

|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Zeitschrift:</b> | Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses |
| <b>Herausgeber:</b> | Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen  |
| <b>Band:</b>        | 92 (2001)   |
| <b>Heft:</b>        | 25  |
| <b>Artikel:</b>     | Einsatz von Überspannungsableitern beim Blitzabschutz   |
| <b>Autor:</b>       | Häberlin, Heinrich  |
| <b>DOI:</b>         | <a href="https://doi.org/10.5169/seals-855799">https://doi.org/10.5169/seals-855799</a>   |

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Einsatz von Überspannungsableitern beim Blitzschutz

## Notwendige Strombelastbarkeit von Varistoren in induktiv gekoppelten Schleifen

Für den inneren Blitzschutz elektrischer Anlagen werden oft Überspannungsableiter eingesetzt, die das Auftreten von für die elektrische Anlage gefährlichen Überspannungen verhindern. Damit sie diese Funktion erfüllen können, müssen sie aber kurzzeitig oft recht hohe Ströme führen, ohne selbst Schaden zu nehmen.

Mit dem in diesem Beitrag beschriebenen Verfahren, dessen theoretische Grundlagen ausführlich erläutert werden, ist es möglich, mit geringem Aufwand den erforderlichen Nennstrom  $I_{8/20}^1$  von Varistoren zu bestimmen, die in induktiv mit dem Blitzstrom gekoppelten Schleifen zur Begrenzung von Überspannungen eingesetzt werden. Damit lassen sich die einzusetzenden Varistoren genauer auf

Heinrich Häberlin

die zu erwartende Beanspruchung auslegen, so dass sowohl Ausfälle infolge zu schwacher Dimensionierung als auch unnötige Kosten infolge Überdimensionierung vermieden werden können.

### Auf dem Markt erhältliche Ableiter

Auf dem Markt werden zwei Haupttypen von Überspannungsableitern angeboten.

### Blitzstromableiter

So genannte Blitzstromableiter ermöglichen den Einbezug von Leitern, die im Betrieb nicht geerdet werden dürfen, in den Potentialausgleich. Sie dienen dem Grobschutz und bestehen meist aus speziellen Funkenstrecken, die bei Nennstrom die Spannung typischerweise bei der 10- bis 15fachen Nennbetriebsspannung begrenzen. Sie sind für eigentliche Blitzströme ( $i_{\max}$ : 25–100 kA) mit Stirnzeiten  $T_1 = 10 \mu\text{s}$  und Rückenhalbwertszeiten  $T_2 = 350 \mu\text{s}$  ausgelegt. Sie sind jedoch meist nur für Wechsel-

spannungen von 250 bis 440 V erhältlich und decken somit nicht alle Bedürfnisse ab.

### Überspannungsableiter

Neben Blitzstromableitern werden viele so genannte Überspannungsableiter für Ströme mit Stirnzeiten  $T_1 = 8 \mu\text{s}$  und Rückenhalbwertszeiten  $T_2 = 20 \mu\text{s}$  angeboten. Sie bestehen meist aus Varistoren<sup>2</sup> auf der Basis von Zinkoxid (ZnO) und sind primär für die Ableitung von in induktiv gekoppelten Schleifen entstehenden Überspannungen gedacht. Meist wer-

den sie für bei dieser Kurvenform zulässige Maximalströme  $I_{8/20}$  von etwa 100 A bis 100 kA angeboten. Sie begrenzen beim Nennstrom die Spannung typischerweise bei der 3- bis 5fachen DC-Nennbetriebsspannung  $U_{\text{VDC}}$  des Varistors und werden deshalb nach einem vorgeschalteten Blitzstromableiter und einem strombegrenzenden Element (Induktivität, einige Meter Leitung) oft auch als Feinschutz eingesetzt. Für AC-Anwendungen (400 V/230 V) gibt es neuerdings auch Kombi-Ableiter, welche die Funktion von Blitzstromableitern und Überspannungsableitern vereinen [8].

Bei Varistoren kann die Ansprechspannung durch Überlastung oder Alterung allmählich etwas sinken. Im Extremfall kann ein Varistor bereits bei der Betriebsspannung durch einen Leckstrom erwärmt und evtl. zerstört werden, wobei der auftretende Netzfolgestrom unter Umständen noch weitere Schäden anrichten kann.

Verschiedene Hersteller bieten deshalb thermisch überwachte Varistoren ( $I_{8/20}$ : 5–15 kA) an, bei denen eine Abtrennvor-

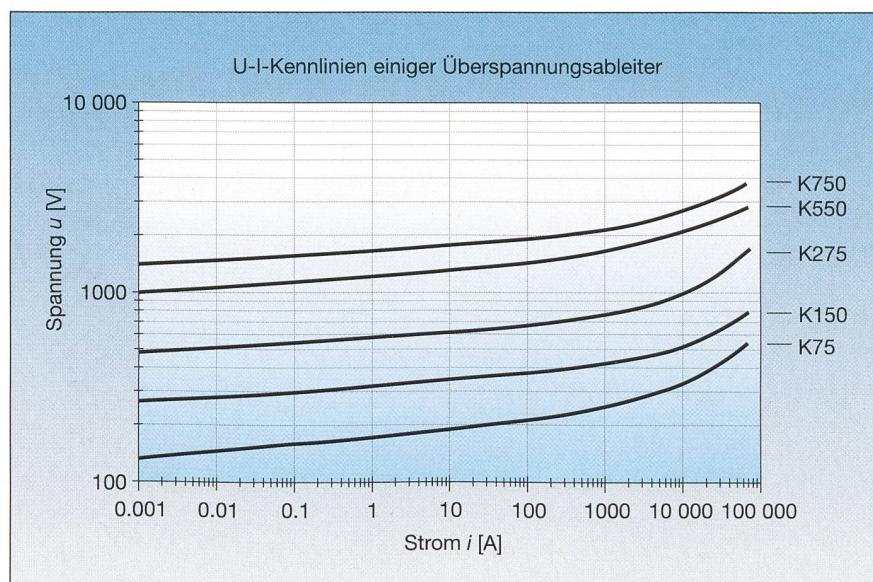


Bild 1 Kennlinien einiger Varistoren, welche als Überspannungsableiter für Stoßströme bis 70 kA (8 µs/20 µs) eingesetzt werden können.

