

Die Blitzentladung als EMV-Störquelle

G. DIENDORFER OVE

Die jährlichen Schäden an elektronischen Einrichtungen durch die Einwirkungen von direkten bzw. nahen Blitzschlägen sind enorm. Leider gibt es nur sehr vage Schätzungen der Schäden durch Blitzschlag, da diese durch unterschiedlichste Versicherungspakete abgedeckt werden, bzw. daraus resultierende Folgeschäden, wie Betriebsunterbrechungen, oft gar nicht versichert sind. Im Sinne der EMV-Grundstruktur Störquelle – Übertragungsweg – Störsenke stellt die Blitzentladung eine natürliche Störquelle dar. Die Eigenschaften dieser Störquelle sind einerseits bestimmt durch die Stromparameter der verschiedenen Blitzstromkomponenten und andererseits durch die Kenngrößen der mit der Entladung verknüpften elektromagnetischen Felder. In den Vorschriften zum Blitzschutz IEC 62305-3 (IEC, 2005) findet man Kennwerte für die zu erwartenden Blitzströme, IEC 62305-4 (IEC, 2005) behandelt den Schutz von elektrischen und elektronischen Einrichtungen in Gebäuden im Falle eines direkten oder nahen Blitzschlags. In Anlehnung an die zu erwartenden Störgrößen wurden in der Vergangenheit verschiedenste Prüfpulse für Stoßströme und Stoßspannungen entwickelt, die auch zum Teil bei der EMV-Prüfung von Geräten zum Einsatz kommen.

Schlüsselwörter: Blitz; Blitzschutz; elektromagnetische Verträglichkeit; EMV

The lightning discharge as an EMC source.

Annual costs of damages caused by direct or nearby lightning on electric and electronic infrastructure are enormous. Unfortunately, there are only rough estimates of the total costs because they are covered by different insurance packages, and often costs for the lightning caused service interruptions are not recorded or insured at all. Lightning is a natural source of current and electromagnetic field in terms of the electromagnetic compatibility concept source – coupling path – receiver, whose properties are determined by the parameters of the different lightning current components and their corresponding EM fields. In the standard for lightning protection IEC 62305-3 (IEC, 2005) parameters of the lightning current are listed. IEC 62305-4 (IEC, 2005) deals with the protection of electronic equipment in case of a direct or nearby lightning strike. In the past different current and voltage pulses have been specified to simulate the effect of lightning strikes and some of them are also applied in EMC tests.

Keywords: lightning; lightning protection; electromagnetic compatibility; EMC

1. Allgemeines

Blitzentladungen stellen räumlich ausgedehnte elektrische Durchschläge, entweder zwischen verschiedenen Ladungsregionen innerhalb der Gewitterwolke (Wolke-Wolke-Blitze) oder Durchschläge von der geladenen Wolke zur Erde (Wolke-Erde-Blitze), dar. In der Blitzforschung werden vier verschiedene Blitztypen hinsichtlich Polarität und Vorwachsrichtung des Leitblitzes unterschieden (Abb. 1).

Die bei den einzelnen Entladungsformen auftretenden Kenngrößen der Blitzströme und die damit verbundenen elektromagnetischen Felder sind in einem weiten Bereich statistisch verteilt und können daher nur exemplarisch durch Testimpulse nachgebildet werden.

Die am häufigsten auftretende Form der Entladung (90 bis 95 % aller Blitze) ist der negative Abwärtsblitz mit einem Leitblitz von der Wolke zur Erde. Aufwärtsblitze beider Polaritäten treten nur an sehr exponierten Objekten, wie z. B. Sender auf Berggipfeln, auf. Bei einem Blitz sind im Wesentlichen drei Phasen zu beobachten: Die Entladung beginnt mit einem Leitblitz (Stepped Leader), der in Ruckstufen von durchschnittlich 50 m Länge und einer mittleren Geschwindigkeit von $2 \cdot 10^5$ m/s von der Wolke in Richtung Erde vorwächst (Rakov, Uman, 2003). Die

