

Die Anfangsphase von Aufwärtsblitzen

Megumu Miki • Takatoshi Shindo • Vladimir A. Rakov • Martin A. Uman • Keith J. Rambo • George H. Schnetzer • Gerhard Diendorfer • Martin Mair • Fridolin Heidler • Wolfgang Zischank • Rajeev Thottappillil • Daohong Wang

Die Merkmale des Stroms in der Anfangsphase und die Parameter von überlagerten Impulsströmen bei raketengetriggerten Blitzen sowie bei natürlichen Aufwärtsblitzen werden verglichen. Die globale Charakteristik der Anfangsphase raketengetriggelter Blitze und natürlicher Aufwärtsblitze ist vergleichbar mit einigen Abweichungen für den Fukui-Schornstein aufgrund des deutlich höheren Schwellwerts der Stromauflösung. Die überlagerten Impulsströme bei raketengetriggerten und bei natürlichen Aufwärtsblitzen unterscheiden sich jedoch deutlich. Die Impulsströme natürlicher Aufwärtsblitze scheinen von der geografischen Lage unabhängig zu sein.

Der Aufwärtsblitz – eine Einführung

Aufwärtsblitze werden von einem Leitblitz initiiert, der von einem geerdeten Objekt ausgehend in Richtung der geladenen Wolke emporwächst. Aufwärtsblitze weisen eine Anfangsphase auf, die durch einen Langzeitstrom mit einer Dauer von einigen 100 ms und einer Amplitude von einigen 10 A bis einigen 1000 A charakterisiert ist (Bild 1).

Dieser Anfangsphase folgen häufig eine oder mehrere Entladungen, die wie bei

In einer internationalen Gemeinschaftsstudie wird die Anfangsphase („initial stage“) von natürlichen Aufwärtsblitzen an hohen Objekten mit denen raketengetriggerten Aufwärtsblitze verglichen. Die Blitzmessungen erfolgten am 100 m hohen Turm des Gaisbergs in Österreich, am 160 m hohen Turm des Peißenbergs in Deutschland und am 200 m hohen Schornstein des Fukui-Kraftwerks in Japan.

Die Experimente mit raketengetriggerten Blitzen wurden am „International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT)“ in Camp Blanding, Florida/USA [1] durchgeführt. Alle Strommessungen in Japan sowie ein Großteil der Messungen in Deutschland und Österreich geschahen in den Wintermonaten, wogegen die Raketentriggerungen im Sommer stattfanden. Die analysierten Blitze transportierten negative Ladung zu Erde. Die Gesamtdauer, Gesamtladung und mittlere Stromamplitude der Anfangsphase von raketengetriggerten Blitzen und natürlichen Aufwärtsblitzen an hohen Objekten sind vergleichbar.

Die Impulsströme, die dem Langzeitstrom während der Anfangsphase überlagert sind, zeigen sich am Gaisberg, Peißenberg und am Fukui-Schornstein innerhalb einer gewissen Streuung ähnlich. Sie unterscheiden sich aber deutlich von den überlagerten Impulsströmen bei raketengetriggerten Blitzen, im Besonderen hinsichtlich der Stromscheitelwerte, Anstiegszeiten und Impulsdauer.