Typ des Varistors: Siov-B60K... von Siemens Matsushita. Die Ziffer hinter dem K gibt den Effektivwert der zulässigen Betriebsspannung bei Wechselstrom an. Die zulässige maximale Betriebsgleichspannung  $U_{\text{VDC}}$  ist jeweils etwa 30–35% höher, d.h. sie beträgt beim K75 100 V, beim K150 200 V, beim K275 350 V, beim K550 745 V und beim K750 1060 V (Quelle: Datenbuch von Siemens-Matsushita).

richtung den Varistor bei unzulässiger Erwärmung abtrennt, bevor weitere Schäden entstehen können.

Überspannungsableiter mit Varistoren werden für viele verschiedene Spannungen  $U_{VDC}$  von 5 bis 1400 V angeboten. Bild 1 zeigt als Beispiel die  $U-I$ -Kennlinien einiger Überspannungsableiter mit ZnO-Varistoren.

Beim Einsatz von Varistoren als Überspannungsableiter ist zu beachten, dass jeder Varistor eine gewisse Eigenkapazität besitzt (je nach Grösse einige 10 pF bis einige 10 nF), die besonders bei Signalleitungen manchmal zu Problemen führen kann. Gasgefüllte Überspannungsableiter haben eine sehr geringe Eigenkapazität und eignen sich deshalb sehr gut für Signalleitungen, dürfen aber wegen möglicher Folgeströme nach der Zündung nicht für Energieleitungen eingesetzt werden.

Wegen des zu geringen Angebots an für die Gleichstromseite von Photovoltaikanlagen geeigneten Blitzstromableitern ist man gelegentlich versucht, einen Überspannungsableiter als Blitzstromableiter einzusetzen. Auf Grund der bei der Stossstrombeanspruchung im Ableiter umgesetzten Energie kann man abschätzen, dass ein mit einem Blitzteilstrom mit einer Kurvenform 10  $\mu$ s/350  $\mu$ s beaufschlagter Überspannungsableiter mit etwa 5–10% (je nach Typ) seines Nennstromes  $I_{8/20}$  (8  $\mu$ s/20  $\mu$ s) belastet werden kann, was evtl. für Adern mit nicht allzu grossen Blitzteilströmen noch genügt. Für grössere Ströme kann man bei Bedarf mehrere derartige Ableiter parallel schalten.

In induktiv gekoppelten Schleifen mit Varistoren haben die auftretenden Ströme je nach den elektrischen Eigenschaften der Schleife und den verwendeten Varistoren stark unterschiedliche Kurvenformen. In den folgenden Kapiteln wird ein ohne allzu grossen Aufwand anwendbares Verfahren zur Bestimmung des erforderlichen Varistor-Nennstroms  $I_{8/20}$  angegeben.

### Induzierte Ströme in induktiv mit dem Blitzstrom gekoppelten Schleifen

Bei Blitzschutzanlagen wird ein Blitzstrom  $i$  oft auf mehrere Ableitungen aufgeteilt, um seine schädlichen Auswirkungen möglichst gering zu halten. Da sich die Magnetfelder der Teilblitzströme oft teilweise aufheben, ist man in der Regel auf der sicheren Seite, wenn man nur den Strom  $i_A = k_C \cdot i$  betrachtet, der in der Ableitung fliesst, welche der Schleife am nächsten liegt ( $0 < k_C \leq 1$ ).

Ein zeitlich veränderlicher Strom  $i_A$  induziert in einer benachbarten Leiterschleife eine Spannung  $u$  (Bild 2).

$$u = \frac{d\Phi}{dt} = M \cdot \frac{di_A}{dt} \quad (1)$$

Dabei bedeutet  $M$  die Gegeninduktivität zwischen dem vom Strom  $i_A$  durchflossenen Leiter und der betrachteten Leiterschleife.  $di_A/dt$  ist die Ableitung (im mathematischen Sinn) des Stromes  $i_A$  nach der Zeit.

Ist eine derartige Leiterschleife geschlossen (z.B. durch einen Kurzschluss, durch die Impedanz eines angeschlossenen Gerätes, eines Überspannungsableiters oder eines Überschlags über eine Trennstrecke mit ungenügendem Abstand), so fliesst als Folge der induzierten Spannung  $u$  auch ein induzierter Strom  $i_S$ . Die Kenntnis der auftretenden Ströme ist insbesondere für die strommässige Dimensionierung von Überspannungsableitern in solchen Schleifen wichtig.

Nachfolgend wird eine Methode vorgestellt, welche die Bestimmung des nötigen Varistorstroms  $I_{8/20}$  erlaubt. Dabei wird zunächst der leicht zu berechnende Kurzschlussstrom  $i_{S0}$  der verlustlosen Schleife ( $R_S = 0$ ) ermittelt (Bilder 2 und 3). Daraus kann mit Hilfe eines Korrekturfaktors  $k_V$ , der im Prinzip von  $M$ ,  $k_C$ ,  $L_S$ ,  $R_S$  und der Varistor-DC-Betriebsspannung  $U_{VDC}$  abhängt, der notwendige Varistorstrom  $I_{8/20}$  bestimmt werden.

Die hohe induzierte Spannung ist nur sehr kurzzeitig (meist < 10  $\mu$ s) vorhanden. Während des Anstiegs des Blitzstroms wird der in einer geschlossenen Schleife induzierte Strom  $i_S$  primär durch die Selbstinduktivität  $L_S$  der Schleife

bestimmt, da der Spannungsabfall am Widerstand  $R_S$  der Schleife meist vernachlässigt werden kann. Die Selbstinduktivität wird oft auch kurz als Induktivität bezeichnet.

Für eine lange Zweidrahtleitung mit dem Leiterradius  $r_o$ , dem Achsenabstand  $b$  und der Länge  $l$  gilt für die (Selbst-)Induktivität mit  $l \gg b$  unter Vernachlässigung der relativ kleinen inneren Induktivität, die zudem nur bei tiefen Frequenzen wirksam ist

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot l \cdot \ln\left(\frac{b-r_o}{r_o}\right) = 0,4 \cdot \frac{\mu H}{m} \cdot l \cdot \ln\left(\frac{b-r_o}{r_o}\right) \quad (2)$$

Bei der praktischen Realisierung von Blitzschutzmassnahmen treten oft auch Leiterschleifen auf, bei denen die Bedingung  $l \gg b$  nicht mehr erfüllt ist. In diesen Fällen trägt nicht nur die Länge  $l$ , sondern auch die Breite  $b$  nennenswert zur Induktivität bei. Formeln für derartige Fälle sind in [1] angegeben.