durchschnittliche Stromstärke im Leitblitzkanal beträgt 100–200 A. Während der Leitblitzphase, die mehrere 10 ms dauert, wird elektrische Ladung entlang des hoch ionisierten dünnen Leitblitzkanals in einer Koronahülle mit einem Radius von mehreren Metern deponiert. Nähert sich der „Kopf“ des Leitblitzes dem Erdboden, steigt die elektrische Feldstärke am Boden rapide an, und es werden Fangentladungen ausgelöst, die bevorzugt von den exponierten Objekten am Boden (Dachgiebel, Baumwipfel, Mastspitzen etc.) ausgehen, weil an diesen exponierten Punkten die höchste Feldstärke auftritt und daher dort am ehesten die Spannungsfestigkeit der Luft überschritten wird. Trifft eine von den Fangentladungen, die alle dem Leitblitz entgegen wachsen, mit dem Leitblitz zusammen, wird die Hauptentladung (Return Stroke) eingeleitet. Das ist jene Entladungsphase, die schlechthin als Blitz mit freiem Auge beobachtet wird. Dabei läuft ausgehend von der Erde in Richtung Wolke eine Stromwelle über den vorbereiteten Leitblitzkanal und führt die im Leitblitzkanal und der umgebenden Koronahülle gespei-

DIENDORFER, Gerhard, Dipl.-Ing. Dr., OVE – ALDIS, Austrian Lightning Detection and Information System, Kahlenberger Straße 2a, 1190 Wien, Österreich (E-Mail: g.diendorfer@ove.at)

Die vier Blitztypen

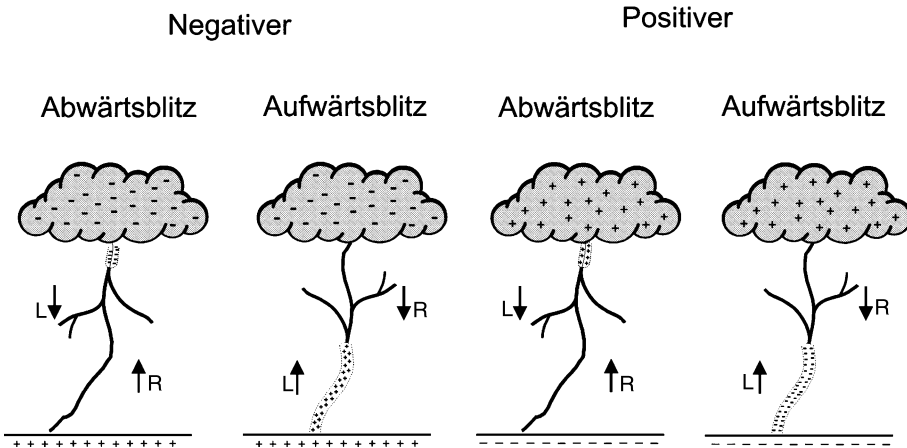


Abb. 1. Die vier verschiedenen Blitztypen nach (Berger, Vogelsanger, 1965) (L ... Leitblitz, R ... Hauptentladung).

