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: 76 (1985)

Heft: 23

Artikel: EMP-Schutz in Geräten und Anlagen

Autor: Hansen, D.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904720

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: 12.07.2025

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

EMP-Schutz in Geräten und Anlagen

D. Hansen

Die EMP-Härtung ist ein Teil der EMC-Aufgabe, welche den Schutz empfindlicher Elektronik vor elektromagnetischen Störungen anstrebt. Im BBC-Forschungszentrum werden hierzu Lösungen, unter besonderer Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit, erarbeitet. Im Aufsatz wird das speziell entwikkelte Engineeringwerkzeug «Theoretische EMP-Wirkungsanalyse» anhand von Berechnungsergebnissen vorgestellt. Dies ist die Basis zur Untersuchung grosser, ausgedehnter Anlagen. Die Schutzwirkung von Filtern sowie die EMP-Eignung von Varistoren (schnelle Überspannungsbegrenzung) werden durch Messergebnisse belegt. Abschliessend werden EMP-gehärtete Produkte mit hohem Elektronikanteil vorgestellt und ein Ausblick auf die Normung gegeben.

La protection contre les impulsions électromagnétiques (IEM) est l'un des objets de la compatibilité électromagnétique (CEM) dont le but est de protéger les équipements électroniques sensibles contre les perturbations électroniques. Au Centre de recherche de BBC on cherche spécialement des solutions économiques. A l'aide de résultats de calculs l'article présente une méthode spéciale «analyse théorique de l'effet des IEM», qui sert de base à l'étude d'installations étendues. L'effet protecteur de filtres et l'aptitude de varistors aux IEM (limitation rapide de la surtension) sont confirmés par des résultats de mesures. L'article se termine par la description de produits protégés des IEM comprenant une importante partie électronique, et par un aperçu de la future normalisation dans ce domaine.

Vortrag anlässlich der SEV-Informationstagung «NEMP-Simulation – NEMP-Schutz» vom 7. Mai 1985 in Bern.

Adresse des Autors
Dr.-Ing. *D. Hansen*, BBC-Forschungszentrum, 5405 Baden-Dättwil.

1. Einleitung

Die EMP-Härtung von Geräten und Anlagen ist ein Teil des umfassenderen Problems, Elektronik vor elektromagnetischen Störungen zu schützen. Dieses wird deshalb immer wichtiger, weil einerseits die Bauelemente der Elektronik als Folge der höheren Integrationsdichte empfindlicher werden, anderseits weil der Elektronik immer mehr und auch immer wichtigere Funktionen anvertraut werden (Infrastruktur, Verkehr, elektrischer Strom, Wasser, Güterversorgung). So z.B. wird Elektronik verstärkt auch in die Nähe von energietechnischen Komponenten gebracht, die z.T. starke elektromagnetische Störungen erzeugen (Fig. 1).

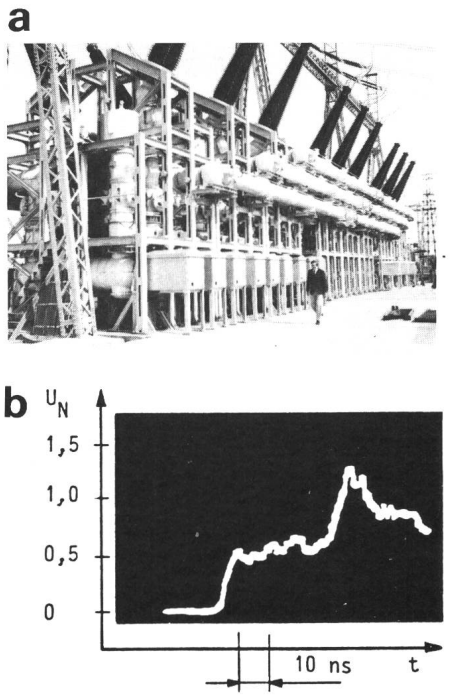

Fig. 1 Transienten in Schaltanlagen
a SF_6-Gas-isolierte Schaltanlage für 420 kV
b Beispiel eines transienten Spannungsverlaufs
U_N Nennspannung

Ein Vergleich dieser durch Trennerschaltungen hervorgerufenen Überspannungen mit NEMP-Phänomenen in Netzen ist durchaus berechtigt [1]. Für BBC als Lieferant von Elektronik und Energieanlagen ist der Schutz der Elektronik vor elektromagnetischen Störungen traditionell ein sehr wichtiges Gebiet. So ist die Firma seit den frühen siebziger Jahren auch im NEMP-Bereich tätig, wobei auch Fragen im Zusammenhang mit Zivilschutzaufgaben von grosser Wichtigkeit sind.

2. Schutzkonzept

Um mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand einen ausgewogenen, wirkungsvollen Schutz in Geräten wie Anlagen zu erzielen, müssen folgende Massnahmen so früh wie möglich im Projektablauf ergriffen werden:

a. Festlegung des Bedrohungsszenarios
   - EMI (el. mag. interference),
   - ESD (el. stat. discharge),
   - NEMP (nuklearer elektromagnetischer Puls),
   - Blitz,
b. Durchführen einer Wirkungsanalyse (Worstcase-Abschätzung),
c. Zuweisung von Grenzwertzonen bzw. -klassen gemäss der Empfindlichkeit der zu schützenden Komponenten, Baugruppen oder Anlageteile,
d. Planung und Realisation von Schutzmassnahmen, und zwar Zerstörungsschutz und ggf. Funktionsschutz gegen
   - Feldeinkopplung (Abschirmung, Vermeidung von Schleifenbildung bei der Verkabelung usw.),
   - leitungsgebundene Einkopplung (Filter, Überspannungsbegrenzung, Stecker, Massung usw.),
e. Aufstellen eines Testplanes und Festlegen der Testmethoden für