### In verlustloser Schleife induzierter Kurzschlussstrom

Besonders einfach ist die Berechnung des induzierten Kurzschlussstroms  $i_{S0}$  in einer widerstandslosen Schleife mit der Induktivität  $L_S$ . Mit der Gegeninduktivität  $M$  ergibt sich für den Kurzschlussstrom  $i_{S0}$ , der in einer Anordnung nach Bild 2 von dem in einer Ableitung fliesenden (Teil-)Blitzstrom  $i_A = k_C \cdot i$  in einer geschlossenen Leiterschleife mit  $R_S = 0$  und der Induktivität  $L_S$  induziert wird,

$$i_{S0} \approx \frac{M}{L_S} \cdot i_A = \frac{M}{L_S} \cdot k_C \cdot i = \frac{M_i}{L_S} \cdot i \quad (3)$$

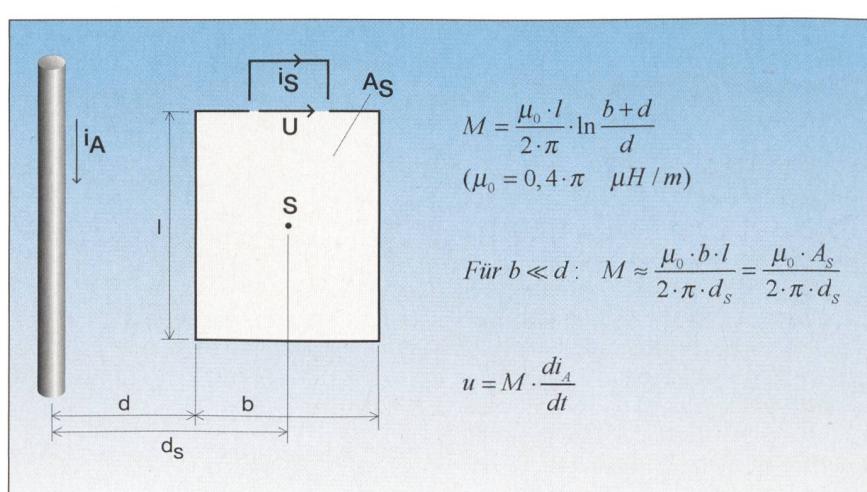


Bild 2 Gegeninduktivität zwischen einer (Teil-)Blitzstrom führenden Ableitung und einer rechteckigen Leiterschleife der Länge  $l$  im Abstand  $d$  von der Achse der Ableitung

$A_s$  = Fläche der Leiterschleife,  $S$  = Schwerpunkt,  $d_s$  = Abstand von  $S$  zur Achse der Ableitung

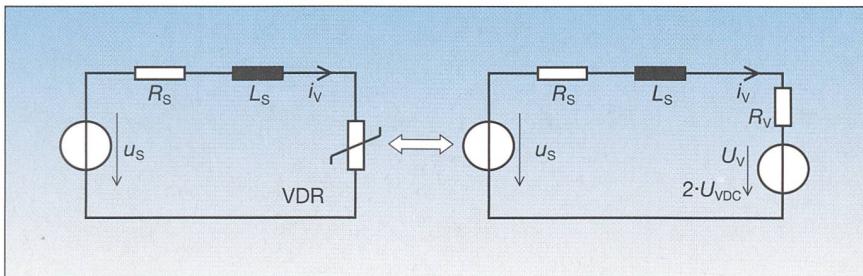


Bild 3 Ersatzschaltung zur Berechnung der auftretenden Varistorströme  $i_v$  in mit einem Blitzstrom induktiv gekoppelten Schleifen (links Originalschaltung, rechts linearisierte Form für den Fall  $i_v > 0$ )

$$u_s = M \cdot \frac{di}{dt} = M_i \cdot \frac{di}{dt}$$

Dabei ist  $M_i = k_C \cdot M$  die effektive Gegeninduktivität zwischen dem gesamten Blitzstrom  $i$  und der Schleife.

Durch Einsetzen des Maximalwertes  $i_{\max}$  (100 kA bis 200 kA nach [1, 3]) kann sehr einfach der in einer widerstandslosen Schleife auftretende Maximalwert des induzierten Kurzschlussstromes  $i_{s0\max}$  berechnet werden

$$i_{s0\max} \approx \frac{M_i \cdot i_{\max}}{L_s} \quad (4)$$

### Induzierte Ströme in Schleifen mit Überspannungsableitern

Ist die Schleife nicht widerstandslos, klingt der induzierte Strom  $i_s$  nach dem Erreichen eines Maximalwertes  $i_{s\max}$  umso schneller ab, je kleiner die Induktivität  $L_s$  und je grösser die in der Schleife vorhandenen Widerstände und Varistorspannungen sind.

Für die bezüglich Strom korrekte Dimensionierung von Überspannungsableitern ist eine genügend genaue Berechnung der in Schleifen mit Varistoren fliessenden Ströme erforderlich. Da Varistoren nicht lineare Elemente sind und die induzierten Ströme von verschiedenen Parametern abhängen, ist die exakte Berechnung dieser Ströme nicht einfach. Gewisse Vereinfachungen und Abschätzungen nach der sicheren Seite sind deshalb nötig, um den mathematischen Aufwand in vernünftigen Grenzen zu halten.

Für die mathematische Darstellung der Blitzströme wurde die Form

$$i(t) = I \cdot (e^{-\sigma_1 \cdot t} - e^{-\sigma_2 \cdot t}) \quad (5)$$

gewählt, wobei gilt:  $\sigma_2 > \sigma_1$ . Sie stellt ohne allzu grossen mathematischen Aufwand eine gute Näherung an die Realität dar, ist leicht an die in Normen empfohlenen Maximalwerte für  $i_{\max}$ ,  $(di/dt)_{\max}$  und  $Q^3$  anpassbar und entspricht zudem

genau der Kurvenform der von Stossstromgeneratoren in Hochspannungslabotorien erzeugten Stossströme. Da für Überspannungsableiter je nach Typ und Hersteller oft nur relativ wenige Daten verfügbar sind, ist eine Ersatzschaltung erforderlich, welche mit sehr wenig produktespezifischen Daten auskommt, die praktisch von allen Herstellern zur Verfügung gestellt werden. Diese Daten sind die maximale Betriebsgleichspannung  $U_{VDC}$  des Varistors und der maximal zulässige Stossstrom  $I_{8/20}$  bei der Kurvenform 8/20  $\mu$ s.

Um übliche Werkzeuge der Netzwerktheorie einsetzen zu können, ist eine Linearisierung der Schaltung zweckmässig.