cherte elektrische Ladung zur Erde ab. Am Einschlagspunkt tritt ein Stoßstrom von mehreren Kiloampere auf, der über das getroffene Objekt in die Erde abgeleitet wird und sich dort abhängig von den vorliegenden Erdungsverhältnissen mehr oder wenig gleichmäßig verteilt. Häufig wiederholt sich in einem zeitlichen Abstand von einigen 10 Millisekunden dieser Drei-Phasen-Ablauf (Leitblitz – Fangentladung – Hauptentladung) im selben Blitzkanal mehrmals. Diese als Folgeblitze bezeichneten Mehrfachentladungen im gleichen Blitzkanal sind am deutlichen Flackern des Blitzes mit freiem Auge zu erkennen. Als eine weitere Stromkomponente werden bei ca. 50 % der Blitze mit mehreren Teilentladungen so genannte Langzeitströme beobachtet, die einem der Impulsströme folgen. Mit einer Stromflussdauer von bis zu mehreren 100 Millisekunden – die Impulsströme dauern nur einige 100 Mikrosekunden – werden trotz der vergleichsweise geringen Amplituden von wenigen 100 Ampere durch diese Langzeitströme beachtliche Ladungsmengen zur Erde abtransportiert. Im Anhang A von IEC 62305-1 (IEC, 2005) sind für die verschiedenen Blitztypen die charakteristischen Stromkomponenten zusammengestellt. Es ist in diesem Zusammenhang hervorzuheben, dass natürliche Blitze in den seltensten Fällen als einzelne Impulse auftreten. Auf Basis der Daten der ALDIS-Blitzortung (Schulz et al., 2005) wurde eine mittlere Anzahl von 2,5 bis 3 Entladungen pro Blitz ermittelt.

2. Der Blitz als EMV-Störquelle

Im Sinne der EMV stellt der Blitz eine natürliche „Störquelle“ dar, wobei je nach Entfernung zum Blitzkanal und dem Einschlagspunkt die Beeinflussung der „Störsekte“ durch eine der folgenden Komponenten dominiert werden kann – meist ist das gleichzeitige Auftreten mehrerer dieser Effekte anzunehmen:

- ▶ elektromagnetisches Feld herrührend vom transienten Strom im Blitzkanal;
- ▶ elektromagnetisches Feld resultierend aus Blitzteilströmen, die in den Komponenten der Blitzschutzanlage (Fangleitungen, Ableitungen, Erder) oder der technischen Infrastruktur (Rohrleitungen, Kabelschirme etc.) fließen;
- ▶ leitungsgebundene Störströme und/oder -spannungen bei einem direkten Einschlag in eine an das Gerät angeschlossene Versorgungs- oder Datenleitung;
- ▶ Störeinkoppelungen durch Potentialanhebung am Einschlagspunkt.

2.1 Das elektromagnetische Nahfeld der Blitzentladung

Der transiente Strom im Blitzkanal ist verknüpft mit einem elektromagnetischen Feldimpuls – oft auch als LEMP (Lightning Electromagnetic Pulse) bezeichnet, der sich in erster Näherung zylinderförmig rund um den Blitzkanal ausbreitet. Eine genaue Berechnung dieses Feldimpulses erfordert die Kenntnis der zeitlichen und örtlichen Stromverteilung $i(z,t)$ entlang des gesamten Blitzkanals. Der Strom bei einem Blitz kann – wenn überhaupt – nur im Einschlagspunkt $i(0,t)$ gemessen werden. Da die Größe $i(z,t)$ einer direkten Messung nicht zugänglich ist, muss diese auf Basis eines so genannten Blitzmodells ermittelt werden. Einen Überblick über einige der derzeit gängigen Blitzmodelle findet man in (Rakov, 1998). Im unmittelbaren Nahbereich (Abstand $R \ll$ Blitzkanallänge, d. h. bis zu einige 100 Meter) kann die magnetische Induktion $B(t)$ herrührend vom Strom im Blitzkanal näherungsweise nach Gl. (1) berechnet werden (Rakov, Uman, 2003).

$$B(t) = \frac{\mu_0 \cdot i(0, t)}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad \text{Gl. (1)}$$

Das magnetische Feld folgt annähernd dem Zeitverlauf des Blitzstroms. Das elektrische Feld wird im Nahbereich des Einschlagspunktes durch eine elektrostatische Komponente dominiert, die aus der Verschiebung von Ladung zwischen Wolke und Erde resultiert. Der typische Verlauf des elektrischen Feldes beginnt mit einer raschen Feldänderung als Folge des sich nähernden, geladenen Leitblitzkanals. Mit dem Einsetzen der Hauptentladung (Return Stroke) folgt ein Feldsprung mit entgegengesetzter Polarität, als Folge der raschen Entladung des Leitblitzkanals (Abb. 2). Abhängig von der Ladungsverteilung entlang des Leitblitzkanals und der Distanz sind im Abstand von einigen 10 Metern Feldsprünge von bis zu mehreren 100 kV/m zu erwarten. In den Vorschriften wird in der Regel auf das elektrische Feld kaum Bezug genommen, da man davon ausgeht, dass dieses durch Gebäudewände bzw. durch Gerätegehäuse nahezu vollständig abgeschirmt wird.

