Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 71 (1980)

Heft: 9

Artikel: Gefährdung der elektronischen Systeme durch Blitzeinschlag

Autor: Ari, N.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905248

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: 09.08.2025

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

Gefährdung der elektronischen Systeme durch Blitzeinschlag

Von N. Ari

551.594.221:621.3.032;

Die Beeinflussung elektronischer Systeme durch Strahlung von Blitzströmen wird untersucht. Mit Hilfe der Distributionstheorie können sowohl der Blitzstrom wie auch die Ausbreitungsphänomene mathematisch und physikalisch erfasst werden. Mit einem Analyseprogramm können dann die interessierenden Grössen, z.B. Ströme, Spannungen usw., an jedem Punkt des elektronischen Systems bestimmt werden.

L'influence de la foudre sur des systèmes électroniques par rayonnement du courant de foudre est examinée. A l'aide de la théorie de la distribution, on peut tenir compte, mathématiquement et physiquement, aussi bien du courant de foudre, que des phénomènes de propagation. Un programme d'analyses permet de déterminer les grandeurs intéressantes, telles que courant, tension, etc., à chaque point du système électronique.

Formelbezeichnungen

A	Vektorpotential
V	Skalarpotential
$\rightarrow$	Vektorbezeichnung
E	Elektrische Feldstärke, Strahlungsfeldstärke
j	Stromdichte
ϱ	Ladungsdichte
Δ	Laplace-Operator
δ	Deltafunktion (Dirac-Stoss), Distribution
$\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\Phi$	Einheitsvektoren in Kugelkoordinaten
$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$	Einheitsvektoren im cartesischen Koordinatensystem
I	Amplitude der Stromwelle
U_i	Induzierte Spannung
ε	Dielektrizitätskonstante
μ	Permeabilität
c	Lichtgeschwindigkeit
r	Ortsvektor
θ	Raumwinkel
H_B	Höhe des Blitzkanals
I_M	Maximalwert des Stromes
t	Zeit
E_V	Feldstärkekomponente des Skalarpotentials
E_A	Feldstärkekomponente des Vektorpotentials
EMW	Elektromagnetische Welle

1. Allgemeines über Blitzphänomene

Man betrachtet eine Gewitterwolke, in der durch Ladungsverschiebung ein elektrisches Feld entsteht. Das elektrische Feld kann entweder zwischen Wolken oder zwischen Wolken und Erde definiert werden. Erreicht an irgendeiner Stelle in der Gewitterwolke die Feldstärke ihren kritischen Wert, so wird eine Blitzentladung ausgelöst. Diese Entladung kann von einer Wolke zur anderen Wolke (Wolkenblitze), von einer Wolke zur Erde (Wolke–Erde-Blitze) oder von der Erde zur Wolke (Erde–Wolke-Blitze) erfolgen.

Da die Wolke-Erde-Blitze für die betrachteten Geräte eine höhere Gefährdung darstellen, soll der Vorwachsmechanismus dieser Blitze näher erläutert werden [1; 2]. Am häufigsten treten die negativen Typen der Wolke–Erde-Blitze auf. Ein Ladungsgebilde mit einem dünnen, hochionisierten Plasmakanal wächst ruckstufenweise zur Erde vor. Er wird Leitblitz genannt und hat eine bestimmte Vorwachsgeschwindigkeit (ca. 300 km/s). Nähert sich der Leitblitz der Erde, wird die elektrische Feldstärke so gross, dass die Luftfestigkeit überschritten wird. Es entsteht eine Fangentladung von der Erde aus, welche mit dem Leitblitz einen hochionisierten Funken bildet. Dadurch fliesst ein sehr hoher, kurzzeitiger Stoßstrom in die Erde ab. Dieser steigt in einigen Mikrosekunden auf einen Maximalwert von einigen 10 kA an und geht mit einer Rückenhalbwertzeit von einigen 10 µs zurück (Fig. 1).