Da Blitzströme von aussen eingeprägte Ströme sind, also den Charakter von idealen Stromquellen haben, kann zudem die Rückwirkung des in der Schleife mit dem Varistor fliessenden Stroms  $i_v = i_s$  auf den primären Strom  $i$  vernachlässigt werden. Damit erhält man die in Bild 3 dargestellte Ersatzschaltung für eine mit dem Blitzstrom gekoppelte Schleife mit Überspannungsableiter.

Wird der Varistor in der linearisierten Schaltung durch eine reale Spannungsquelle mit  $U_v = 2 \cdot U_{VDC}$  und einem Innenwiderstand  $R_v = U_{VDC}/i_{s0\max}$  ersetzt, liegt man auf jeden Fall auf der sicheren Seite. Für relativ grosse Werte der effektiven Gegeninduktivität  $M_i = k_C \cdot M$  (typischerweise  $M_i >$  etwa 1  $\mu$ H) kann der Strom  $i_v$  nach Erreichen des Wertes 0 auch noch negativ werden. In diesem Fall ist für die Berechnung des negativen Bereichs von  $i_v$  das Vorzeichen der Spannungsquelle

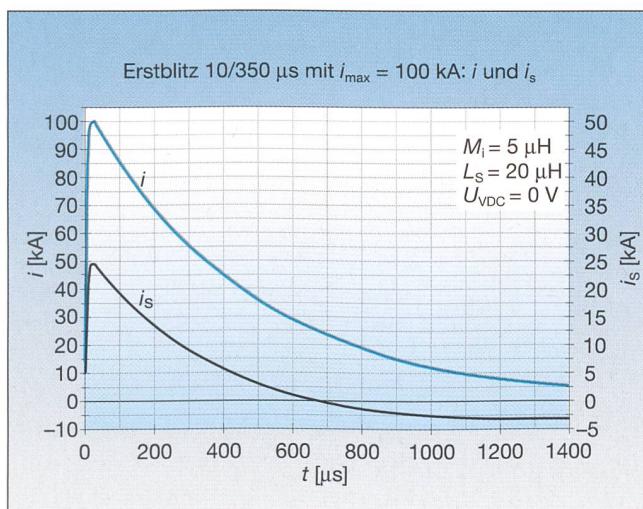


Bild 4 In einer relativ grossen Schleife mit  $M_i = 5 \mu$ H und  $L_s = 20 \mu$ H (ohne Varistor) von einem Erstblitz mit  $i_{\max} = 100$  kA induzierter Kurzschlussstrom  $i_s$

Wegen des sehr kleinen Widerstandes ( $R_s = 20 \text{ m}\Omega$ ) gilt nach (3)  $i_s \approx i_{s0}$ . Am Anfang sind die Verläufe von  $i_s$  und  $i$  deshalb sehr ähnlich. Nach längerer Zeit wird dagegen  $i_s$  (wegen des von  $\sigma_3$  stammenden dritten Pols) leicht negativ. Der erreichte negative Spitzenwert ist aber viel kleiner als  $i_{s0\max}$ .

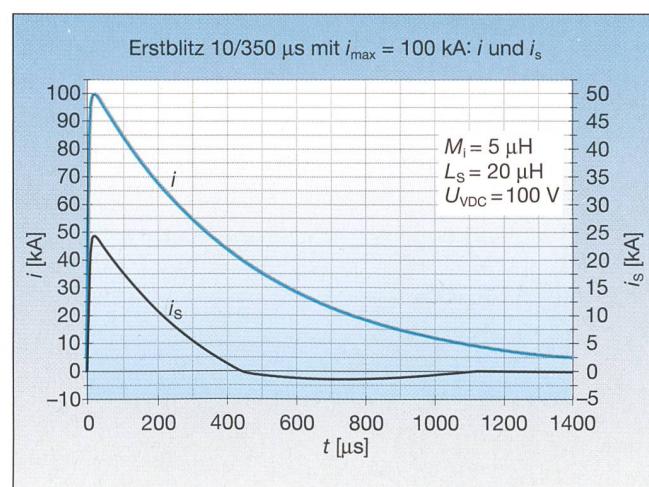


Bild 5 In der gleichen wie in Bild 4 verwendeten Schleife mit einem Varistor mit einer relativ kleinen maximalen DC-Betriebsspannung  $U_{VDC} = 100$  V von einem Erstblitz mit  $i_{\max} = 100$  kA induzierter Strom  $i_s = i_v$

Weil  $U_{VDC} > 0$  ist, fällt  $i_s$  nun rascher ab. Wegen des relativ grossen Wertes von  $M_i$  und des relativ kleinen Wertes von  $U_{VDC}$  reicht die im Rücken des Blitzstroms induzierte negative Spannung  $u_s$  noch aus, um nach dem Nulldurchgang von  $i_s$  kurzzeitig noch einen kleinen negativen Strom zu erzeugen.

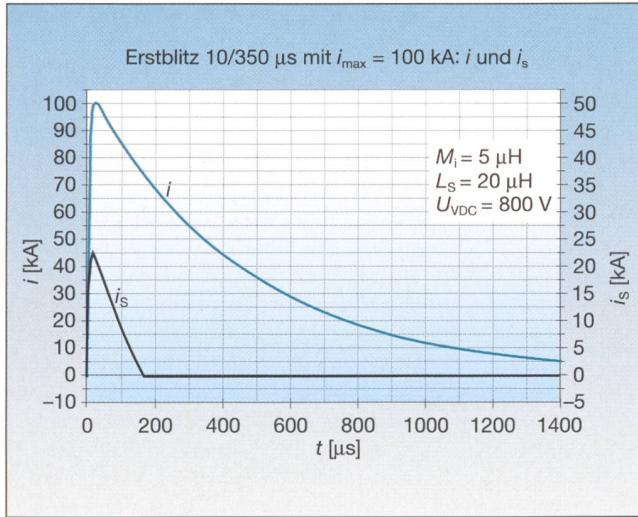


Bild 6 In der gleichen wie in Bild 4 verwendeten Schleife mit einem Varistor mit einer relativ grossen maximalen DC-Betriebsspannung  $U_{VDC} = 800$  V von einem Erstblitz mit  $i_{max} = 100$  kA induzierter Strom  $i_s = i$

Da  $U_{VDC}$  relativ gross ist, erreicht  $i_s$  nicht mehr ganz den Spitzenwert  $i_{smax}$  von Bild 4 und fällt sehr rasch ab. Nachdem  $i_s$  den Wert 0 erreicht hat, reicht die im Rücken des Blitzstroms induzierte negative Spannung  $u_s$  trotz dem relativ grossen Wert von  $M_i$  wegen des grossen Wertes von  $U_{VDC}$  nicht mehr aus, um noch einen negativen Strom zu erzeugen.