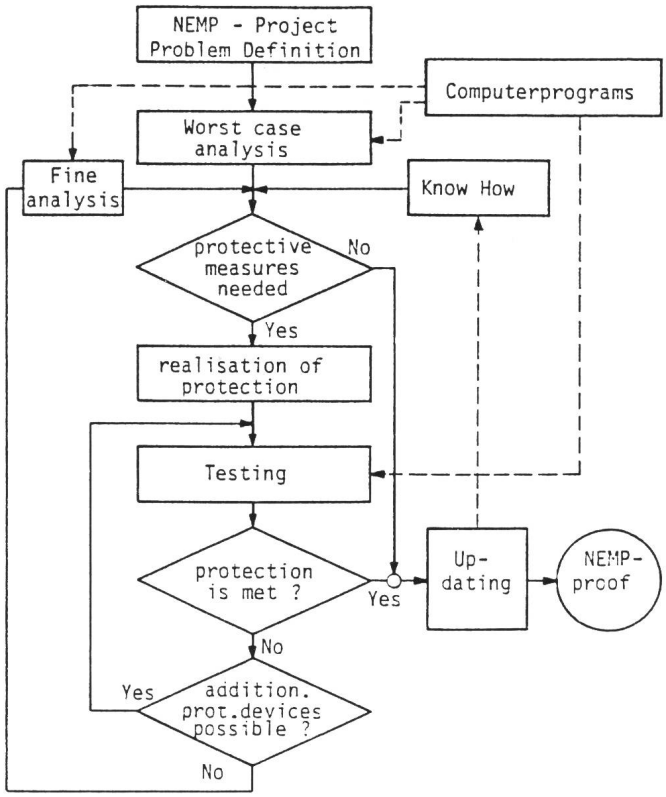

Fig. 2
Typische Vorgehensweise bei einem EMP-Projekt

Geräte (Prints und Baugruppen) sowie für Anlagenteile inkl. Verkabelung und falls möglich für das gesamte System,

f. Durchführen der Vorprüfungen bis hin zur Abnahmemessung.

Diese systematische Vorgehensweise ist in Figur 2 veranschaulicht. Um zum Ziel eines NEMP-gehärteten Produktes zu gelangen, werden die verschiedenen Stufen sukzessiv abgearbeitet. Streckenweise muss, wie z.B. bei Tests, iterativ vorgegangen werden. Besonders wichtig ist zu erwähnen, dass dieses Vorgehen prinzipiell für *alle* Arten von elektromagnetischer Bedrohung sinnvoll ist. Bei NEMP-Problemen stehen aber im Gegensatz zur normalen EMV (elektromagnetische Verträglichkeit) im wesentlichen nur Einstrahlungs- bzw. Einkopplungsprobleme zur Behandlung an. Die auftretenden Störgrössen übersteigen jedoch die der EMV oft um mehrere Grössenordnungen. Durch die Funktion eines Systems selbst hervorgerufene Umweltstörungen wie z.B. Abstrahlung bleiben beim NEMP praktisch unberücksichtigt. Als Schutzkonzept bietet sich somit, nicht zuletzt aus Kostengründen, ein gestuftes, modulares Vorgehen an:

1. Sicherstellen der EMV als generelle Anforderung,
2. Optionsweises Hinzufügen von zusätzlichen Eigenschaften als spezielle Anforderung z.B.
   - besonderer Blitzschutz (Stromtragfähigkeit, Energie usw.)
   - NEMP-Schutz (steilflankige Transienten usw.).

EMC-Massnahmen stellen prinzipiell eine gesunde Basis für einen aufbauenden NEMP-Schutz dar, sind aber alleine nicht ausreichend. Eingeschränkt wird die Wirksamkeit dieses Konzeptes allerdings heute noch durch internationale EMC-Normen, die mit NEMP-Anforderungen nicht verträglich sind [2]. An dieser Nahtstelle muss deshalb noch eine Menge Forschungs- und Entwicklungsarbeit [3; 4] sowie Normengremienarbeit geleistet werden.

Namhafte, amerikanische NEMP-Spezialisten untergliedern das Schutzkonzept für «ground-based systems» weiter in die Arbeitsgebiete [5; 6].

- Topology (Zoneneinteilung),
- Penetrating conductors,
- Aperture control (Beherrschung der funktionsbedingten Schirmöffnungen),

wobei mit Recht auf die grosse Bedeutung der durch Abschirmungen hindurchgeführten Leiter hingewiesen wird. Hier können oft mit einfachen Mitteln wie z.B. Massung der Kabelschirme am Geräteeingang entscheidende Verbesserungen erreicht werden. Bei komplizierten, grossen und vor allem flächenmässig ausgedehnten Systemen, die selbst unter den grössten Simulatoren keinen Platz finden, kann heute nur noch unter Beizug theoretischer Analysewerkzeuge eine tragfähige Aussage zum Schutzgrad gemacht werden.

3. Systemanalyse

Hierzu wurden im BBC-Forschungszentrum spezielle Computerprogrammpakete entwickelt (Tab. I). Diese Programme setzen sich aus mehreren, meist kleineren, modularen Teilprogrammen zusammen und ermöglichen dadurch eine schnelle und zugleich kostengünstige Problemlösung. Grosse und somit schwerfällige Computercodes, wie sie zum Teil in den USA verwendet werden, führen oft zu langen Dateneingabe- und Rechenzeiten; zudem sind sie teuer oder oft nicht einmal erhältlich, da klassifiziert.

Die Rechenprogramme von BBC (Tab. I) werden als Engineeringwerkzeuge im Sinne einer EMP-Wirkungsanalyse eingesetzt, um z.B. an der Schnittstelle zwischen Gerät und System Aussagen über die zu erwartenden *Bedrohungsgrössen* machen zu können. Es werden somit u.a. die Zeitverläufe von elektromagnetischen Feldern bzw. Strömen und Spannungen berechnet. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Auslegung des Schutzes sowie der Testspezifikationen. Im folgenden werden anhand von drei Beispielen Berechnungsergebnisse vorgestellt.

Es wird angenommen, dass die Objekte von einer ebenen Welle, unter Freifeldbedingungen ($Z_0 = E/H = 377\ \Omega$), erzeugt durch einen exoatmosphärischen NEMP (EXO NEMP) getroffen werden. Die zeitliche Kurvenform der elektrischen Feldstärke sei gegeben zu [6]:

$$E(t) = E_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \qquad (1)$$

mit $E_0 = 52{,}5\ \mathrm{kV/m}$
$\alpha = 4{,}0 \cdot 10^6\ \mathrm{s}^{-1}$
$\beta = 4{,}76 \cdot 10^8\ \mathrm{s}^{-1}$

entsprechend einer Pulsanstiegszeit von $t_r = 4{,}6$ ns, einer Rückenhalbwertzeit $= t_{-1/2} = 173$ ns und einer Spitzenamplitude $E(t) = 50\ \mathrm{kV/m}$.