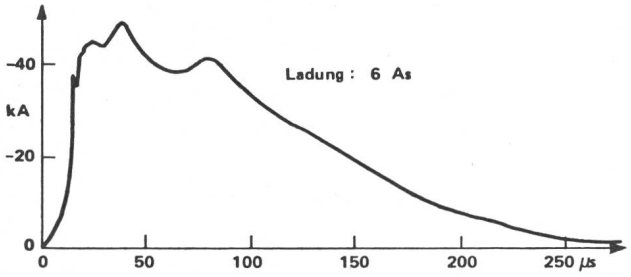

Fig. 1 Messung eines Blitzstromes (K. Berger)

Der Blitzstrom kann als Überlagerung zweier Exponentialfunktionen dargestellt werden, wobei die eine den ansteigenden und die andere den abklingenden Teil des Blitzstromes charakterisiert.

$$i(t) = I_0 \left[e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2} \right]; \; \tau_1 \gg \tau_2 \qquad (1)$$

Für die praktischen und theoretischen Untersuchungen wird der Blitzstrom durch einen Normstoßstrom simuliert (1/50-Stoss).

2. Problemstellung

Das Problem der Beeinflussung kann grundsätzlich in drei Hauptgebiete aufgeteilt werden (Fig. 2).

Die *Ursache* kann auch als Störquelle bezeichnet werden. In diesem Fall ist es der Blitzstrom. Auch das durch den Blitzstrom erzeugte elektromagnetische Feld kann als Ursache betrachtet werden.

Das *Übertragungssystem* umfasst:

a) Objekte: Leitung, Verbindungen (galvanisch) usw.
b) Luft und Objekte: quasistationäre Kopplungen (kapazitiv, induktiv und Wanderwelle)
c) Luft: Strahlungskopplung

Gemäss Maxwell-Gleichungen erzeugt jeder sich bewegende Strom, auch der Blitzstrom, in seiner Umgebung ein elektromagnetisches (EM) Feld. Will man den Einfluss des Blitzstromes auf elektronische Systeme untersuchen, so ist zuerst das EM-Feld des Blitzstromes zu bestimmen. Dieses kann zeitlich gesehen betrachtet werden als Strahlungsfeld (schnellveränderliche EM-Felder), als quasistationäres EM-Feld oder als stationäres EM-Feld. Befindet sich in diesen Feldern ein elektronisches Gerät, so kann dieses in seiner Funktionsweise gestört werden.

a) Objekte als Übertragungssystem

Der Blitzstrom trifft auf ein Objekt, wie z.B. eine Leitung oder einen leitenden Gegenstand, welches mit dem elektronischen System gemeinsame Verbindungen oder Impedanzen besitzt. Das Problem der Beeinflussung kann als galvanische Beeinflussung bezeichnet werden. Die Analyse erfolgt dann mit Ersatzschaltungen für das ganze System.

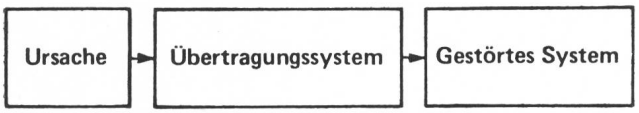

Fig. 2 Das System der Beeinflussung [3]

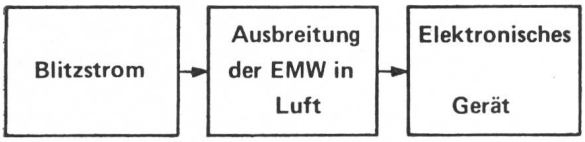

Fig. 3 Blitzbeeinflussungssystem

b) Luft und Objekte als Übertragungssystem

Das durch den Blitzstrom entstandene elektromagnetische Feld kann als quasistationär betrachtet werden. Man kann sich dann folgende Modelle für die Analyse vorstellen:

– *Kapazitive Beeinflussung:* Das elektrische Feld bzw. die elektrische Spannung ist die massgebende Grösse. Es kann eine Kopplungskapazität definiert werden.

– *Induktive Beeinflussung:* Das magnetische Feld bzw. der zeitlich veränderliche Strom ist massgebende Grösse. Es können Gegeninduktivitäten zwischen den leitenden Körpern definiert werden [6]. Damit lassen sich die induzierten Spannungen im gestörten System bestimmen.

