstrom von einigen 100 A für eine Dauer von 1 s bis 2 s. Die Wirkung dieses Gleichstroms ist groß, wenn metallische Flächen getroffen werden, an denen beträchtliche Ausschmelzungen auftreten können. Die M-Komponente – benannt nach D. J. Malan, der diese Erscheinung in den 30er-Jahren entdeckt hat – ist eine doppelte Wanderwelle, die sich aus der bereits bestehenden Gleichstromentladung zwischen Wolke und Erde sozusagen überlagert. Eine Wanderwelle läuft vom Boden zur Wolke und umgekehrt eine Wanderwelle von der Wolke zur Erde. Dieser Effekt überlagert dem Gleichstrom einen Impulsstrom mit einem Scheitelwert von 100 A bis 200 A bei einer Pulsbreite von 300 μ s bis 500 μ s, wobei auch Werte von einigen kA auftreten können.

Prof. Dr.-Ing. Jan Meppelink, Universität GH Paderborn, Abt. Soest FB 16, Soest

ist. Es ist möglich, dass solche „Millisekunden“-Stromverläufe für hohe Objekte, von denen lange aufwärts gerichtete Fangentladungen ausgehen können, charakteristisch sind.

Die statistische Verteilung von Strom-Scheitelwerten positiver Blitze, die aus Messungen des elektrischen und magnetischen Felds von Blitz-Ortungssystemen abgeleitet werden, enthalten Wolke-Wolke-Blitze, die fälschlicherweise als positive Blitze identifiziert wurden. Dies beeinflusst jedoch vorwiegend das untere Ende (kleinere Strom-Scheitelwerte) der statistischen Verteilung. Der aus Daten von Blitz-Ortungssystemen bestimmte mittlere Strom-Scheitelwert ist im Winter größer

als im Sommer. R. E. Orville und G. R. Huffines [14] fanden aus Messungen des nordamerikanischen Blitz-Ortungssystems NLDN (National Lightning Detection Network [5]), dass der Mittelwert in den Gebieten des nördlichen Mittelwestens der USA 40 kA überschreitet, hingegen in Louisiana und Florida unter 10 kA liegt. Aus den Daten eines in der Nähe von Darwin/Australien platzierten Blitz-Ortungssystems wird in [15] die Tendenz abgeleitet, dass die positiven Blitze mit den höchsten Strom-Scheitelwerten vom oberen rückwärtigen (der Zugrichtung abgewandten) Bereich der Gewitterwolke ausgehen. Die Anlage in Darwin/Australien wurde zwischenzeit-

lich durch das landesweite Blitz-Ortungssystem Global Position and Tracking Systems (GPATS, [16]) ersetzt.

Vorwachs geschwindigkeit der Hauptentladung

Aus fotografischen Messungen haben D. M. Mach und W. D. Rust [17] Vorwachs geschwindigkeiten für sieben positive und 26 negative Hauptentladungen natürlicher Blitze ermittelt. Sie haben die Geschwindigkeiten in zwei Gruppen unterteilt:

- Mittelwerte für Blitzkanalsegmente mit weniger als 500 m Länge (vier Messungen positiver Blitze mit Längen von 332 m bis 433 m),
- Mittelwerte für Blitzkanalsegmente mit mehr als 500 m Länge (sieben Messungen positiver Blitze mit Längen von 569 m bis 2 300 m).

In der Gruppe mit Kanallängen unter 500 m wurde eine mittlere Vorwachs geschwindigkeit von $0,8 \cdot 10^8$ m/s für positive Blitze und $1,7 \cdot 10^8$ m/s für negative Blitze ermittelt. Weitere Messungen der Vorwachs geschwindigkeit werden von V. P. Idone et al. [18] für einen getriggerten Blitz und von M. Nakano et al. [19] für einen natürlichen positiven Blitz während eines Wintergewitters in Japan berichtet. Bei dem getriggerten Blitz handelte es sich um eine Mehrfachentladung mit sieben negativen und einem positiven Teilblitz. Für den positiven Teilblitz ergab sich eine Vorwachs geschwindigkeit von etwa 10^8 m/s. Die Werte für die sieben negativen Teilblitze lagen im Bereich von $0,9 \cdot 10^8$ m/s bis $1,6 \cdot 10^8$ m/s. Die Werte sind Mittelwerte über die unteren 850 m des Entladungskanals. Eine deutliche Abnahme der Vorwachs geschwindigkeit mit der Höhe im Blitzkanal von $2 \cdot 10^8$ m/s bei 310 m auf $0,3 \cdot 10^8$ m/s in 490 m wird in [19] berichtet. Auf diesem Gebiet ist noch erheblicher Forschungsbedarf gegeben.