Computer-Analyseprogramme Tabelle I

Problemkreis	Analyse
1. Allgemeine NEMP-Probleme	Spektrum, Energie, vgl. Blitz
2. Allgemeine elektromagnetische Felder im Frequenzbereich	oberhalb/unterhalb des Erdbodens, Strahlung, Streuung
3. Elektromagnetische Felder des NEMP im Zeitbereich	oberhalb/unterhalb des Erdbodens, Multilayer-Problem
4. Elektromagnetische Schirmung	Absorption, Reflexion, Shielding effectiveness
5. Durchdringen von elektromagnetische Feldern durch Materie	Platte, Zylinder, Gitter
6. Aperturen	Kreis, Rechteck, Schlitz
7. Antennen	Transmission line/Dipol-Modell
8. Kabel	Multi-conductor, Twisted Wire
9. Elektrische Netzwerke	EMTP
10. EMC-Probleme im Frequenzbereich	Abstrahlung Box, Kabel Einstrahlung Box, Kabel, Platine Kabel-Kabel-Kopplung Schirmungs design Übersteuerungsfestigkeit - Nachrichtenempfänger
11. Filterberechnung	Puls, CW

1. Beispiel:
Antennenträger im NEMP-Feld

Die Figur 3a zeigt einen Antennenträger für Mikrowellen-Richtfunkstrecken. Gesucht wird der durch einen EMP im Turm induzierte zeitliche Stromverlauf. Der berechnete Stromverlauf ist in Figur 3b dargestellt. Es zeigte sich, dass derartige Antennengebilde mit einer für sie typischen Eigenfrequenz schwingen, deren Zeitdauer, wie im vorliegenden Fall, wesentlich länger als die des anregenden Feldpulses sein kann. Hierbei werden beachtliche Spitzenströme von bis zu 9 kA erzeugt.

2. Beispiel:
Schirmdämpfungswirkung einer dünnen leitfähigen Platte

Ein NEMP-Feld (Region 1) trifft auf eine leitende Platte (Fig. 4a) der Schichtdicke d (Region 2). Gefragt ist nach dem zeitlichen Verlauf des Feldes hinter der Platte (Region 3). Wie zu erwarten, ist eine Zunahme der Dämpfung mit wachsender Wandstärke d zu erkennen (Fig. 4b). Interessant ist jedoch die zeitliche Pulsverflachung mit wachsender Wandstärke bei sonst konstanten Materialparametern. Physikalisch lässt sich dieser Vorgang mit dem Anwachsen der Diffusionszeitkonstanten

$$\tau_d = \mu\sigma d^2 \qquad (2)$$

beschreiben. Im Innern eines abgeschirmten Raumes kann somit ein im Vergleich zum einfallenden Feld langsamerer Pulsanstieg auftreten, was sich günstig auf die Dimensionierung weiterer Schutzeinrichtungen auswirkt (Induktion).

3. Beispiel:
Durchdringen vom EMP-Feldern durch Schirmöffnungen

Wie schon im Kapitel 2 ausgeführt, spielen Aperturen eine wichtige Rolle bei der Auslegung von Schirmungen. Gesucht wurde deshalb die in einem gegebenen Abstand d hinter einer leitfähigen Platte mit Öffnung (Fig. 5a) durch EXO-EMP erzeugte, elektrische Feldstärke. Das Berechnungsergebnis ist in Figur 5b dargestellt. Mit wachsender Frequenz, d.h. mit abnehmender Wellenlänge λ steigt bis etwa 1 MHz die EMP-Feldstärke hinter der Apertur an, verläuft dann - wegen des abnehmenden NEMP-Amplituden-Spektrums - flach bis 100 MHz, und oberhalb 100 MHz sogar abfallend.

4. Experimente zur Schutztechnik

Sind aufgrund der Systemanalyse die Bedrohungsgrössen an der Schnittstelle Anlage–Gerät abgeschätzt und Systemhärtungsmassnahmen in der Anlage realisiert [5; 7; 8], ist die Frage nach dem Geräteschutz zu beantworten. Der EMP-Einkopplungsmechanismus geschieht hier meist nicht mehr direkt über das Initialfeld - fachgerechte Schirmung vorausgesetzt - sondern über durch Zuleitung verschleppte Common- und Differentialmodespannungen bzw. -ströme, die direkt an den Geräteeingängen anstehen [9].

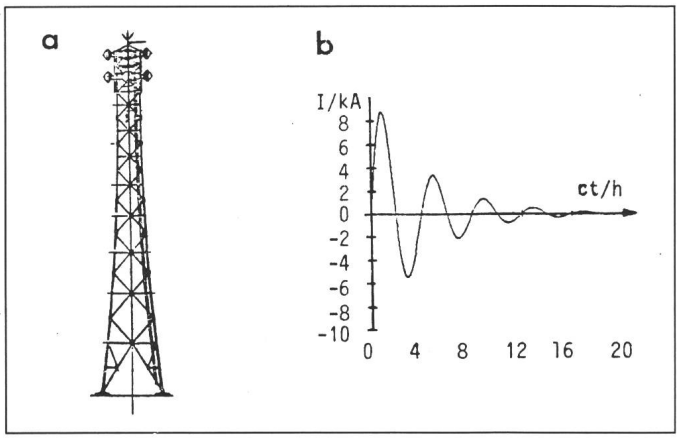

Fig. 3
Antennenträger im NEMP-Feld
a Geometrie des Antennenträgers Grundfläche 9×9 m² Höhe 54 m²
b Verlauf des EMP-induzierten Stromes im Mast *ct/h* Lichtgeschwindigkeit mal Zeit bezogen auf Turmhöhe

Ihre Kurvenform weicht streckenweise erheblich vom Standard-NEMP-Feldpuls ab. Sie wird z.B. bestimmt durch natürliche System- bzw. Leitungsresonanzen, Kabelkopplung usw. im Zusammenspiel mit der jeweiligen Geräteeingangsimpedanz. Die verschiedenen Gerätezuleitungen lassen sich in drei Klassen einteilen (Tab. II). Hierdurch werden gleichzeitig einige typische Anforderungen an die Schutzelemente, zur Beherrschung der leitungsgebundenen Störung, festgelegt. Die Reduktion der Störgrösse erfolgt entsprechend der Grenzwertklasse des Gerätes schrittweise durch:

1. Überspannungsbegrenzer,
2. Hochfrequenzfilter.