In IEC 62305-1 sind die bei direkten Blitzeinschlägen wesentlichen Kenngrößen, wie Stromamplitude I , Ladung Q , spezifische Energie W/R und Stromsteilheit (di/dt) der Blitzströme in Abhängigkeit der Schutzklassen I bis IV definiert. In Tabelle 1 sind auszugsweise einige der wichtigsten Kenngrößen

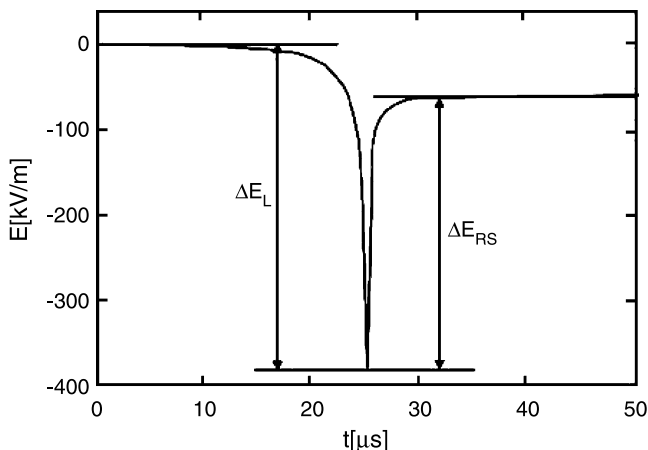


Abb. 2. Elektrisches Feld eines getriggerten Blitzes in 15 Meter Entfernung. ΔE_L ist die elektrische Feldänderung durch den Leitblitz und ΔE_{RS} ist die Feldänderung durch die Hauptentladung, aus (Schoene et al., 2003)

Tabelle 1. Einige wesentliche Blitzstromkennwerte (nach IEC 62305-1)

Schutzklasse	Blitz Stoßstrom				Blitz – Langzeitstrom
	I [kA]	Q_s [C]	W/R [MJ/Ω]	di/dt [kA/μs]	
I	200	100	10	200	200
II	150	75	5,6	150	150
III, IV	100	50	2,5	100	100

zusammengestellt. Es ist zu beachten, dass die größten Stromsteilheiten (di/dt) bei Folgeblitzen zu erwarten sind, wohingegen die Maximalwerte der anderen Parameter (I , Q , W/R) bei Erstblitzen auftreten. Die in Tabelle 1 für Schutzklasse I genannten Blitzkennwerte wurden so festgelegt, dass davon auszugehen ist, dass diese nur mehr von höchstens einem Prozent aller Blitze überschritten wird. Daraus ergibt sich auch die 99 %-ige Effektivität einer Blitzschutzanlage der Schutzklasse I.

In EN 61000-4-9 (ÖVE/ÖNORM, 2002) ist die Prüfung der Störfestigkeit von Geräten gegen impulsförmige Magnetfelder festgelegt. Für verschiedene Prüfschärfgrade 3, 4, 5 sind von den Geräten Feldstärken nach Tabelle 2 ohne Fehlfunktion zu beherrschen.