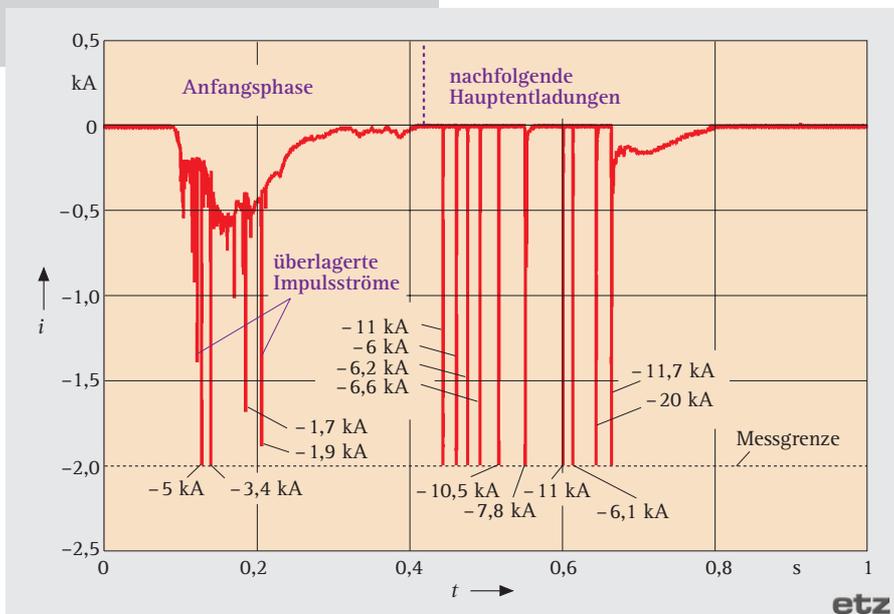


Bild 1. Beispiel eines natürlichen Aufwärtsblitzes am Peißenberg-Turm

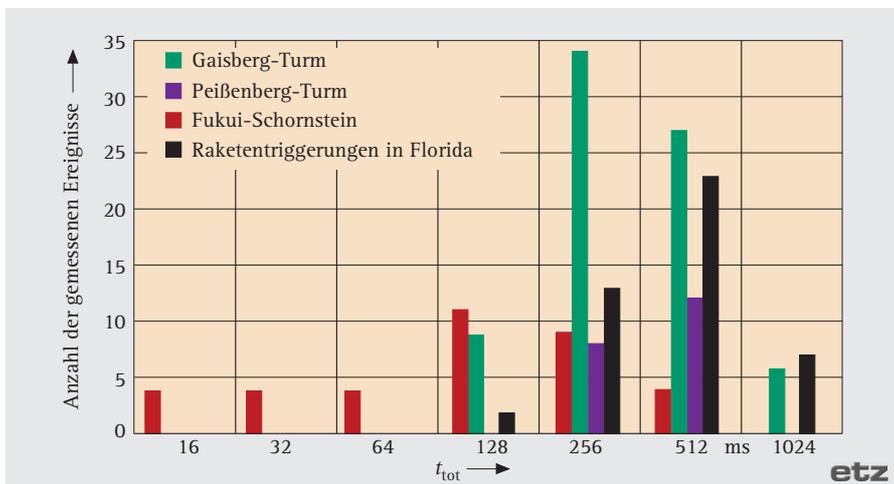


Bild 2. Parameter der Anfangsphase – Gesamtdauer t_{tot} in Millisekunden

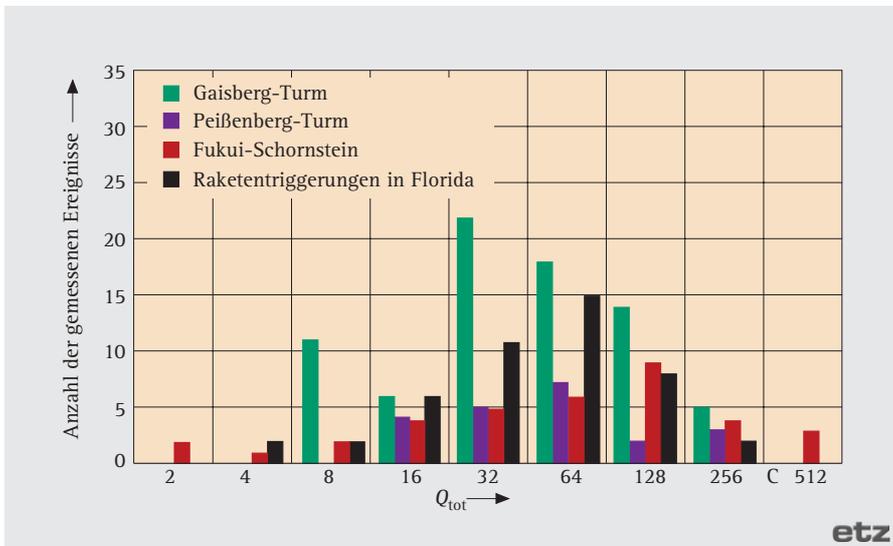


Bild 3. Parameter der Anfangsphase – Gesamtladung Q_{tot} in Coloumb

Wolke-Erdeblitzen von einem abwärts gerichteten Leitblitz eingeleitet werden, dem ein aufwärts gerichteter Hauptblitz folgt (nachfolgende Hauptentladungen, Bild 1). Es besteht heute großes Interesse an den Aufwärtsblitzen, da Blitzstrommessungen meistens an Türmen vorgenommen werden, die überwiegend Aufwärtsblitze auslösen. Im Besonderen stellt sich die Frage, ob die den einleitenden Langzeitströmen überlagerten Impulsströme aus Hauptentladungen oder aus so genannten M-Komponenten resultieren [2]. Zudem ist ein besseres Verständnis der Aufwärtsblitze für die Auslegung adäquater Blitzschutz-Maßnahmen hoher Objekte, wie Fernmeldetürme, Hochhäuser und Hochspannungs-Freileitungen, erforderlich.

Natürliche Aufwärtsblitze und raketengetriggerte Blitze sind ähnlich. Als Erster verglich Ph.D. *Pierre Hubert* die charakteristischen Merkmale von raketengetriggerten Blitzen mit Aufwärtsblitzen an hohen Objekten [3].