– *Wanderwellen-Beeinflussung:* Der Blitzstrom trifft auf ein leitendes Objekt, von welchem aus sich leitungsgebundene Strom- und Spannungswellen fortpflanzen. Massgebend ist die örtliche Verteilung der Ströme bzw. Spannungen. Die Reflexionen spielen dabei eine wesentliche Rolle. Für die Analyse verwendet man die Wanderwellentheorie [4].

c) Luft als Übertragungssystem

Der Blitzstrom erzeugt ein schnellveränderliches elektromagnetisches Feld, indem der Blitzkanal als Sender-Antenne wirkt. Das EM-Feld breitet sich in Luft mit Lichtgeschwindigkeit aus. Das gestörte System verhält sich wie eine Empfänger-Antenne. Für diesen Fall kann die Antennentheorie verwendet werden. In [5] wird das Fernfeld eines Blitzstromes untersucht, wobei der Blitzstrom durch stückweise lineare Approximation ersetzt wird.

In der folgenden Ausführung wird eine allgemeinere Methode erläutert, welche erlaubt, das Blitzbeeinflussungsproblem für diesen Fall mit Hilfe der Distributionstheorie mathematisch und physikalisch zu erfassen. Das in Fig. 2 erläuterte Beeinflussungssystem wird damit zum System der Fig. 3.

Der Entwicklungsingenieur sollte sich beim Entwurf der elektronischen Geräte darüber Gedanken machen, dass das Gerät unter den gegebenen Voraussetzungen noch funktionsfähig bleiben muss. In erster Linie interessiert ihn, wie das Gerät gegen allgemeine Störfelder zu schützen ist. Das Verständnis der Phänomene erleichtert die richtige Anwendung geeigneter Massnahmen. Deshalb soll das Problem physikalisch und mathematisch einigermassen richtig erfasst werden.

3. Blitzstrom

Der durch Gl. (1) definierte Blitzstrom (Fig. 1) bewegt sich nach dem Beginn der Hauptentladung im Blitzkanal mit einer bestimmten Geschwindigkeit bis zum Ende des Blitzkanals nach oben. Man betrachtet ein strahlendes Stromelement im Blitzkanal. Dieses Stromelement kann durch eine Distribution dargestellt werden [7]. Das durch dieses Stromelement erzeugte elektromagnetische Feld breitet sich in der Luft mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Jedes betrachtete Stromelement löst an jedem Punkt des Blitzkanals eine EMW aus, welche sich kugelförmig ausbreitet. Den gesamten Blitzstrom kann man somit als Stromwanderwelle im Blitzkanal betrachten, dessen Form durch die Faltung der Stromelemente, d.h. Distribution, bestimmt wird.

4. Ausbreitung der EMW

Die schnellveränderlichen elektromagnetischen Felder sind durch Maxwellgleichungen beschrieben. Ein elektromagnetisches Feld wird durch das Vektorpotential an einem Aufpunkt nach den hyperbolischen Differentialgleichungen in den Gl. (3) und (4) charakterisiert.

$$\Delta \vec{A} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\vec{j}\mu \tag{3}$$

$$\Delta V - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{\varrho}{\varepsilon} \tag{4}$$

Unter der Annahme, dass die Strom- und Ladungsdichte als Distribution gegeben ist, erhält man für eine kugelförmige Ausbreitung der EMW die folgende fundamentale Lösung [7]:

$$W_3 = \frac{c}{2} \cdot \varepsilon(t) \cdot \delta(c^2 t^2 - r^2) \tag{5}$$

Man betrachtet den ganzen Blitzkanal als vertikale Linie in der (z, y)-Ebene als Quelle. Q_1 habe den kürzesten Abstand zum Aufpunkt P. Die EMW, die von Q_1 ausgelöst wird, erreicht den Aufpunkt P in der Zeit $t_1 = r_1/c$. Q_2 habe den längsten Abstand zum Aufpunkt P. Die EMW, die von Q_2 ausgelöst wird, benötigt die Zeit $t_2 = r_2/c$, bis sie im Aufpunkt P spürbar ist. Entsprechend benötigt die EMW von einem allgemeinen Punkt Q die Zeit $t_p = r_p/c$, bis sie im Aufpunkt