In Abb. 3 sind diese festgelegten Prüfpegel der magnetischen Feldstärke für verschiedene Blitzstromstärken als Funktion der Distanz gegenübergestellt. Man erkennt, dass zum Beispiel bei einem 10-kA-Blitzstrom – dies kann entweder der Gesamtstrom eines durchschnittlichen Blitzes sein oder der entsprechende Teilstrom einer stromstarken Entladung – die Prüfpegel von Prüfschärfegrad 3 (PG3) im Umkreis von bis zu ca. 20 m überschritten werden. Im Extremfall von 200 kA sind im Umkreis von bis zu ca. 300 Metern Feldstärken über dem PG3-Level zu erwarten. Selbst die 1.000 A/m bei Prüfschärfegrad 5

Tabelle 2. Prüfpegel mit impulsförmigen Magnetfeldern nach EN 61000-4-9

Prüfschärfegrad	Feldstärke des impulsförmigen Magnetfeldes A/m (Spitzenwert)
3	100
4	300
5	1000

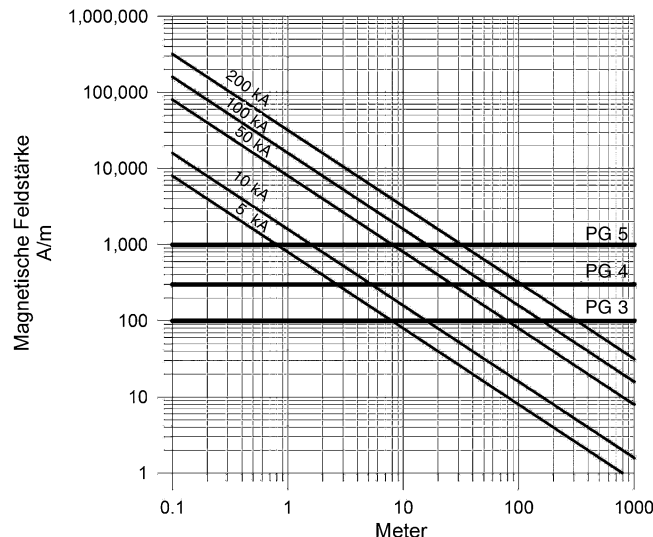


Abb. 3. Magnetische Feldstärke in Abhängigkeit von der Entfernung zum Einschlagpunkt bei Blitzen mit einer Amplitude von 5 kA, 10 kA, 50 kA, 100 kA und 200 kA

werden in diesem Fall noch im Umkreis bis 30 m überschritten. Daraus ist erkennbar, dass in unmittelbarer Nähe zu Leitungen, die den gesamten Blitzstrom oder Teile davon führen (z. B. Fang- und Ableitungen der Blitzschutzanlage), mit Feldstärken zu rechnen ist, welche die Prüffeldstärken nach EN 61000-4-9 überschreiten können.

Aus den genannten Gründen sind für den störungsfreien Betrieb elektronischer Einrichtungen im Nahbereich von Blitzentladungen gezielte Schirmungsmaßnahmen erforderlich, welche die am Gerät auftretenden Feldstärken auf ein vertretbares Maß reduzieren. Dabei kann z. B. entweder die vorhandene Stahlbewehrung der Baustruktur zur Realisierung eines Schirmkäfigs herangezogen werden, oder es werden zusätzliche Schirmmaßnahmen, wie das Aufbringen von Schirmgittern an den Wänden, gesetzt. IEC 62305-4 (IEC, 2005) gibt ausführlich Hinweise darauf, wie für ausgedehnte Anlagen mit elektronischen Einrichtungen eine entsprechende elektromagnetische Schirmung erreicht werden kann.