Er führte aus, dass getriggerte Blitze die natürlichen Aufwärtsblitze „weit übertreffen“ hinsichtlich der „max. Intensität“ (Stromscheitelwert) und der elektrischen Ladung. Die in [3] mit Bezug auf die Messungen von Prof. Dr. *Karl Berger* zitierten relativ niedrigen Werte der „max. Intensität“ (0,25 kA) und Ladung (10 C) beruhen zum größten Teil auf Aufwärtsblitzen ohne Berücksichtigung der nachfolgenden Hauptentladungen. Aufwärtsblitze mit und ohne Hauptentladungen sollten jedoch getrennt untersucht werden, im Besonderen mit Blick auf den Stromscheitelwert. Prof. Dr. *Martin A. Uman* [4] hat nur natürliche Aufwärtsblitze mit Hauptentladungen be-

rücksichtigt, was die Diskrepanz zwischen seinen Ergebnissen und denen von *P. Hubert* [3] erklärt. Im Fall von raketengetriggerten Blitzen haben weder *P. Hubert* [3] noch *M. A. Uman* [4] zwischen überlagerten Impulsen während der Anfangsphase und den nachfolgenden Hauptentladungen unterschieden, obwohl beide Impulsarten auf verschiedenen Entladungsmechanismen beruhen können (Prof. Dr. *Vladimir A. Rakov* et al. [5]).

Ph.D. *Daohong Wang* et al. [6] untersuchten die überlagerten Impulsströme während der Anfangsphase raketengetriggerte Blitze. Ein statistischer Vergleich zwischen diesen Impulsen und den M-Komponenten bei Langzeitströmen nach vorangegangenen Hauptentladungen deutet darauf hin, dass beiden Impulstypen ähnliche physikalische Prozesse zu Grunde liegen.

Das lässt erwarten, dass auch die Impulsströme während der Anfangsphase natürlicher Aufwärtsblitze den M-Komponenten ähnlich sind. Eine quantitative Bestätigung für diese Schlussfolgerung liegt bisher jedoch nicht vor.

In dieser internationalen Gemeinschaftsstudie wird die Anfangsphase bei raketengetriggerten Blitzen in Florida mit natürlichen Aufwärtsblitzen verglichen, die an den Blitzmessstationen des 100 m hohen Turms am Gaisberg in Österreich, des 160 m hohen Turms des Peißenbergs in Deutschland und des 200 m hohen Fukui-Schornsteins in Japan registriert wurden. Verglichen werden die Gesamtdauer, die Gesamtladung, die mittlere Stromamplitude und die spezifische Energie während der Anfangsphase. Zur Charakterisierung der einzelnen überlagerten

Blitz-Messstation	Anzahl der Blitze (Messperiode)	Gesamtdauer t_{tot} in ms	Gesamtladung Q_{tot} in C	Mittlere Stromamplitude \bar{i} in A	Spezifische Energie W/R in kJ/ Ω
Gaisberg-Turm	76 (2000)	234,6	29,55	126,0	-
Peißenberg-Turm	21 (1996 bis 1999)	289,9	38,5	132,9	3,54
Fukui-Schornstein	36 (1996 bis 1999)	> 77,05	> 38,89	504,8	44,44
Raketentriggerungen in Florida	45 (1996 bis 2000)	305,6	30,39	99,55	8,505

Tabelle 1. Geometrische Mittelwerte während der Anfangsphase von negativen Aufwärtsblitzen