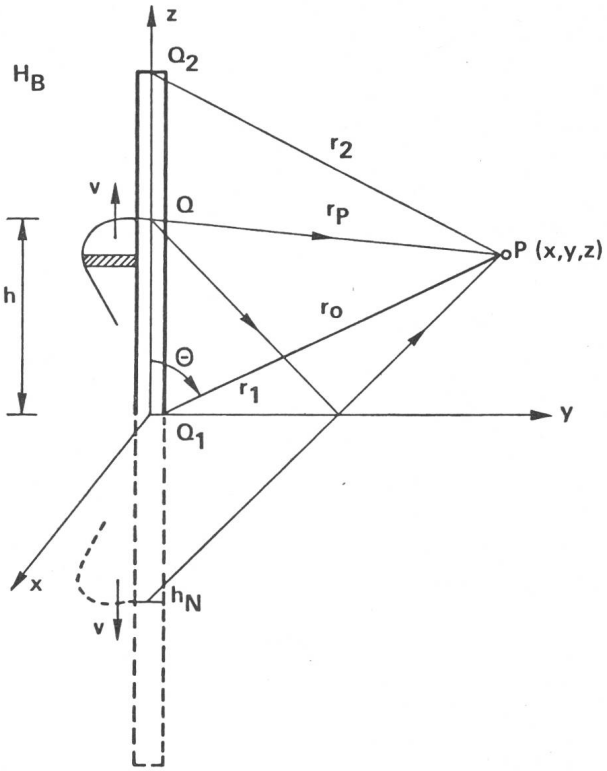

Fig. 4 Quellpunkt Q und Aufpunkt P

bemerkbar wird. Diese Zeit kann auch als eine Laufzeit der EMW zwischen Quellpunkt und Aufpunkt bezeichnet werden. Die Laufzeit ist bekanntlich von der Geometrie des Quell- und Feldpunktes abhängig (Fig. 4).

Feldstärke im Aufpunkt: Die Fundamentallösung nach Gl. (5) beschreibt die elektromagnetischen Potentiale A und V. Wegen der zeitlichen Verzögerung der Phänomene zwischen Quell- und Aufpunkt werden sie «retardierte Potentiale» genannt. Der Blitzstrom bzw. die Ladung an jeder Stelle im Blitzkanal trägt zu diesen Potentialen bei, deshalb sind die retardierten Potentiale als Faltung der einzelnen Beiträge zu bestimmen:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \int_Q \frac{\vec{j}(t-\tau)}{r_p} \, dQ \tag{6}$$

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \int_Q \frac{\varrho(t-\tau)}{r_p} \, dQ \tag{7}$$

Die Strahlungsfeldstärke E ist gegeben durch:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{E}_V + \vec{E}_A \tag{8}$$

Feldstärke eines Stromelementes als Distribution an einem Aufpunkt: Man betrachtet ein Stromelement mit konstanter Amplitude und infinitesimaler Breite, welches vom Anfang des Blitzkanals bis zum Ende des Blitzkanals mit der Geschwindigkeit v fortschreitet. Die Potentiale dieser Distribution sind in den Gleichungen (6) und (7) gegeben. Die Feldstärke am Aufpunkt ist in Gl. (8) definiert.

Man nimmt an, dass die Impulsbreite sehr klein ist im Vergleich zu den Laufzeiten der in Frage kommenden Aufpunkte. Die elektrische Feldstärke des Vektorpotentials, welche von der direkten EMW erzeugt wurde, ist dann gegeben durch [7]:

$$\vec{E}_{Ad} = -\vec{e}_z \cdot \frac{\mu I}{4\pi} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot \int_Q \frac{1}{\sqrt{r_0^2 + h^2 - 2\, r_0\, h \cos\theta}} \, dQ \tag{9}$$

Dieses Integral kann leicht ausgewertet werden für jeden Quellpunkt, wenn die Stromwelle denselben trifft.