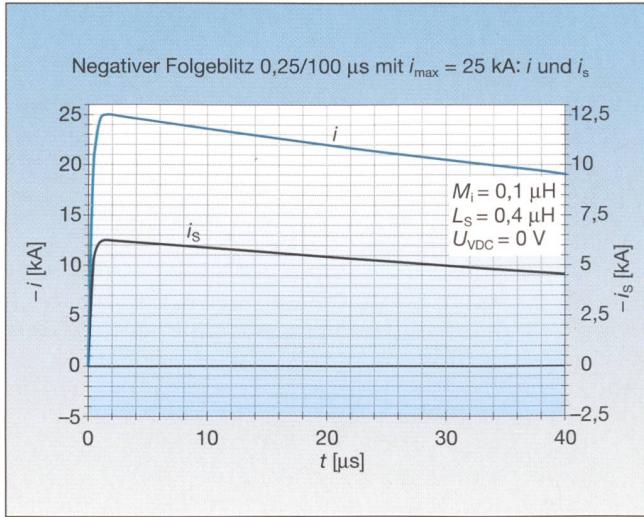


Bild 7 In einer relativ kleinen Schleife mit  $M_i = 0,1$   $\mu$ H und  $L_s = 0,4$   $\mu$ H (ohne Varistor) von einem negativen Folgeblitz mit  $i_{max} = 25$  kA induzierter Kurzschlussstrom  $i_s$

Wegen des sehr kleinen Widerstandes ( $R_s = 0,4$  mΩ) gilt nach (3)  $i_s = i_{s0}$ . Am Anfang sind die Verläufe von  $i_s$  und  $i$  deshalb sehr ähnlich. Nach längerer Zeit wird  $i_s$  (wegen des von  $\sigma_3$  stammenden dritten Pols) wie in Bild 4 noch kurzzeitig leicht negativ (wegen des gewählten Zeitmaßstabs hier nicht sichtbar). Der erreichte negative Spitzenwert ist aber wiederum viel kleiner als  $i_{smax}$ .

$U_V$  in der linearisierten Ersatzschaltung umzukehren.

## Berechnung des Stromes $i_V$ mit der Laplace-Transformation

Die Laplace-Transformierte  $I(s)$  des Blitzstromes nach Formel 5 lautet

$$I(s) = \frac{I}{s + \sigma_1} - \frac{I}{s + \sigma_2} = \frac{I \cdot (\sigma_2 - \sigma_1)}{(s + \sigma_1) \cdot (s + \sigma_2)} \quad (6)$$

Die in der Schleife induzierte Spannung  $U_S(s)$  wird dann

$$U_S(s) = s \cdot M_i \cdot I(s) \quad (7)$$

Damit ergibt sich in der Schaltung nach Bild 3 mit  $\sigma_3 = (R_S + R_V)/L_S$  für den Varistorstrom  $I_S(s) = I_V(s)$

$$I_V(s) = \frac{s \cdot M_i \cdot I(s) - \frac{U_V}{s}}{R_S + R_V + s \cdot L_S} = \frac{M_i \cdot s \cdot I(s)}{L_S \cdot (s + \sigma_3)} - \frac{U_V}{L_S \cdot s \cdot (s + \sigma_3)} \quad (8)$$

$$I_V(s) = \frac{I \cdot M_i \cdot s \cdot (\sigma_2 - \sigma_1)}{L_S \cdot (s + \sigma_1) \cdot (s + \sigma_2) \cdot (s + \sigma_3)} - \frac{U_V}{L_S \cdot s \cdot (s + \sigma_3)} \quad (9)$$

Durch Rücktransformation in den Zeitbereich ergibt sich

$$i_V(t) = \frac{I \cdot M_i}{L_S} \cdot \left[ -\frac{\sigma_1 \cdot e^{-\sigma_1 \cdot t}}{(\sigma_3 - \sigma_1)} + \frac{\sigma_2 \cdot e^{-\sigma_2 \cdot t}}{(\sigma_3 - \sigma_2)} + \frac{\sigma_3 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot e^{-\sigma_3 \cdot t}}{(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot (\sigma_2 - \sigma_3)} \right] - \frac{U_V \cdot (1 - e^{-\sigma_3 \cdot t})}{L_S \cdot \sigma_3} \quad (10)$$

Zu einer bestimmten Zeit  $t_0$  erreicht  $i_V(t)$  den Wert 0. Für  $t > t_0$  wird  $i_V < 0$ . Für die Berechnung des negativen Bereiches von  $i_V < 0$  muss das Vorzeichen der Quelle  $U_V$  in Bild 3 umgekehrt werden. Da bei realen Blitzströmen  $\sigma_2 \gg \sigma_1$  ist, gilt für  $t > t_0$

$$i(t) \approx I \cdot e^{-\sigma_1 \cdot t} = I \cdot e^{-\sigma_1 \cdot t_0} \cdot e^{-\sigma_1 \cdot \tau} \quad (11)$$

wobei  $\tau = t - t_0$

Die Spannung  $u_s(t) = M_i \cdot di/dt$  beträgt somit

$$u_s(t) = -\sigma_1 \cdot M_i \cdot I \cdot e^{-\sigma_1 \cdot t} = -\sigma_1 \cdot M_i \cdot I \cdot e^{-\sigma_1 \cdot t_0} \cdot e^{-\sigma_1 \cdot \tau} \quad (12)$$

Die entsprechende Laplace-Transformierte (bezüglich des Zeitnullpunktes  $\tau = 0$ ) lautet

$$U_s(s) = -\sigma_1 \cdot M_i \cdot I \cdot e^{-\sigma_1 \cdot t_0} \cdot \frac{1}{(s + \sigma_1)} \quad (13)$$

Damit ergibt sich für  $I_V(s)$

$$I_V(s) = \left( -\frac{\sigma_1 \cdot M_i \cdot I \cdot e^{-\sigma_1 \cdot t_0}}{s + \sigma_1} + \frac{U_V}{s} \right) \cdot \frac{1}{R_S + R_V + s \cdot L_S} \quad (14)$$

$$I_V(s) = \frac{-\sigma_1 \cdot M_i \cdot I \cdot e^{-\sigma_1 \cdot t_0}}{L_S \cdot (s + \sigma_1) \cdot (s + \sigma_3)} + \frac{U_V}{L_S \cdot s \cdot (s + \sigma_3)} \quad (15)$$