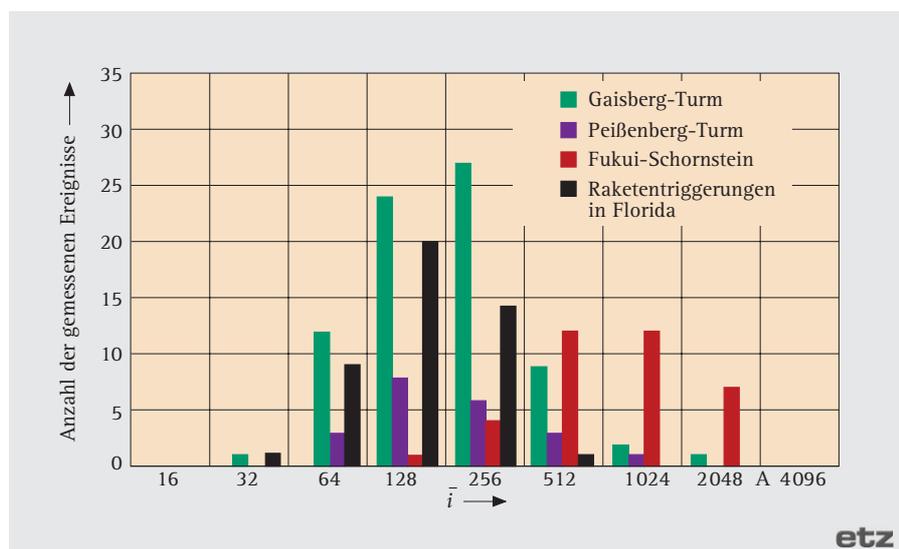


Bild 4. Parameter der Anfangsphase – mittlere Stromamplitude \bar{i} in Ampere

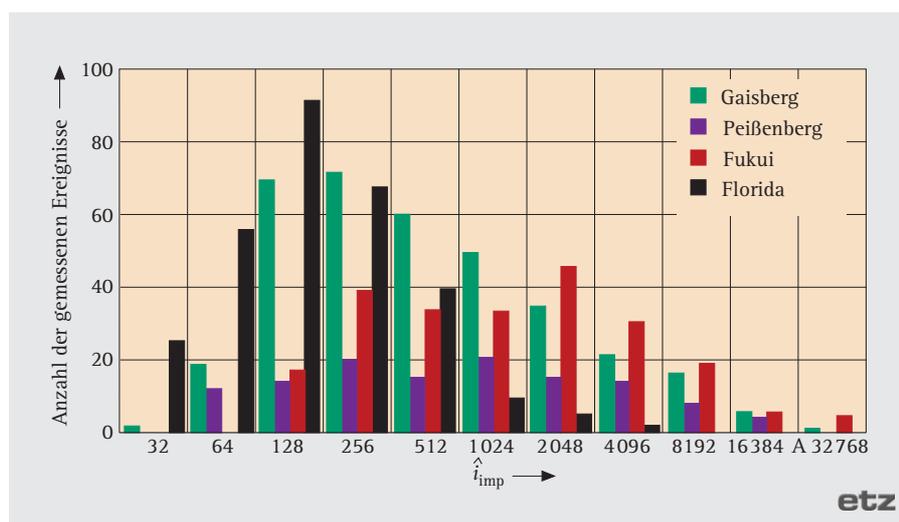


Bild 5. Stromscheitelwert \hat{i}_{imp} der überlagerten Impulsströme in Ampere

Impulsströme dienen Stromscheitelwert, Dauer, Anstiegszeit und die (50 %-50 %-) Impulsbreite.

Die Messdaten

Der Gaisberg-Turm befindet sich am Gipfel des 1270 m hohen Gaisbergs in der

Nähe von Salzburg/Österreich. Die Turmhöhe beträgt 100 m. Die Ströme wurden an der Turmspitze mit einem 0,25-m Ω -Stromshunt mit einer Bandbreite von 0 Hz bis 3,2 MHz gemessen. Die Ausgangsspannung des Shunts wurde mit einer in einem PC installierten Digitalisie-

rungskarte (Bandbreite 15 MHz, Speichertiefe 16 MByte) aufgezeichnet. Die Untergrenze der Stromauflösung betrug 17 A [7].

Der Peißenberg-Turm befindet sich etwa 60 km südwestlich von München auf dem Rücken des „Hohen Peißenbergs“, ungefähr 950 m über Meeresspiegel. Die Turmhöhe beträgt etwa 160 m. Die Blitzströme wurden mit einem Strommonitor (Pearson CT, 0,15 Hz bis 200 kHz) [8–9] gemessen. Die Aufzeichnung erfolgte mit einem Digitaloszilloskop mit einer Speicherkapazität von 1 Mio. Punkten bei einer Abtastrate von 1 ms. Die Untergrenze der Stromauflösung betrug 15 A.

Der Fukui-Schornstein steht im thermischen Kraftwerk Fukui an der Küste des japanischen Meers. Die Höhe des Schornsteins beträgt 200 m. Der Strom wurde mit zwei Stromshunts (2 m Ω und 10 m Ω) gemessen [10].

Der 2-m Ω -Shunt diente zur Messung großer Ströme im Bereich von 8 kA bis 150 kA, der 10-m Ω -Shunt für kleinere Ströme von 200 A bis 12 kA. Die Aufzeichnung erfolgte mit einem 10-bit-Digitalrecorder (2 Mio. Punkte, 100 MSample/s). Die Untergrenze der Stromauflösung betrug 200 A.

Die Experimente mit raketentriggerten Blitzen wurden am „International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT)“ in Camp Blanding, Florida/USA durchgeführt. Die Startrampen befanden sich in ebenem Gelände, etwa 20 m bis 30 m über dem Meeresspiegel. Der Strom wurde mit einem 1-m Ω -Shunt gemessen und mit einem Magnetbandgerät mit einer Bandbreite von 0 Hz bis 400 kHz aufgezeichnet. Die Untergrenze der Stromauflösung betrug etwa 20 A, bedingt durch das Bandrauschen.