Hochfrequenzfilter werden einerseits aus EMC-Gründen, andererseits zum Abbau steilflankiger Transienten (d.h. Spektren mit hohen Frequenzanteilen) benötigt. Derartige Grössen treten u.a. auch beim schlagartigen Zünden von gasgefüllten Überspannungsleitern auf [10].

Im folgenden werden anhand von drei Beispielen aktuelle Fragen zur EMP-Schutztechnik erläutert.

1. Beispiel: Schnellansprechende Überspannungsbegrenzung durch Metalloxidvaristoren (ZnO)

ZnO, eine aus Pulver gepresste Keramik, eignet sich vorzüglich zur Überspannungsbegrenzung. Im BBC-Forschungszentrum wurden die Eigenschaften dieser Substanz erforscht und ZnO-Varistoren zur Produktionsreife entwickelt. ZnO ist preisgünstig und in der Formgebung leicht auf die jeweilige Anwendung, z.B. EMP-Schutz, anpassbar. Zum Beweis des schnellen Ansprechverhaltens dieses Materials wurde eine spezielle Messanordnung entwickelt (Fig. 6). Das Messobjekt, eine ZnO-Scheibe, wird in eine koaxiale Halterung (50 Ω) eingebaut. Mit einem Hochspannungspulser wird eine steilflankige Rechteckspannung (Fig. 7a) an die Probe angelegt und koaxial am Messobjekt Strom und Spannung als Funktion der Zeit gemessen (Fig. 7b). Zum Vergleich zeigt die Figur 7a den Spannungsverlauf an einem 50-Ω-Widerstand nach Anlegen des Rechteck-Testimpulses.

Unterhalb der dynamischen Ansprechspannung verhält sich die Probe weitgehend als Kapazität. Oberhalb der Ansprechschwelle findet eine schnelle, deutliche Spannungsbegren-

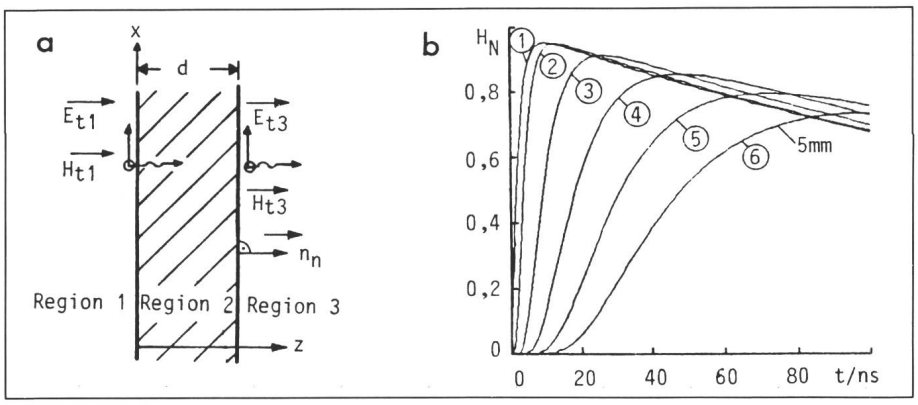

Fig. 4 Leitfähige Platte im NEMP-Feld

a Geometrie der Platte
d Wandstärke

b Zeitverlauf der normierten magnetischen Feldstärke H_N auf der Innenseite (Region 3) der Platte $\mu = \mu_0$, $\sigma = 10^4\,\Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1}$, Diffusionszeitkonstante $T_d = \mu\sigma d^2$

	d [mm]	T_d [ns]		d [mm]	T_d [nσ]
①	0,1	0,13	④	3	113,13
②	1	12,57	⑤	4	201,12
③	2	50,28	⑥	5	314,25

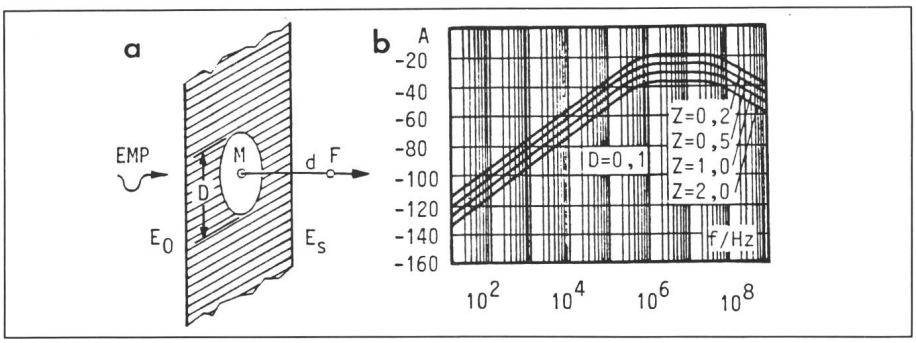

Fig. 5 Transmissionsverhalten einer kreisförmigen Apertur

a Zu untersuchende geometrische Anordnung
D Durchmesser der Apertur
E_O Elektrische Feldstärke vor Apertur
E_S Elektrische Feldstärke hinter Apertur
M Mittelpunkt der Apertur
F Raumpunkt, an dem die Feldstärke E_S berechnet wurde
d Abstand $\overline{MF}$

b Elektrische Feldstärke hinter kreisförmiger Apertur mit $D = 0{,}1$ m im Frequenzbereich bezogen auf die Maximalamplitude E_O (Aplitudendichtefunktion)
Z Verhältnis d/D
$A = 20 \log E_S/E_O$ in dB

Aufteilung der Gerätezuleitungen — Tabelle II

Leitungsklasse	Ausführungsart	Grundlegende Schutzelementprobleme
Netz-/Versorgungsleitungen	Wechselspannungsnetze, Gleichspannungsnetze	Verlöschen des Netzfolgestroms, Kapazitiver Ableitstrom bei Netzfiltern
Signalleitungen Steuerleitungen Datenleitungen	breitbandig, schmalbandig, geschirmt ungeschirmt, Koaxial, Twinax usw. hochohmig, niederohmig	Kapazitive Belastung der Leitung Impedanzstörungen
Antennenzuleitungen	Koaxial, Hohlleiter, Paralleldrahtleitung	Impedanzstörungen, Auftreten hoher HF-Spannung