Die elektrische Feldstärke des Skalarpotentials der direkten EMW ist gegeben durch:

$$\vec{E}_{Vd} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon c} \overrightarrow{\text{grad}} \left\{ \int_Q \frac{1}{\sqrt{r_0^2 + h^2 - 2\, r_0\, h \cos\theta}} \, dQ \right\} \tag{10}$$

Ausgewertet für Kugelkoordinaten ergibt sich:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{Vd} = -\frac{I}{4\pi\varepsilon c} \cdot \Bigg\{ & \frac{1}{\sqrt{r_0^2 + h^2 - 2\, h r_0 \cos\theta}} \left[-\frac{h}{r_0}; \frac{r_0 - h\cos\theta}{r_0 \sin\theta}; 0 \right]_{h_1}^{h_2} \\ & + \frac{1}{\sqrt{r_0^2 + h_2^2 - 2\, h_2\, r_0 \cos\theta}} \left[\frac{\partial h_2}{\partial r}; \frac{1}{r_0} \frac{\partial h_2}{\partial \theta}; 0 \right] \\ & - \frac{1}{\sqrt{r_0^2 + h_1^2 - 2\, h_1\, r_0 \cos\theta}} \left[\frac{\partial h_1}{\partial r}; \frac{1}{r_0} \frac{\partial h_1}{\partial \theta}; 0 \right] \Bigg\} \cdot \left\{ \vec{e}_r; \vec{e}_\theta; \vec{e}_\Phi \right\} \end{aligned} \tag{11}$$

wobei h_1 und h_2 die variablen Positionen der Stromwelle im Blitzkanal darstellen.

Die Feldstärkegleichungen (10) und (11) gelten für eine Stromdistribution mit der Amplitude I. Die zeitliche Dauer der Feldstärke ist gegeben durch

$$\frac{r_0}{c} \leqq t \leqq \frac{H_B}{v} + \frac{\sqrt{r_0^2 + H_B^2 - 2\, r_0\, H_B \cos\theta}}{c} \tag{12}$$

wobei H_B/v die Zeit ist, in der die Stromwelle das Ende des Kanals erreicht. Am Ende des Blitzkanals wird die Stromwelle gemäss Leitungstheorie reflektiert. Die reflektierte Stromwelle erzeugt wiederum eine Strahlungsfeldstärke, welche analog gerechnet werden kann.

Die totale Strahlungsfeldstärke an einem Aufpunkt wird nach dem Spiegelungsprinzip berechnet. Die Feldstärkegleichungen der direkten Welle sind in den Gleichungen (9) und (10) gegeben. Die Feldstärkegleichungen für die reflektierte Welle sind gegeben durch

$$\vec{E}_{Ar} = \vec{e}_z \frac{\mu I}{4\pi} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \int_Q \frac{1}{\sqrt{r_0^2 + h_N^2 + 2\, r_0\, h_N \cos\theta}} \, dQ \tag{13}$$

E_{Vr} erhält man, indem $\cos\theta$ in Gl. (11) durch $\cos(\pi - \theta)$ ersetzt wird. Dabei wurde eine ideale Reflexion am Boden angenommen. Die Zeitdauer der Strahlungsfeldstärke der am Boden reflektierten Welle beträgt

$$\frac{r_0}{c} \leqq t \leqq \frac{H_B}{v} + \frac{\sqrt{r_0^2 + H_B^2 + 2\, r_0\, H_B \cos\theta}}{c} \tag{14}$$

Die reflektierte EMW ist am Aufpunkt länger wirksam als die direkte Welle, wie es auch geometrisch eindeutig ersichtlich ist (Fig. 4).

Die totale Strahlungsfeldstärke ist dann als Summe der Gleichungen (9) bis (14) bestimmt.

Betrachtet man Aufpunkte mit längerer Distanz, so ist nur die Komponente

$$\vec{E}_A = -\partial \vec{A}/\partial t \tag{15}$$

für die Strahlungsfeldstärke massgebend. D.h., es wird nur das retardierte Vektorpotential A betrachtet und die Strahlungsfeldstärke von der direkten und der reflektierten elektromagnetischen Welle nach Gl. (9) und (13) berechnet.

Die Gleichungen (9) bis (14) können mit dem Computer für gegebene Randbedingungen gelöst werden. Die Ausrechnung geschieht für jedes Stromelement. Die Strahlungsfeldstärken jedes Stromelementes müssen aber zeitrichtig am Aufpunkt überlagert werden. Dies geschieht auch sinnvoll mit einem Computerprogramm. Man erhält dann an jedem Aufpunkt die Strahlungsfeldstärke als Zeitfunktion.