Gesamtstrom in der Anfangsphase

Tabelle 1 zeigt die geometrischen Mittelwerte von Gesamtdauer, Gesamtladung, mittlerer Stromamplitude und spe-



Leserbrief: M-Component Mode of Charge Transfer to Ground in Lightning Discharges

There are three possible modes of charge transfer to ground associated with subsequent strokes in negative lightning flashes: (a) the dart leader/return stroke sequence, (b) the continuing current and (c) the M-component.

Fig. 1 schematically shows current profiles corresponding to these three modes.

Lightning M-Components are perturbations (or transient enhancements) in the continuing current and in the associated channel luminosity. A typical M-Component is characterized by a more or less symmetrical channel-base current pulse having an amplitude of 100 A to 200 A, a rise time of 300 μ s to 500 μ s and a charge transfer of 0,1 C to 0,2 C. Some M-Components have current peaks in the kiloamperes range, comparable to peaks of smaller return strokes. M-Components are more numerous than leader/return stroke sequences and can represent a threat to various objects and systems. For example, M-Components may impart electrodynamic stresses on metallic structural elements already weakened due to thermal effects of the background continuing current whose duration can be up to some hundreds of milliseconds. It appears that an M-Component involves the

superposition of two guided waves (the wave-guiding structure is discussed in the next paragraph) propagating in opposite directions (see Fig. 1). The downward-moving wave can be viewed as the analog of a leader, and the upward-moving wave, reflected from the ground, as the analog of a return stroke.

The M-Component mode of charge transfer to ground requires the existence of a grounded channel carrying a current of typically some tens to some hundreds of amperes, which acts as a conducting wave-guiding structure. In contrast, the subsequent leader/return stroke mode of charge transfer to ground occurs only in the absence of such conducting path to ground. In this latter mode, the wave-guiding structure is not available and is created by the leader, which increases the conductivity along the channel by five to six orders of magnitude, from about 0,02 S/m (essentially a non-conductor) to 10^4 S/m. Thus, the primary distinction between the leader/return stroke and M-Component modes is the availability of a conducting path to ground (see Fig. 1).

Prof. Dr. Vladimir A. Rakov,
University of Florida, USA

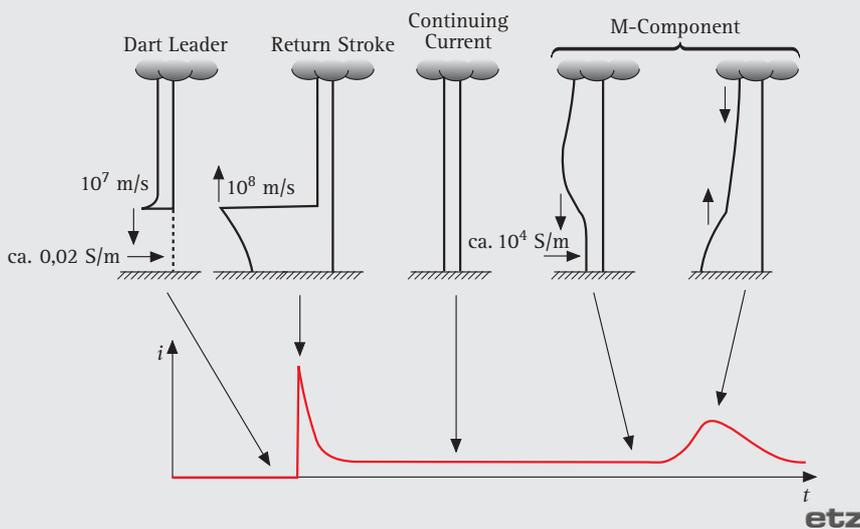


Fig. 1. Current profiles corresponding to the three possible modes

zifischer Energie während der Anfangsphase. Die Werte der raketengetriggerten Blitze und der Turmmessungen am Gaisberg und Peißenberg sind weitgehend vergleichbar. Die Blitze am Fukui-Schornstein weisen dagegen im Mittel ei-

ne etwas kürzere Gesamtdauer sowie höhere Werte für die mittlere Stromamplitude und die spezifische Energie auf. Der Gesamtladung beträgt am Fukui-Schornstein 38,9 C. Diese Werte unterscheiden sich nicht so sehr von den ande-

ren Gesamtladungswerten in Tabelle 1. Die Unterschiede bei der Gesamtdauer der Anfangsphase resultieren wahrscheinlich aus den verschiedenen Untergrenzen der Stromauflösung.