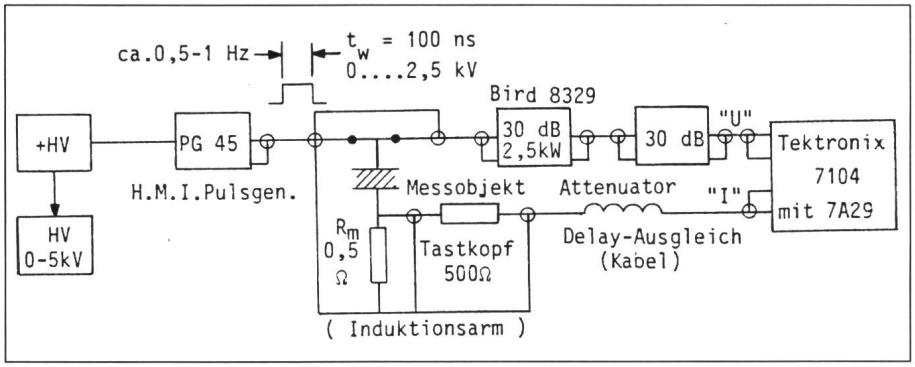

Fig. 6 Breitbandige Impulsmessschaltung für ZnO-Varistoren (etwa 1 GHz)

zung statt. Die angelegte Generatorspannung von 2,5 kV wurde im obigen Falle auf etwa 600 V am Varistor begrenzt. Während der Pulsdauer von etwa 100 ns fliesst ein nahezu konstanter Ableitstrom durch das Element. Betrachtungen im Zeitbereich > 100 ns sind allerdings bei dieser Anordnung nicht sinnvoll, das sich hier der dynamische Innenwiderstand des Kabelgenerators ändert. Eine untere Grenze in der Ansprechzeit des Varistormaterials konnte selbst bei Ausdehnung der Messungen bis zu Pulsanstiegszeiten von 500 ps hin nicht ermittelt werden, was in guter Übereinstimmung mit Untersuchungen in anderen Laboratorien steht [11].

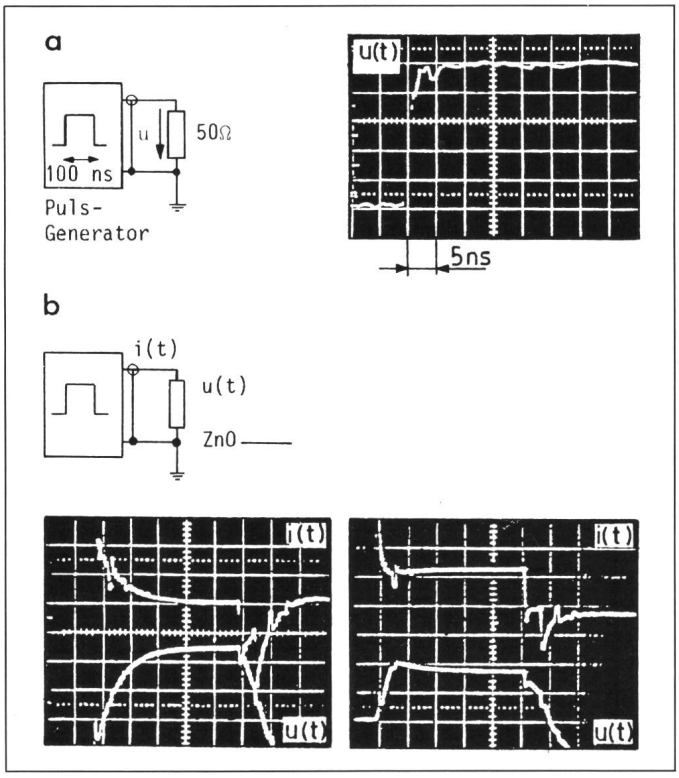

Fig. 7
Messresultate zu Beispiel 1

a nach Anlegen eines Rechteck-Testimpulses an 50-Ω-Widerstand

b nach Anlegen des Testimpulses an ZnO-Varistor (Durchmesser etwa 15 mm, Dicke etwa 3 mm)
links: Spannungspuls unterhalb Ansprechschwelle
rechts: Spannungspuls oberhalb Ansprechschwelle

2. Beispiel:
ZnO-Untersuchung mit steilflankigen Hochstrompulsen

Mit einer ZnO-Scheibe grösseren Volumens (8-kV-Ableiter) wurden Hochstromversuche bei Stromstärken von 1 und 10 kA unternommen. Ziel war es, die Zunahme der Restspannung bei kurzen Stosszeiten des Pulsers und Hochstrombedingungen, wie sie bei NEMP-Anwendungen vorkommen können, zu messen (Fig. 8). Durch entsprechende Messtechnik ist hierbei sicherzustellen, dass die Restspannung an der Scheibe und nicht die durch hohe Magnetfelder erzeugte Induktionsspannung im Messkreis erfasst wird.

Eine Verkürzung der Stirnzeit des 1-kA-Stromimpulses von 8 µs auf 75 ns führt im ungünstigsten Fall zu einer am Ableiter verbleibenden Restspannungserhöhung von weniger als 25% bezogen auf die übliche Datenblattangabe für Blitzstossströme (8/20 µs). Diese Messergebnisse bestätigen somit die prinzipielle Eignung von Metalloxidvaristoren auch für NEMP-Anwendungen.