2.2 Störströme und Störspannungen als Folge eines direkten oder nahen Blitzschlags

Der Blitz ist in erster Näherung als „eingepärrte Stromquelle“ zu betrachten. Dies bedeutet, dass Amplitude und zeitlicher Stromverlauf des Blitzes von der Impedanz, auf die der Blitz im Einschlagpunkt trifft, nahezu unabhängig ist. In den letzten Jahren hat eine intensive Diskussion darüber eingesetzt, inwieweit bei der Messung von Blitzströmen an hohen Türmen Reflexionen an der Turmspitze bzw. am Turmfuß einen Einfluss auf die gemessenen Stromparameter und in der Folge auch auf die beobachteten Felder bzw. induzierten Spannungen haben, siehe auch (Rachidi et al., 2001; Rakov, 2001; Bermudez et al., 2005; Janischewskij et al., 1996). Für den ionisierten Blitzkanal wird z. B. in (Baba, Rakov, 2005) eine Impedanz von 900 Ω angenommen. In Abb. 4 ist der zeitliche Verlauf eines Erst- und eines Folgeblitzes einer Blitzentladung in einen Turm dargestellt. Diese Impulsströme wurden an der Mastspitze des ORF-Senders Gaisberg bei Salzburg direkt mittels eines 0,25 mΩ Shunt gemessen (Diendorfer, Mair, Pichler, 2005).

Bei der in Abb. 4 auszugsweise dargestellten Entladung vom 21. Jänner 2005 traten insgesamt fünf Teilblitze auf, und

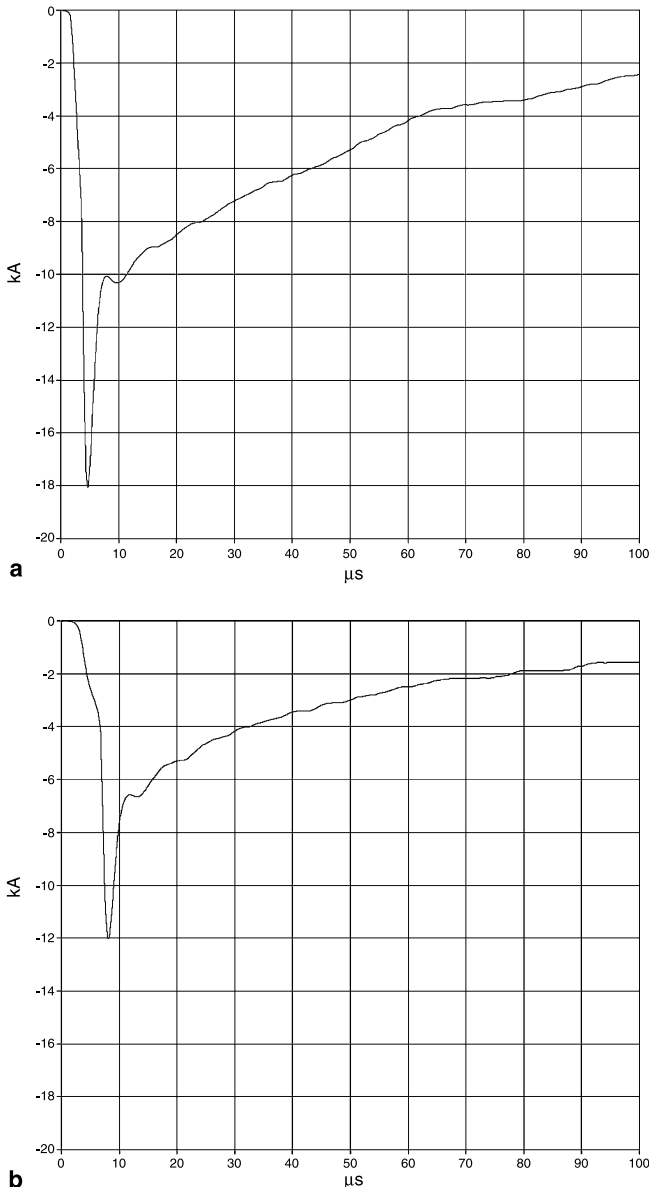


Abb. 4. Stromverlauf eines (a) Erst- und (b) Folgeblitzes während der ersten 100 µs bei einem Einschlag in den Sender Gaisberg (Einschlag am 2005-01-21 um 05:21:30.1762157)

es wurde dabei eine Gesamtladungsmenge von 23 As von der Wolke zur Erde abgeleitet.