Die Parameter der Anfangsphase sind untergliedert nach den Messungen in Japan, Deutschland, Österreich und Florida in den Bildern 2 bis 4 zusammengestellt. Die Form der Histogramme für die Turmmessungen am Peißenberg und Gaisberg und für die Raketengetriggerung in Florida stimmen weitgehend überein. Dies lässt vermuten, dass die Vorgänge in der Anfangsphase von raketengetriggerten Blitzen und natürlichen Aufwärtsblitzen ähnlich sind. Die Form der Histogramme für Blitze am Fukui-Schornstein weicht jedoch etwas ab. Im Besonderen enthalten die Daten für den Fukui-Schornstein viele Blitze kurzer Gesamtdauer (weniger als einige 10 ms). Ein möglicher Grund für die relativ kurze Gesamtdauer der Anfangsphase hier ist in der vergleichsweise hohen Untergrenze der Stromauflösung zu sehen. Ferner ist die spezifische Energie der Blitze am Fukui-Schornstein erheblich größer als am Peißenberg-Turm und in Florida. Die geometrischen Mittelwerte für Gesamtladung und spezifische Energie der Blitze am Fukui-Schornstein fallen wahrscheinlich durch die relativ hohen Werte (200 A) der Untergrenze der Stromauflösung zu hoch aus. Durch das Fehlen der kleinen Ströme in den Daten für den Fukui-Schornstein werden die statistischen Mittelwerte nach oben verschoben.

Überlagerte Impulsströme während der Anfangsphase

Tabelle 2 zeigt die geometrischen Mittelwerte von Stromscheitelwert, Anstiegszeit und (50 %-50 %-)Impulsbreite der überlagerten Impulsströme während der Anfangsphase. Die Merkmale der Impulsströme von natürlichen Aufwärtsblitzen (Peißenberg, Gaisberg und Fukui) sind innerhalb eines Faktors von zwei bis drei ähnlich, unterscheiden sich aber deutlicher von raketengetriggerten Blitzen. Im Besonderen weisen die natürlichen Aufwärtsblitze größere Stromscheitelwerte und kleinere Impulsbreiten als die raketengetriggerten Blitze auf. Die Scheitelwerte und Anstiegszeiten in Tabelle 2 für den Gaisberg-Turm fallen zu gering aus, da der Verlauf von 26 Impulsstrom-Messungen durch ein Problem in der Messtechnik verfälscht ist.

Die Merkmale der überlagerten Impulsströme sind bei raketengetriggerten

Blitz-Messstation	Anzahl der Blitze	Stromscheitelwert \hat{i}_{imp} in A	Anstiegszeit $t_{10\%...90\%}$ in μs	Impulsbreite $t_{50\%-50\%}$ in μs
Gaisberg-Turm	348	> 376,9	< 109,7	275,5
Peißenberg-Turm	124	512,3	60,87	153,3
Fukui-Schornstein	231	781,1	44,2	140,7
Raketentriggerungen in Florida	270	112,6	463,6	943,1
M-Komponenten gemäß [11]	124	117	422	800

Tabelle 2. Geometrische Mittelwerte der Parameter von Impulsströmen während der Anfangsphase von negativen Aufwärtsblitzen

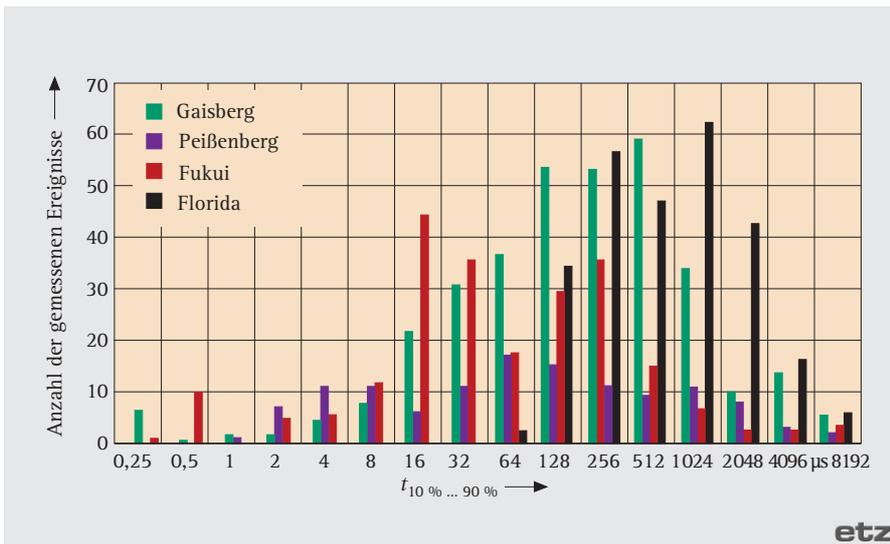


Bild 6. Anstiegszeit $t_{10\%...90\%}$ der überlagerten Impulsströme in Mikrosekunden