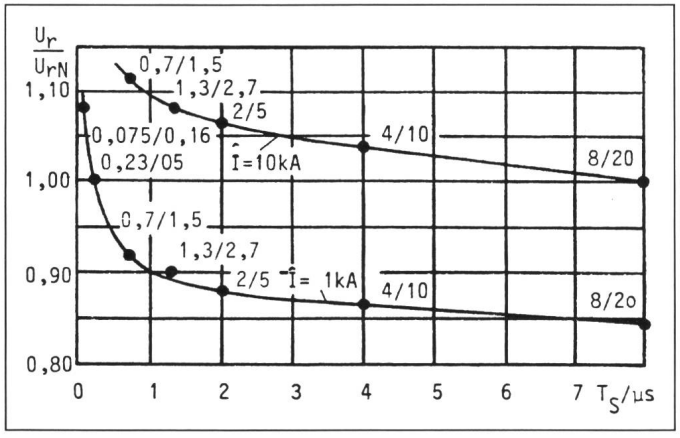

Fig. 8
Restspannungen einer ZnO-Ableiterscheibe in Abhängigkeit von der Stirnzeit T_S bezogen auf U_{rN}

U_{rN} Restspannung beim 8/20-10-kA-Impuls (Stirnzeitstrom = 8 µs, Rückenhalbwertszeit = 20 µs)

3. Beispiel:
Schutzwirkung von Filtern

Erst das Zusammenwirken von Amplitudenbegrenzung des Störpulses durch Ableiter und nachfolgender Pulsdämpfung im Filter legt die gesamte Schutzwirkung der Anordnung fest. Für EMC-Anwendungen genügt es oft, die Einfügungsdämpfung (Herstellerangabe, gemessen im Frequenzbereich, in 50-Ω-Messtechnik) des Filters zu kennen. Bei NEMP-Anwendung muss jedoch zusätzlich das Pulsverhalten des Filters bekannt sein, da Nichtlinearitäten wie z.B. magnetische

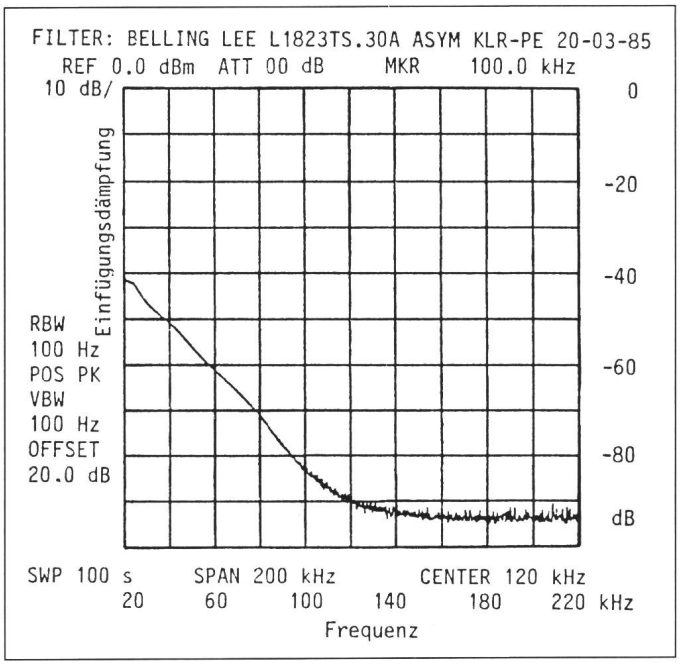

Fig. 9 Asymmetrische Messung der Einfügungsdämpfung eines EMP-Filters (Kleinsignalverhalten) im Frequenzbereich nach Norm CISPR 17 (50 Ω)

Sättigungseffekte, Spannungsbegrenzung auftreten. Hierüber findet man aber nur sehr selten Angaben. Ein Beispiel für gemessene asymmetrische (common mode) Einfügungsdämpfung eines EMP-Netzfilters (380 V, 50 Hz, 30 A) im Frequenzbereich zeigt Figur 9. Oberhalb von etwa 200 kHz ist die Dämpfung bis weit über 100 MHz konstant. Im abgebildeten Frequenzbereich wird die Einfügungsdämpfung unterhalb 120 kHz deutlich schlechter. Dieser Bereich ist zur Filterbeurteilung wichtig, da die Spektren der EMP-Störpulse auf Leitungen beträchtliche Energieanteile im tiefen Frequenzbereich aufweisen können. Gleichzeitig wird hierdurch Gewicht und Volumen der Filterbauteile (Induktivität und Kapazitäten) bestimmt. Unabhängig von den noch fehlenden Pulsdaten des Filters tritt hier schon die Frage nach dem Realitätsbezug solcher Messungen auf, denn die bei tiefen Frequenzen vorhandene Netzimpedanz auf der Filtereingangsseite weicht erheblich vom Simulationswert 50 Ω, und zwar zu kleineren Werten hin, ab [12; 13; 14]. Zusätzlich kann auf der Lastseite des Filters die gemessene Dämpfung nach Einbau des Filters dramatisch durch Resonanzeffekte (Filter–Last) herabgesetzt werden, so dass unter Umständen am Filterausgang sogar höhere Amplituden als am Eingang gemessen werden können. Das prinzipielle Verhalten eines Netzfilters auf steilflankige Erregung mit einem Spannungsstoss kurzer Zeitdauer zeigt Fig. 10 (Linearität kann bei Spannungsbegrenzung nicht vorausgesetzt werden). Derartige Filter stellen schwingungsfähige Gebilde dar [12]. Für kurze Pulse ist die Pulsdämpfung meist gut. Ist die Pulsbreite jedoch wesentlich grösser als die Eigenschwingungsdauer des Filters, erscheint der Puls praktisch ungedämpft am Filterausgang.

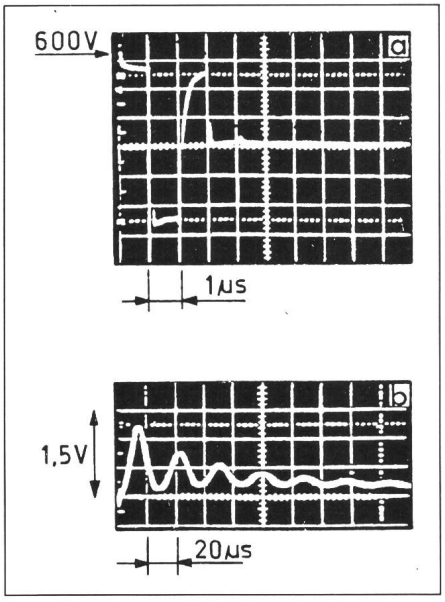

Fig. 10 Filterverhalten bei Anlegen eines steilflankigen Spannungsstosses im Zeitbereich (Grossignalverhalten)

$\frac{dU}{dt} = 2\,kV/ns \qquad U = 2\,kV$

a Signal am Filtereingang (Spannungsbegrenzung mit ZnO auf 600 V)

b Signal am Filterausgang

5. NEMP-geschützte Produkte

BBC liefert heute neben einigen militärischen Geräten der Nachrichtentechnik auch Ortsfunksender (Fig. 11)

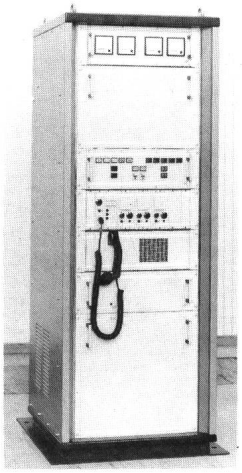

Fig. 11 1,5-kW-UHF-Ortfunksender

und Schutzraumempfänger (Fig. 12) für den Zivilschutz.