Durch Rücktransformation in den Zeitbereich ergibt sich (für  $t > t_0$ )

$$i_V(t) = -\sigma_1 \cdot M_i \cdot I \cdot e^{-\sigma_1 \cdot t_0} \cdot \frac{(e^{-\sigma_1 \cdot (t - t_0)} - e^{-\sigma_3 \cdot (t - t_0)})}{L_S \cdot (\sigma_3 - \sigma_1)} + \frac{U_V \cdot (1 - e^{-\sigma_3 \cdot (t - t_0)})}{L_S \cdot \sigma_3} \quad (16)$$

Diese Lösung gilt für  $t > t_0$ , solange  $i_V < 0$  ist. Wenn  $i_V$  den Wert 0 erreicht hat, würde eigentlich wieder das Original-Ersatzschema gemäß Bild 3 gelten. Da aber  $u_s$  im Rücken des Blitzes negativ bleibt, ist keine treibende Spannung vorhanden, die erneut ein  $i_V > 0$  erzeugen könnte, d.h.  $i_V$  bleibt endgültig 0.

## Vereinfachende Annahmen für die Berechnung von Worst-Case-Varistorströmen

Um auf der sicheren Seite zu bleiben (Worst-Case-Abschätzung), genügt es, relativ kleine Werte von  $R_S$  und  $R_V$  zu untersuchen. Für die Simulation mit dem Computer wurden deshalb folgende Werte verwendet (automatisch aus den gewählten Werten von  $L_S$  und  $U_V =$

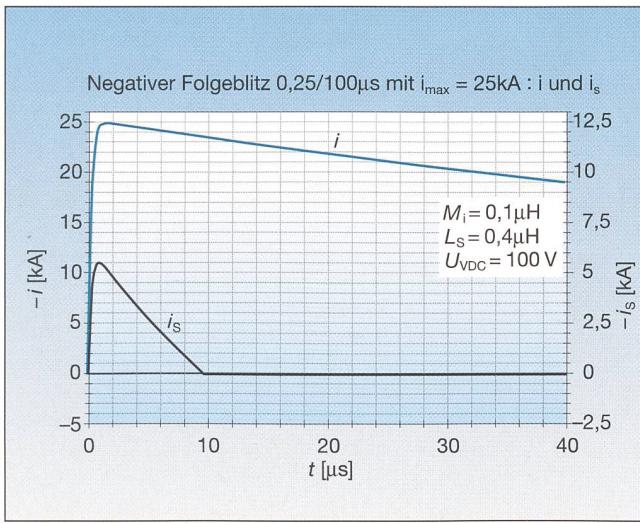


Bild 8 In der gleichen wie in Bild 7 verwendeten Schleife mit einem Varistor mit einer relativ kleinen maximalen DC-Betriebsspannung  $U_{VDC} = 100 \text{ V}$  von einem negativen Folgeblitz mit  $i_{\max} = 25 \text{ kA}$  induzierter Strom  $i_s = i_v$ .

$i_s$  erreicht gegenüber  $i_{s\max}$  von Bild 7 bereits einen etwas kleineren Maximalwert. Weil  $U_{VDC} > 0$  ist, fällt  $i_s$  viel rascher ab. Nachdem  $i_s$  den Wert 0 erreicht hat, reicht die im Rücken des Blitzstroms induzierte negative Spannung  $u_s$  wegen des ziemlich kleinen Wertes von  $M_i$  trotz dem kleinen Wert von  $U_{VDC}$  nicht mehr aus, um noch einen negativen Strom zu erzeugen.

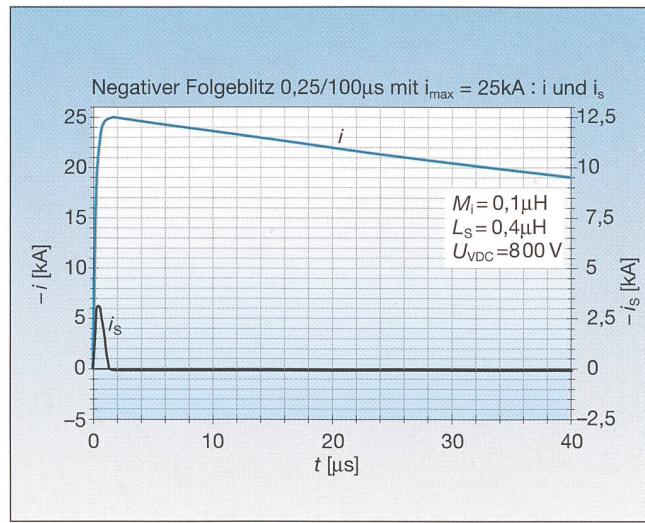


Bild 9 In der gleichen wie in Bild 7 verwendeten Schleife mit einem Varistor mit einer relativ grossen maximalen DC-Betriebsspannung  $U_{VDC} = 800 \text{ V}$  von einem negativen Folgeblitz mit  $i_{\max} = 25 \text{ kA}$  induzierter Strom  $i_s = i_v$ .

Da  $U_{VDC}$  relativ gross ist, erreicht  $i_s$  gegenüber  $i_{s\max}$  von Bild 7 einen viel kleineren Spitzenwert und fällt äusserst rasch ab. Nachdem  $i_s$  den Wert 0 erreicht hat, reicht die negative Spannung  $u_s$  im Rücken des Blitzstroms deshalb nicht mehr aus, um einen negativen Strom zu erzeugen.

$2 \cdot U_{VDC}$  berechnet):  $R_s = L_s \cdot 1 \text{ m}\Omega/\mu\text{H}$ ,  $R_V = U_{VDC}/i_{s0\max}$ , d.h. der totale Spannungsabfall am Varistor bei  $i_{s0\max}$  ist  $3 \cdot U_{VDC}$ .

Die Bilder 4 bis 9 zeigen einige Beispiele von mit diesen Annahmen berechneten Varistorströmen mit relativ kleinen und relativ grossen Werten von  $M_i$  und  $U_{VDC}$ . Um vergleichbare Verhältnisse zu erhalten, wurde bei allen Beispielen das gleiche Verhältnis  $M_i/L_s = 1/4$  gewählt.