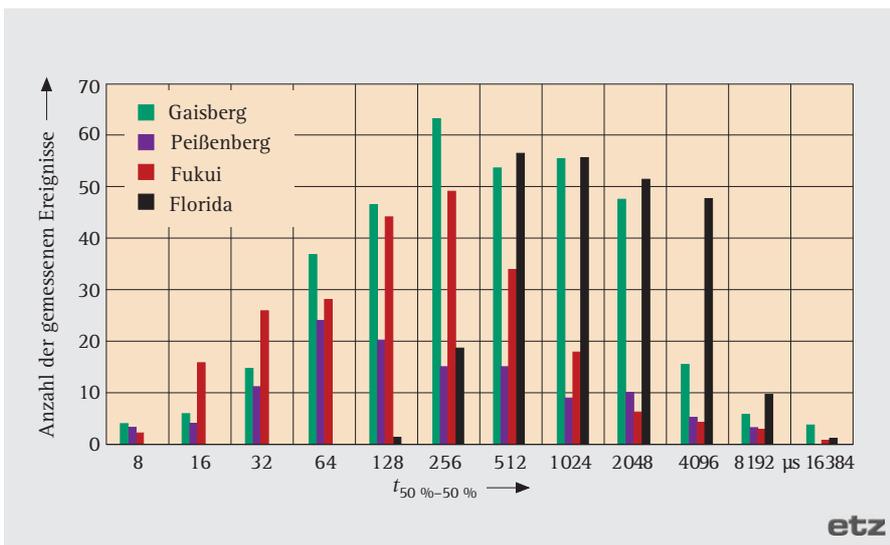


Bild 7. Impulsbreite $t_{50\%-50\%}$ der überlagerten Impulsströme in μs

Blitzen vergleichbar mit den überlagerten M-Komponenten bei Langzeitströmen, die einer Hauptentladung folgen [5–6, 11]. Dies lässt vermuten, dass bei raketengetriggerten Blitzen der Entladungsmechanismus für überlagerte Impulsströme dem von M-Komponente ähnelt.

Die Bilder 5 bis 7 zeigen die Histogramme für die (50 %-50 %-)Impulsbreite, den Stromscheitelwert und die Anstiegszeit der überlagerten Impulsströme bei raketengetriggerten Blitzen und bei natürlichen Aufwärtsblitzen. Diese Bilder belegen, dass die überlagerten Stromim-

pulse bei raketengetriggerten Blitzen keine kurzen Impulsbreiten (< 64 ms), keine hohen Stromscheitelwerte (> 4096 A) und keine kurzen Anstiegszeiten (< 32 ms) aufweisen. Dies dürfte ein Indikator dafür sein, dass den überlagerten Impulsströmen bei raketengetriggerten Blitzen und bei natürlichen Aufwärtsblitzen verschiedene Entladungsmechanismen zu Grunde liegen. Da die Impulsströme natürlicher Aufwärtsblitze für den Gaisberg-Turm, den Peißenberg-Turm und den Fukui-Schornstein weitgehend ähnlich sind, ist eine geografische Abhängigkeit der Impulsstrom-Parameter nicht anzunehmen.

Literatur

- [1] International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT), Camp Blanding, Florida/USA: www.lightning.ece.ufl.edu
- [2] 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
- [3] Hubert P.: Triggered lightning in France and New Mexico. Endeavour 8 (1984) S. 85–89
- [4] Uman, M. A.: The Lightning Discharge. Academic Press, San Diego, Kalifornien/USA, 1987
- [5] Rakov, V. A.; Crawford, D. E.; Rambo, K. J.; Schnetzer, G. H.; Uman, M. A.; Thottappillil, R.: M-Component Mode of Charge Transfer to Ground in Lightning Discharges. J. Geophys. Res. 106 (2001) H. D19, S. 22 817–22 831 (2000JD000243)
- [6] Wang, D.; Rakov, V. A.; Uman, M. A.; Fernandez, M. I.; Rambo, K. J.; Schnetzer, G. H.; Fisher, R. J.: Characteristics of the initial stage

Formelzeichen

i	Stromamplitude
\bar{i}	mittlere Stromamplitude
\hat{i}_{imp}	Stromscheitelwert der überlagerten Impulsströme
t	Zeit
t_{tot}	Gesamtdauer
$t_{10\%...90\%}$	Anstiegszeit der überlagerten Impulsströme
$t_{50\%-50\%}$	Impulsbreite der überlagerten Impulsströme
Q_{tot}	Gesamtladung

Anschriften der Autoren

Dr.-Ing. Gerhard Diendorfer,
Österreichischer Verband für Elektrotechnik
(OVE), Dept. ALDIS (Austrian Lightning
Detection & Information System), Kahlen-
berger Str. 2a, 1190 Wien/Österreich,
☎ 00 43-1/3 70 58 06-2 15, Fax: -2 99,
E-Mail: g.diendorfer@ove.at