5. Das gestörte elektronische System

Jedes elektronische System wird schon in der Planungsphase gegen äussere Störungen geschützt konzipiert. Die Störungen können durch entsprechende Massnahmen vermindert werden [3; 8].

Steht ein elektronisches System nicht in geschlossenen Räumen, wie es z.B. bei Seilschwingungsmessungen bei Freileitungen der Fall ist, so wird das System stärker beeinflusst,

als wenn es sich in einem Raum befindet, welcher mehr oder weniger gegen Störfelder abgeschirmt ist.

Steht das System in einem abgeschirmten Raum, so muss die Strahlungsfeldstärke im Innenraum bzw. in dem elektronischen System berechnet werden. Dabei verwendet man die Abschirmungstheorie, in der die EMW in die auffallende, reflektierte und eingedrungene Komponente zerlegt wird. Unter Berücksichtigung der elektrischen Eigenschaft der Abschirmmaterialien bestimmt man die Strahlungsfeldstärke im elektronischen System [9].

Analyse im elektronischen System: Die Strahlungsfeldstärke wurde an einem Aufpunkt bestimmt. Dringt sie in das elektronische System ein, so kann zwischen dieser Stelle und dem Bezugssystem eine Spannung definiert werden, die auch als induzierte Spannung bezeichnet werden kann:

$$U_i = -\int \vec{E} \cdot \vec{ds} \qquad (16)$$

Die Analyse wird am einfachsten mit einem vorhandenen Analyseprogramm für elektronische Schaltungen durchgeführt[1]). Die Änderung der elektrischen Grössen (Strom und Spannungen) an jeder beliebigen Stelle kann damit erfasst werden. Das analoge Vorgehen wurde bereits für einen Hochspannungsteiler verwendet. Ergebnisse sind in [10] ausführlich dargestellt. Für die Analyse im elektronischen System kann auch die Methode in [11] verwendet werden.

[1]) SUPERSEPTR, ECAP usw., auch im Rechenzentrum BBC Baden vorhanden.

Literatur

[1] *K. Berger* und *E. Vogelsanger:* Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955–1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.

[2] *J. Wiesinger* und *P. Hasse:* Handbuch für Blitzschutz und Erdung. München, Pflaum-Verlag/Berlin, VDE-Verlag, 1977.

[3] *D. Stoll:* EMC – Elektromagnetische Verträglichkeit. Berlin, Elitera-Verlag, 1976.

[4] *H. W. Dommel:* Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks. IEEE Trans. PAS 88(1969)4, p. 388...399.

[5] *M. A. Uman, D. K. McLain* and *E. P. Krider:* The electromagnetic radiation from a finite antenna. American Journal of Physics 43(1975)1, p. 33...38.

[6] *E. Müller, H. Steinbigler* und *J. Wiesinger:* Zur numerischen Berechnung von induzierten Schleifenspannungen in der Umgebung von Blitzableitern. Bull. SEV 63(1972)18, S. 1025...1032.

[7] *N. Ari:* Die Ausbreitung der von Wanderwellen hervorgerufenen elektromagnetischen Wellen und deren Wirkungen in Stoßspannungsmesskreisen. Dissertation Nr. 5345 der ETH Zürich, 1974.

[8] *S. Hämmerli:* Halbleiterbauteile, Gefährdung durch elektromagnetische Störeinflüsse. Techn. Rdsch. 70(1978)45.

[9] *H. Kaden:* Die Schirmwirkung metallischer Hüllen gegen magnetische Wechselfelder. Hochfrequenztechnik und Elektroakustik 40(1032)3, S. 92...97.

[10] *N. Ari:* Electromagnetic phenomena in impulse voltage measuring systems. IEEE Trans. PAS 96(1978)4, p. 1162...1172.

[11] *J. G. Tront* a. o.: Computer-aided analysis of RFI effects in operational amplifiers. Proceedings of the third international Symposium on Electromagnetic Compatibility, Rotterdam, May 1...3, 1979, p. 269...274.

Adresse des Autors

Niyazi Ari, Dr. sc. techn., BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie AG, Abt. ETT, 5401 Baden.