Zur Nachbildung der Beanspruchung von technischen Einrichtungen bei einem Blitzschlag werden Blitzstromverläufe und die daraus resultierenden Spannungsbeanspruchungen üblicherweise in Form von Testimpulsen mit zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten für die Front und den Rücken nachgebildet. Sowohl für die Strom- als auch für die Spannungsverläufe findet man in der Literatur sowie in den verschiedenen Standards unterschiedlichste Kurvenformen (10/350 µs, 8/20 µs, 1,2/50 µs, 10/700 µs etc.).

Im Zusammenhang mit diesen Kurvenformen ist zu beachten, dass die an einer Geräteschnittstelle auftretende Störgröße wesentlich vom Einkoppelmechanismus abhängt. Ein leitungsgebundener Störstrom kann entweder ein Blitzteilstrom sein, dessen Zeitverlauf dann annähernd dem des Blitzstroms mit einer Rückenzeitkonstante von > 50 µs (siehe Abb. 4) entspricht. Bedingt durch den „Hochfrequenzcharakter“ der Blitzentladung

erfolgt die Stromaufteilung auf die verschiedenen Stromwege nicht linear. Im Bereich des steilen Stromanstiegs in der Front wird die Stromverteilung primär durch die Induktivitätsverhältnisse bestimmt. Im Bereich des vergleichsweise niederfrequenten Stromabfalls bzw. des Langzeitstroms wird die Stromaufteilung zunehmend auch von den ohmschen Verhältnissen beeinflusst.

Leitungsgebundene Störgrößen als Folge eines nahen Blitzschlags können auch das Resultat der Spannungsinduktion in einer offenen oder geschlossenen Leiterschleife sein. Der zeitliche Verlauf wird dann bestimmt durch die induzierte Schleifenspannung U_i , welche nach dem Induktionsgesetz direkt proportional der zeitlichen Ableitung des Blitzstroms di_B/dt und der Gegeninduktivität M ist. In einer kurzgeschlossenen Schleife bestimmt die Eigenimpedanz (R und L) der Schleife den Verlauf des Stroms i_S in der Schleife nach Gl. (2). Die oft verwendete Kurvenform 8/20 µs repräsentiert am ehesten den dabei auftretenden Stromverlauf.

$$U_i = M \cdot \frac{di_B}{dt} = R \cdot i_S + L \cdot \frac{di_S}{dt} \quad \text{Gl. (2)}$$

Impulsförmige Störspannungen können auch das Resultat von ohmscher Einkopplung in die betreffenden Anlagen sein. Die aus ohmscher Einkopplung (z.B. Potentialverschleppung) resultierende Spannung ist dem zeitlichen Stromverlauf proportional. In der Realität überlagern sich meist induktive und ohmsche Einkopplung.

Im Falle eines Blitzteilstroms einerseits und eines induktiv eingekoppelten Stoßstroms in einer kurzgeschlossenen Schleife andererseits ist der von Schutzelementen zu beherrschende Energieinhalt sehr unterschiedlich, und es müssen daher entsprechend angepasste Schutzelemente eingesetzt werden. Es wird zwischen Blitzstromableitern und Überspannungsableitern unterschieden. Blitzstromableiter sind in der Lage, auch die hohen Anforderungen beim Ableiten von Blitzteilströmen zu beherrschen, Überspannungsableiter dienen dem Schutz gegen die eher energiearmen Störströme und Störspannungen durch induzierende Effekte. Mit den in der Serie IEC 62305-x beschriebenen Maßnahmen (Blitzschutzanlage, Potentialausgleich und Einsatz von Schutzelementen) können bei Blitzschlag die Beanspruchungen von Geräten an den Schnittstellen auf ein Maß reduziert werden, welches unterhalb der Prüfgrößen nach den EMV-Gerätenormen der Serie 61000 liegt.