Ausblick

Neue Erkenntnisse der Entladungsprozesse können durch Triggerung positiver Blitze mittels kleiner Raketen, die einen dünnen, geerdeten Metalldraht nach sich ziehen, gewonnen werden (Bild 3). Bisher war die künstliche Auslösung positiver Hauptentladungen noch nicht erfolgreich. Ursache hierfür ist möglicherweise, dass positive Blitze, wie eingangs erwähnt, meist nur eine einzige Stromkomponente aufweisen. Auf die Raketentriggierung von Blitzen übertragen bedeutet diese Eigenheit, dass eine positive Entladung nur aus dem einleitenden Langzeitstrom besteht und keine Hauptentladungen enthält. Manchmal folgen bei der Raketentriggierung dem einleitenden positiven



Bild 3. Triggerstation Camp Blanding, Florida/USA. Triggerung positiver Blitze mittels kleiner Raketen, die einen dünnen, geerdeten Metalldraht nach sich ziehen

Langzeitstrom negative Hauptentladungen. Ein positiver Langzeitstrom, gefolgt von einem abwärts gerichteten Leitblitz und einer Hauptentladung, die positive Ladung zur Erde führt, ist bisher jedoch noch nicht dokumentiert.

Literatur

- [1] Berger, K.; Anderson, R. B.; Kröninger, H.: Parameters of lightning flashes. *Electra* 80 (1975) S. 23–37
- [2] Rakov, V. A.; Uman, M. A.; Thottappillil, R.: Review of lightning properties determined from electric field and TV observations. *J. Geophys. Res.* 99 (1994) S. 10745–10750
- [3] Heidler, F.; Drumm, F.; Hopf, Ch.: Electric fields of positive earth flashes in near thunderstorms. voltage mains. Proceedings of 24th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 14.9.–18.9.1998 in Birmingham/Großbritannien, S. 42–47. Birmingham/Großbritannien: School of Engineering and Advanced Technology, 1998. Zu beziehen über Dr. Moofik Al-Tai, School of Engineering and Advanced Technology, P. O. Box 33, Beaconside, Stafford, ST18 0DF, United Kingdom
- [4] Lyons, W. A.; Uliasz, M.; Nelson, T. E.: Large peak current cloud-to-ground lightning flashes during the summer months in the contiguous United States. *Mon. Weather Rev.* 126 (1998) S. 2217–2223
- [5] www.glatmos.com
- [6] Fuquay, D. M.: Positive cloud-to-ground lightning in summer thunderstorms. *J. Geophys. Res.* 87 (1982) S. 7 131–7 140
- [7] Rust, W. D.; MacGorman, D. R.; Arnold, R. T.: Positive cloud to ground lightning flashes in

Abkürzungen

CIGRE	Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (à haute tension) (Internationale Hochspannungskonferenz)
GPATS	Global Position and Tracking Systems
ICLP	International Conference on Lightning Protection
ICOLSE	International Conference on Lightning and Statis Electricity
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
NLDN	National Lightning Detection Network
SAE	Society of American Engineers
VHF	Very High Frequency

- severe storms. *Geophys. Res. Lett.* 8 (1981) S. 791–794
- [8] Rust, W. D.; MacGorman, D. R.; Taylor, W. L.: Photographic verification of continuing current in positive cloud-to-ground flashes. *J. Geophys. Res.* 90 (1985) S. 6 144–6 146
- [9] Brook, M.; Nakano, M.; Krehbiel, P.; Takeuti, T.: The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorms. *J. Geophys. Res.* 87 (1982) S. 1 207–1 215
- [10] Goto, Y.; Narita, K.: Electrical characteristics of winter lightning. *J. Atmos. Terrestrial Phys.* 57 (1995) S. 449–459
- [11] Berger, K.: Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. *J. Franklin Inst.* 283 (1967) S. 478–525
- [12] Miyake, K.; Suzuki, T.; Shinjou, K.: Characteristics of winter lightning current on Japan Sea coast. *IEEE Trans. on Power Delivery* PWRD-7 (1992) S. 1 450–1 456
- [13] Rust, W. D.: Positive cloud-to-ground lightning, S. 41–45 in *The Earth's electrical environment/ Geophysics Study Committee, Geophysics Research Forum, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Resources, National Research Council. Studies in Geophysics, based on papers presented at an American Geophysical Union symposium in June 1983, Baltimore, Maryland/ USA. Washington D. C./USA: National Academy Press, 1986*
- [14] Orville, R. E.; Huffines, G. R.: Lightning ground flash measurements over the contiguous United States: 1995–1997. *Mon. Weather Rev.* 127 (1999) S. 2 693–2 703
- [15] Petersen, W. A.; Rutledge, S. A.: Some characteristics of cloud-to-ground lightning in tropical northern Australia. *J. Geophys. Res.* 97 (1992) S. 11 553–11 560
- [16] www.gpats.com.au
- [17] Mach, D. M.; Rust, W. D.: Two-dimensional velocity, optical risetime, and peak current estimates for natural positive lightning return strokes. *J. Geophys. Res.* 98 (1993) S. 2 635–2 638
- [18] Idone, V. P.; Orville, R. E.; Mach, D. M.; Rust, W. D.: The propagation speed of a positive lightning return stroke. *Geophys. Res. Lett.* 14 (1987) S. 1 150–1 153
- [19] Nakano, M.; Nagatani, M.; Nakada, H.; Takeuti, T.; Kawasaki, Z.: Measurements of the velocity change of a lightning return stroke with height. *Res. Lett. Atmos. Electricity* 7 (1987) S. 25–28
- [20] Rakov, V. A.; Thottappillil, R.; Uman, M. A.; Barker, P. P.: Mechanism of the lightning M component. *J. Geophys. Res.* 100 (1995) S. 25 701–25 710