### Einige Beispiele von berechneten Varistorströmen

Bei den Beispielen mit relativ grosser effektiver Gegeninduktivität  $M_i$  gemäss den Bildern 5 und 6 dauert der Stossstrom  $i_s$  viel länger als ein Stossstrom  $I_{8/20}$ , für den die meisten Ableiter spezifiziert sind. Soll der Ableiter keinen Defekt erleiden, muss er deshalb für einen höheren Stossstrom  $I_{8/20}$  als der in den Bildern 5 und 6 auftretende Maximalstrom  $i_{s\max}$  ausgelegt werden. Eine konservative Annahme ist dabei, dass die infolge  $i_s$  durch den Varistor fliessende Ladung  $Q$  (Beiträge der positiven und negativen Halbwelle addiert) gleich gross sein darf wie die Ladung  $Q_s$  eines Stossstromes  $I_{8/20}$ , wobei  $Q_s \approx I_{8/20} \cdot 20 \mu\text{s}$  gilt. Da bei kleineren Strömen die Spannung am Varistor und damit die umgesetzte Energie etwas kleiner ist, liegt man mit dieser Annahme auf der sicheren Seite. Damit kann für diese Fälle ein Korrekturfaktor  $k_V$  bezüg-

lich des leicht zu berechnenden maximalen Kurzschlussstroms  $i_{s0\max}$  der verlustlosen Schleife bestimmt werden (Bild 10).

Bei den Beispielen mit relativ kleiner effektiver Gegeninduktivität  $M_i$  gemäss den Bildern 8 und 9 dauert der Stossstrom  $i_s$  dagegen viel weniger lang als ein Stossstrom  $I_{8/20}$ . Die auf Grund von  $i_s$  umgesetzte Ladung ist deshalb viel kleiner als die vom Stossstrom  $I_{8/20}$  umgesetzte. Der Varistor könnte daher eigentlich viel kleiner gewählt werden. Da bei grösseren Strömen als der Nennstrom die Spannung ansteigt und Schäden möglich sind, wäre eine Dimensionierung auf gleiche umgesetzte Ladung aber nicht mehr konservativ. Dagegen kann in diesen Fällen der spezifizierte Maximalstrom  $I_{8/20}$  des zu verwendenden Varistors gleich dem effektiv auftretenden Maximalstrom  $i_{s\max}$  gewählt werden, der hier etwas kleiner ist als der leicht zu berechnende maximale Kurzschlussstrom  $i_{s0\max}$  der verlustlosen Schleife (vergleiche Bilder 7 und 9). Damit kann auch für diese Fälle ein entsprechender Korrekturfaktor  $k_V$  bezüglich des leicht zu berechnenden maximalen Kurzschlussstrom  $i_{s0\max}$  der verlustlosen Schleife bestimmt werden (siehe Bild 10). Bei sehr kleinen Werten von  $M_i$  erzeugen zudem nur noch die etwas stromschwächeren negativen Folgeblitze mit ihren höheren  $(di/dt)_{\max}$ -Werten (100–200  $\text{kA}/\mu\text{s}$  nach [1,3]) genügend hohe Spannungen, um die Varistoren zum

Leiten zu bringen. Da negative Folgeblitze jedoch mehrfach auftreten können, ist es trotzdem zweckmässig, für die strommässige Dimensionierung der Varistoren mit den gleichen Maximalströmen  $i_{\max}$  wie für Erstblitze (100–200 kA nach [1,3]) zu rechnen. Es können dann bis zu vier in kurzer Zeit aufeinander folgende Blitze (mit Maximalströmen von 25 bis 50 kA nach [1,3]) verkraftet werden.

### Einfaches Verfahren zur Bestimmung des nötigen Varistor-Nennstroms $I_{V8/20}$

Um ein einfach zu handhabendes Verfahren zur Bestimmung des für eine bestimmte Anwendung notwendigen Varistor-Nennstroms  $I_{V8/20}$  der Kurvenform 8/20  $\mu\text{s}$  zu erhalten, wurde unter den beschriebenen Annahmen für verschiedene Werte der Varistor-DC-Nennspannung  $U_{VDC}$  ein Varistor-Korrekturfaktor  $k_V$  in Funktion der effektiven Gegeninduktivität  $M_i = k_C \cdot M$  ermittelt. Unter diesen Annahmen ist  $k_V$  nur noch von  $M_i$  und  $U_{VDC}$  abhängig, wie in Bild 10 dargestellt. Damit kann der notwendige Varistor-Nennstrom  $I_{V8/20}$  aus dem leicht aus  $M_i$  und  $L_s$  berechenbaren maximalen Kurzschlussstrom  $i_{s0\max}$  der verlustlosen Schleife berechnet werden.

$$I_{V8/20} = k_V \cdot i_{s0\max} = k_V \cdot \frac{M_i}{L_s} \cdot i_{\max} \quad (17)$$

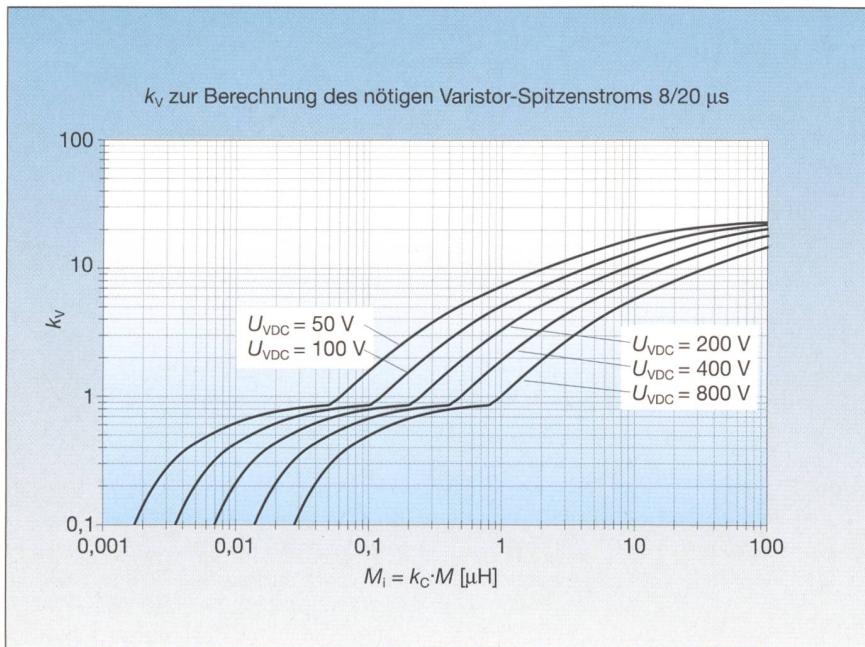


Bild 10 Varistor-Korrekturfaktor  $k_V$  für die Bestimmung des notwendigen Varistorstroms  $I_{V8/20}$  aus dem maximalen Kurzschlussstrom der verlustlosen Schleife mit (17)

Die bei der Berechnung dieser Kurven gemachten Annahmen sind konservativ, d.h. bei Verwendung dieser Werte befindet man sich bei normalen Blitzschutzanforderungen immer auf der sicheren Seite.