Dr.-Ing. habil. Fridolin Heidler,
Universität der Bundeswehr, Institut EIT 7,
Werner-Heisenberg-Weg 39,
85577 Neubiberg,
☎ 089/6004-3736, Fax: -3723
E-Mail: fridolin.heidler@unibw-muenchen.de

Dipl.-Ing. Martin Mair,
Technische Universität Wien, Institut für Elek-
trische Anlagen und Energiewirtschaft, Guß-
hausstr. 25/373, 1040 Wien/Österreich,
☎ 0043-1/58801-37332, Fax: -37399,
E-Mail: martin.mair@tuwien.ac.at

Dr. Megumu Miki,
Central Research Institute of Electric Power
Industry (CRIEPI), Electrical Insulation Depart-
ment, Komae Research Laboratory, 2-11-1,
Iwado kita, Komae-shi, 201-8511, Tokyo/
Japan,
☎ 0081-3/3480-2111, Fax: -3642,
E-Mail: megu@criepi.denken.or.jp

Prof. Dr. Vladimir A. Rakov,
University of Florida, Department of Elec-
trical and Computer Engineering, P. O. Box
116200, Gainesville, FL 32611, Florida/USA,
☎ 001-352/392-4242, Fax: -8381,
E-Mail: rakov@ece.ufl.edu

BSEE Keith J. Rambo,
University of Florida, Department of Elec-
trical and Computer Engineering, P. O. Box
116200, Gainesville, FL 32611, Florida/USA,
☎ 001-352/392-4243, Fax: -8381,
E-Mail: rambo@tec.ufl.edu

M.Sc. B.Sc. George H. Schnetzer,
P. O. Box 120, Elephant Butte, NM 87935,
New Mexico/USA,
☎ 001-505/744-0027,
E-Mail: gschnetzer@zianet.com

Dr. Takatoshi Shindo,
Central Research Institute of Electric Power
Industry (CRIEPI), Electrical Insulation Depart-
ment, Komae Research Laboratory, 2-11-1,
Iwado kita, Komae-shi, 201-8511, Tokyo/
Japan,
☎ 0081-3/3480-2111, Fax: -3642,
E-Mail: shindo@criepi.denken.or.jp

Dr. Rajeev Thottappillil,
Uppsala University, Ångström Laboratory,
Division for Electricity and Lightning Research,
P. O. Box 539, 75121 Uppsala/Schweden,
☎ 0046-18/471-5806, Fax: -5810,
E-Mail: rajeev.thottappillil@hvi.uu.se

Prof. Dr. Martin A. Uman,
University of Florida, Department of Elec-
trical and Computer Engineering, P. O. Box
116200, Gainesville, FL 32611, Florida/USA,
☎ 001-352/392-0913, Fax: -8671,
E-Mail: uman@ece.ufl.edu

Dr.-Ing. Wolfgang Zischank,
Universität der Bundeswehr, Institut EIT 7,
Werner-Heisenberg-Weg 39,
85577 Neubiberg,
☎ 089/6004-3721, Fax: -3723, E-Mail:
wolfgang.zischank@unibw-muenchen.de

Ph.D. Daohong Wang,
Gifu University, Department of Human and In-
formation Systems, Yanagido 1-1, Gifu,
501-1193 Gifu/Japan,
☎ 0081-58/293-2702, Fax: /230-1894,
E-Mail: wang@cc.gifu-u.ac.jp

- of negative rocket-triggered lightning. *J. Geophys. Res.* 104 (1999) H. D4, S. 4213-4222 (1998JD200087)
- [7] 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
- [8] Pearson Electronics Inc., Palo Alto, Kalifornien/USA: www.pearsonelectronics.com
- [9] Heidler, F.; Zischank, W.; Wiesinger, J.: Statistics of Lightning Current Parameters and Related Nearby Magnetic Field Measured at the Peissenberg Tower. Paper 1.18, 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
- [10] Asakawa, A.; Miyake, K.; Yokoyama, Y.; Shindo, T.; Yokota, T.; Sakai, T.: Two Types of Lightning Discharge to a High Stack on the Coast of the Sea of Japan in Winter. *IEEE Trans. on Power Delivery PWRD-12* (1997) H. 3, S. 1222-1231
- [11] Thottappillil, R.; Goldberg, J. D.; Rakov, V. A.; Uman, M. A.; Fisher, R. J.; Schnetzer, G. H.: Properties of M components from currents measured at triggered lightning channel base. *J. Geophys. Res.* 100 (1995) H. D12, S. 25711-25720 (95JD02734)