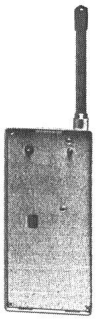

Fig. 12 Tragbarer batteriebetriebener Schutzraumempfänger

Diese Geräte dienen der sicheren Nachrichtenübermittlung zwischen Kommandoposten und Schutzräumen. Die Geräte sind zusammen mit ihren typischen Kabelkonfigurationen wie Netz und Antenne vom GRD-AC-Laboratorium Spiez, Arbeitsgruppe EMP, erfolgreich getestet worden. Der Schutz gegen leitungsgebundene Transienten auf der Netzeinspeisung wird im Sender hauptsächlich durch entsprechenden Einsatz von ZnO-Ableitern erreicht. Im Antenneneingang befindet sich eine speziell entwickelte koaxiale Filterschaltung (λ-4-Stichleitung).

6. EMP-Normen

In der *Schweiz* existieren seit längerem Richtlinien des Bundesamtes für

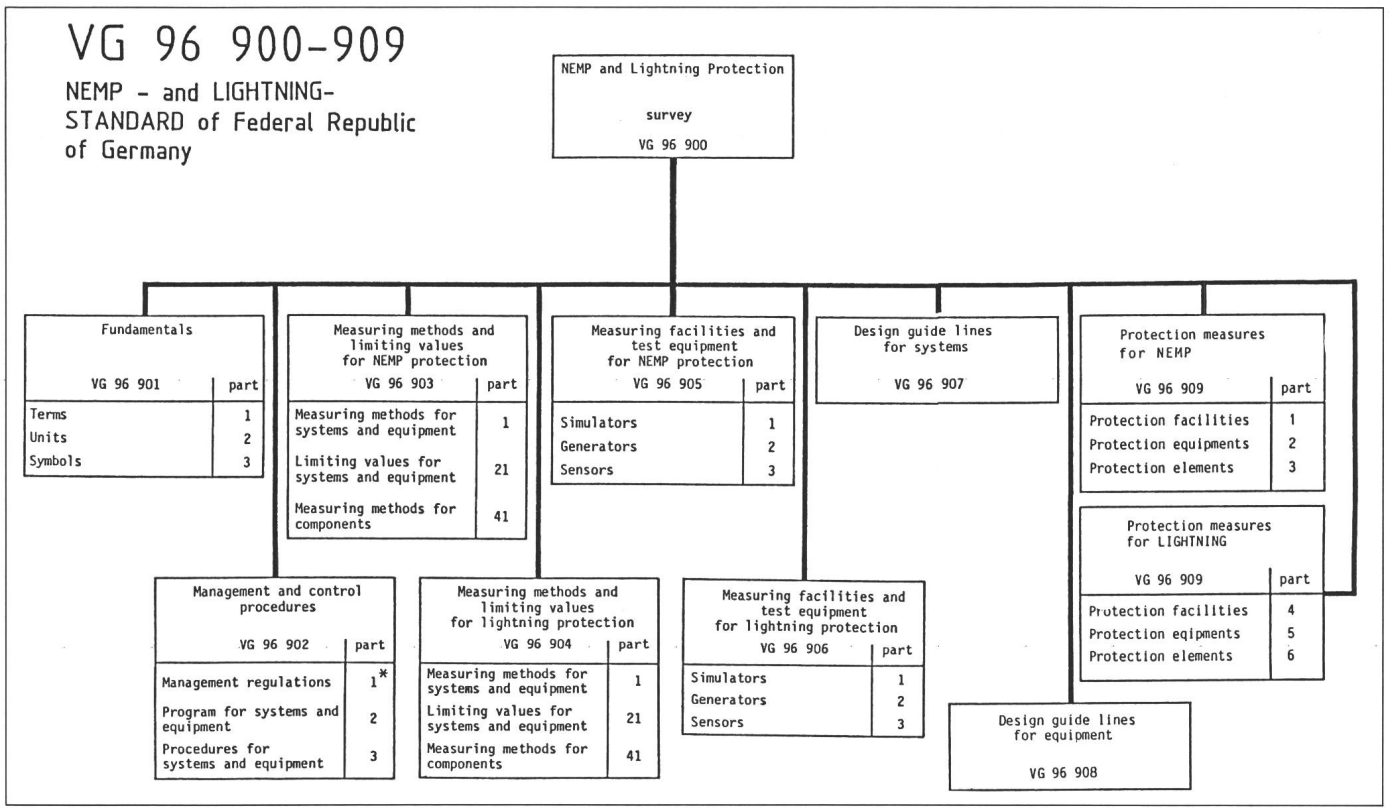

Fig. 13 Übersicht über die deutsche Verteidigungs-Geräte-Norm VG 96 900-909
NEMP- und Blitznorm

Zivilschutz und der Gruppe für Rüstungsdienste. In der *BR Deutschland* entsteht zurzeit die Verteidigungsgeräte-Norm (VG) für NEMP- und Blitzschutz (Fig. 13).

Hierbei wird u.a. der Gedanke der bei Projektbeginn durchzuführenden Wirkungsanalyse für das gesamte System festgeschrieben. In den Ausschüssen und Arbeitskreisen dieses DIN-Normengremiums (NEA 760) beraten Vertreter von Industrie und Bundesbehörden seit 1976. Neben organisatorischen Abläufen werden Grenzwerte, Messverfahren, Messgeräte, Schutzeinrichtungen sowie Richtlinien diskutiert und verabschiedet. Zurzeit präsentiert sich der Veröffentlichungsstand wie folgt[1]:

- VG 96 900 (März 1982): Schutz gegen NEMP und Blitzschlag
- VG 96 901 Teil 4 (Okt. 1985): Schutz gegen NEMP und Blitz, Grundlagen, Bedrohungsdaten,
- VG 96 902 Teil 2 (Okt. 1985): Schutz gegen NEMP und Blitz, Programme für Systeme und Geräte,
- VG 96 907 Teil 1 (Dez. 1985): Schutz gegen NEMP und Blitz, Konstruktionsmassnahmen und Schutzeinrichtungen, Allgemeines.