### Beispiele für normale Blitzschutzanforderungen

Die folgenden Berechnungen gelten für einen Blitzstrom mit  $i_{\max} = 100$  kA.

$$k_C = 0,5, M = 10 \mu\text{H}, L_S = 20 \mu\text{H}, U_{VDC} = 800 \text{ V}$$

Der maximale Kurzschlussstrom  $i_{S0\max}$  der verlustlosen Schleife sowie der notwendige Varistor-Spitzenstrom  $I_{V8/20}$  (Situation von Bild 6) berechnen sich gemäss (4) und (17) zu

$$k_C = 0,5 \Rightarrow M_i = k_C \cdot M = 5 \mu\text{H} \\ \Rightarrow i_{S0\max} = i_{\max} \cdot M_i / L_S = 25 \text{ kA}$$

gemäss (4).

Bild 10 entnimmt man bei  $M_i = 5 \mu\text{H}$  und  $U_{VDC} = 800 \text{ V}$  den Wert  $k_V = 4$ . Somit ergibt sich nach (17)  $I_{V8/20} = 100 \text{ kA}$ .

$$k_C = 0,25, M = 0,2 \mu\text{H}, L_S = 1 \mu\text{H}, U_{VDC} = 400 \text{ V}$$

Der maximale Kurzschlussstrom  $i_{S0\max}$  der verlustlosen Schleife sowie der notwendige Varistor-Spitzenstrom  $I_{V8/20}$  berechnen sich

$$k_C = 0,25 \Rightarrow M_i = k_C \cdot M = 0,05 \mu\text{H} \\ \Rightarrow i_{S0\max} = i_{\max} \cdot M_i / L_S = 5 \text{ kA}$$

gemäss (4).

Aus Bild 10 entnimmt man bei  $M_i = 0,05 \mu\text{H}$  und  $U_{VDC} = 400 \text{ V}$  den Wert  $k_V = 0,5$ . Aus (17) folgt somit  $I_{V8/20} = 2,5 \text{ kA}$ .

- [4] H. Häberlin, R. Minkner: Blitzschläge – eine Gefahr für Solarmodule? Experimente zur Bestimmung der Blitzstromempfindlichkeit von Photovoltaikanlagen. Bulletin SEV/VSE 84(1993)1.
- [5] H. Häberlin, R. Minkner: Einfache Methode zum Blitzschutz von Photovoltaikanlagen. Bulletin SEV/VSE 85(1994)19.
- [6] H. Häberlin: Blitzschutz von Photovoltaikanlagen. 6-teilige Serie in Elektrotechnik 4/2001 bis 10/2001.
- [7] H. Häberlin: Von simulierten Blitzströmen in Solarmodulen und Solargeneratoren induzierte Spannungen. Bulletin SEV/VSE 92(2001)10.
- [8] P. Hasse, P. Zahlmann: Endgeräteschutz bei direkten Blitzeinschlägen. Elektrotechnik 7/8, 2001.

### Links

[www.pvtest.ch](http://www.pvtest.ch): Informationen über weitere Aktivitäten des Photovoltaiklagers der HTA Burgdorf und weitere Publikationen (teilweise online)

### Adresse des Autors

Berner Fachhochschule, Hochschule für Technik und Architektur Burgdorf, 3400 Burgdorf: Prof. Dr. Heinrich Häberlin, Tel. 034 426 68 11, [heinrich.haeberlin@hta-bu.bfh.ch](mailto:heinrich.haeberlin@hta-bu.bfh.ch)

<sup>1</sup> Bei aperiodischen Stossströmen kann neben der Angabe des Maximalwertes auch die Form mit zwei Indices charakterisiert werden. Die beiden Indices geben dabei Zeiten in  $\mu\text{s}$  an. Der erste Index bedeutet die Stirnzeit  $T_1$  des Stromes, d.h. die Zeit, in welcher der wesentliche Teil des Stromantriebs erfolgt. Sie ist etwas kleiner als die Zeit vom Beginn bis zum Erreichen des Maximalwerts  $i_{\max}$ . Der zweite Index bedeutet die Rückenhalbwertszeit  $T_2$ , d.h. die Zeit seit Beginn, bis der Strom nach dem Erreichen des Maximalwertes wieder auf die Hälfte dieses Wertes gefallen ist.  $I_{V8/20} = 10 \text{ kA}$  bedeutet somit einen Stossstrom mit dem Maximalwert  $i_{\max} = 10 \text{ kA}$ , einer Stirnzeit  $T_1 = 8 \mu\text{s}$  und einer Rückenhalbwertszeit  $T_2 = 20 \mu\text{s}$ .

<sup>2</sup> Varistoren sind spannungsabhängige Widerstände, VDR (Voltage Dependent Resistor).

<sup>3</sup>  $Q$  = Ladung des Blitz- oder Stossstromes.

### Referenzen

- [1] P. Hasse, J. Wiesinger: Handbuch für Blitzschutz und Erdung. Pflaum-Verlag, München, 1989, ISBN 3-7905-0559-5.
- [2] SEV-Norm SEV4022.1987: Leitsätze des SEV: Blitzschutzanlagen. 6. Auflage (in Kraft seit 11.1987).
- [3] Europäische Vornorm EN 61024-1(1995): Blitzschutz baulicher Anlagen.

## Utilisation des parasurtensions dans la protection contre la foudre

### Dimensionnement des varistances dans les boucles à couplage inductif

Dans la protection interne des installations électriques contre la foudre, on a souvent recours à des parasurtensions destinés à empêcher l'apparition de surtensions dangereuses pour les installations. Afin de pouvoir assumer cette fonction, les parasurtensions doivent souvent supporter brièvement des courants fort importants sans être eux-mêmes endommagés. Avec le procédé décrit au présent article, dont les bases théoriques sont exposées dans le détail, il est possible de déterminer à peu de frais le courant nominal nécessaire des varistances utilisées dans des boucles couplées par induction au courant de foudre afin de limiter les surtensions. On peut ainsi dimensionner les varistances à utiliser avec une plus grande précision en fonction des sollicitations à attendre, ce qui permet d'éviter aussi bien les défaillances dues à un dimensionnement insuffisant que les frais inutiles entraînés par un surdimensionnement.