3. Zusammenfassung

Blitzparameter treten in weiten Bereichen statistisch verteilt auf. Mit Hilfe entsprechender Prüfverfahren und Schutzkonzepte kann erreicht werden, dass ein möglichst hohes Schutzniveau erreicht wird. In der Vergangenheit diente der Blitzschutz primär dem Brand- und Personenschutz. In unserer modernen Industrie- und Unterhaltungsgesellschaft kommt eine Vielzahl von empfindlichen, elektronischen Einrichtungen zum Einsatz. Störungen oder Ausfälle dieser Einrichtungen bei Gewitter können zu großen finanziellen Schäden oder schweren Beeinträchtigungen im Alltag führen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, dass der Blitz- und Überspannungsschutz in der Planung entsprechende Berücksichtigung findet. Mit der Vorschriftenreihe IEC 62305-x steht ein umfangreiches Regelwerk zur Verfügung, mit dem auch bei komplexen Anlagen ein entsprechender Schutz realisierbar ist. Es stehen heute die technischen Mittel zur Verfügung, dass selbst bei direktem Blitzschlag empfindliche elektronische Einrichtungen ohne Probleme betrieben werden können. Das häufig geäußerte Argument „bei direktem Blitzschlag kann man empfindliche Geräte nicht wirklich schützen“ ist nicht mehr zutreffend. Es fehlt leider

eher am Bewusstsein und der Bereitschaft, für den eventuell eintretenden Fall auch entsprechend vorzusorgen.

Literatur

- Baba, Y., Rakov, V. A. (2005): On the use of lumped sources in lightning return stroke models. *J. Geophys. Res.* 110: D03101.
- Berger, K., Vogelsanger, E. (1965): Messung und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore. *Bull. SEV* 56(1): 1–22.
- Bermudez, J. L., Rachidi, F., Rubinstein, M., Janischewskyj, W., Shostak, V., Pavanello, D., Chang, J. S., Hussein, A. M., Nucci, C. A., Paolone, M. (2005): Far-field-current relationship based on the TL model for lightning return strokes to elevated strike objects. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 47(1): 146–159.
- Diendorfer, G., Mair, M., Pichler, H. (2005): Blitzstrommessung am Sender Gaisberg. *Forschung im Verbund, Schriftenreihe Band 89, 2005* (http://www.verbund.at/at/konzern/forschung_umwelt/forschung/band_089.pdf/.)
- IEC 62305-1 Ed. 1.0: Protection against lightning – Part 1: General principles, 2006.
- IEC 62305-2 Ed. 1.0: Protection against lightning – Part 2: Risk management, 2006.
- IEC 62305-3 Ed. 1.0: Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard, 2006.
- IEC 62305-4 Ed. 1.0: Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures, 2006.
- Janischewskyj, W., Shostak, V., Barratt, J., Hussein, A. M., Rusan, R., Chang, J.-S. (1996): Collection and use of lightning return stroke parameters taking into account characteristics of the struck object. In: *Proc. 23rd Int. Conf. Lightning Protection, Florence, Italy, 1996*, 16–23.
- ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-9+A1: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4–9: Prüf- und Messverfahren – Prüfung der Störfestigkeit gegen impulsförmige Magnetfelder, 2002.
- Rachidi, F., Janischewskyj, W., Hussein, A. M., Nucci, C. A., Guerrieri, S., Kordi, B., Chang, J.-C. (2001): Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 43(3): 356–367.
- Rakov, V. A. (1998): Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 40(4): 403–426.
- Rakov, V. A. (2001): Transient response of a tall object to lightning. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 43(4): 654–661.
- Rakov, V. A., Uman (2003): *Lightning: physics and effects*. Cambridge University Press.
- Schoene, J., Uman, M. A., Rakov, V. A., Kodali, V., Rambo, K. J., Schnetzer, G. H. (2003): Statistical characteristics of the electric and magnetic fields and their time derivatives 15 m and 30 m from triggered lightning. *J. Geophys. Res.* 108 (D6): 4192.
- Schulz, W., Cummins, K., Diendorfer, G., Dorninger, M. (2005): Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system. *J. Geophys. Res.* 110: D09101; DOI:10.1029/2004JD005332.