In *den USA* ist der bekannte EMC-Mil-Standard 461B für Geräte durch die EMP-Anforderungen

- RS 05: Radiated susceptibility, Feldpuls (Fig. 14)
- CS 10: Conducted susceptibility, Interface Pin Voltage/Current (Fig. 15) als «Draft» 1983 ergänzt worden.

Der Feldpuls einer EXO-NEMP-Detonation wird mit einem maximalen Amplitudenwert von 50 kV/m und einer Anstiegszeit (10–90%) von 5 ns angegeben. Geräteein-/-ausgänge müssen in Abhängigkeit vom vorgegebenen Arbeitsfrequenzbereich der Einheit bis zu 1000 V und 10 A vertragen. Die Strom-/Spannungsbelastung wird gedämpft oszillierend angenommen. Nach Ablauf von 15 Schwingungen ist die Spannungs- bzw. Stromamplitude unterhalb 5% ihres Anfangswerts abgesunken. Mit wachsender Frequenz klingt daher die Schwingung schneller ab. Die Grenzwertkurvengestalt in Figur 15 lässt sich nach [15] mit einer Faltung von Crosstalk-Transfer-Funktion und NEMP-Amplitudendichtespektrum deuten.

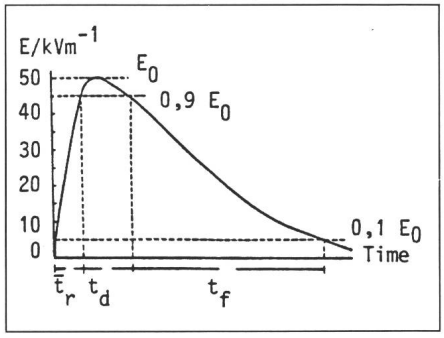

Fig. 14 Feldpuls, Grenzwert für RS 05-Test
EMC-MIL-Std. 461 B: EMP-Anforderungen für Geräte
E_0 Max. Field Strength in kV/m
t_r Risetime = $5 \cdot 10^{-9}$ s
t_d Duration Pulse Width = $30 \cdot 10^{-9}$ s
t_f Falltime = $550 \cdot 10^{-9}$ s

7. Schlussbemerkung

Trotz der in vielen europäischen Ländern in den letzten Jahren zunehmenden NEMP-Aktivität kann festgestellt werden:

- Informationen aus erster Hand (USA bzw. Frankreich) sind nach wie vor nur schwer erhältlich, da sie vornehmlich militärischen Charakter haben. Immer klassifiziert sind:
  - genaue Waffendaten (NEMP-Entstehung),
  - Systemdaten (EMP-Auswirkung

[1] Bezugsquelle: Beuth-Verlag, Köln

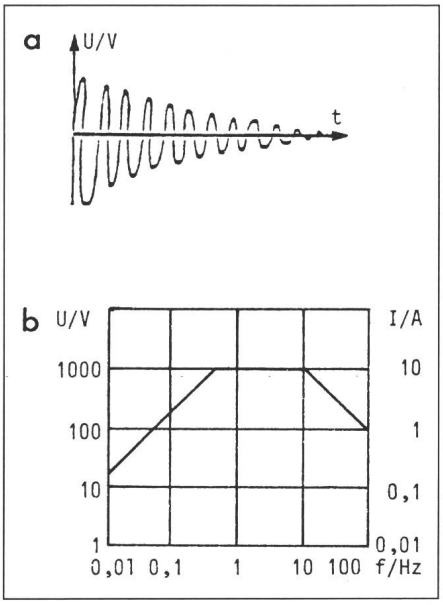

Fig. 15 Interface pin voltage and current, Grenzwert für CS 10-Test

EMC-MIL-Std. 461 B: EMP-Anforderungen für Geräte

a Zeitbereich
U PIN voltage
I PIN current
$U(t) = 1{,}05 \cdot U(f)\, e^{-0{,}2ft} \cdot \sin(2\pi ft)$
$I(t) = 1{,}05 \cdot I(f)\, e^{-0{,}2ft} \cdot \sin(2\pi ft)$
b Grenzwert im Frequenzbereich

auf Waffensysteme oder Telekommunikationssysteme).

Ausnahme: Laufende EMP-Untersuchung für ziviles US-Stromversorgungsnetz [16].

- Die Verwirklichung eines abgestuften, kostengünstigen Schutzes gegen alle Arten elektromagnetischer Bedrohung wie EMI, ESD und/oder Blitz und NEMP entspricht dem Trend, der sich auch in Form von Normen zu manifestieren beginnt, aber erst an wenigen Orten schon praktisch realisiert ist.

Die wirtschaftliche Auslegung eines zuverlässigen Schutzes – durch Messung und Rechnung – wird in der Zukunft, speziell in komplexen weitläufigen Systemen, sicherlich noch grosse Herausforderungen für Forscher und Entwickler mit sich bringen. Internationale Zusammenarbeit nimmt hierbei einen hohen Stellenwert ein.

Literatur

[1] *A. Edlinger* e.a.: La coupure de faibles courants capacitifs par un sectionneur dans un poste UHT blindé isolé au SF_6. Rapport CIGRE N° 13-14, 1984.

[2] *E.F. Vance* a.o.: Unification of electromagnetic specifications and standards. Part I: Evaluation of existing practices. Washington, Stanford Research Institute International, 1980.

[3] *W. Graf* a.o.: Unification of electromagnetic specifications and standards. Part II: Recommendations for revisions of existing practices. Washington, Stanford Research Institute International, 1983.

[4] *N. Ari* a.o.: Electromagnetic pulse (EMP) penetration through circular apertures in the frequency domain. Proc. IEEE 73(1985)2.

[5] *K.S.H. Lee:* EMP – interaction. Principles, techniques and reference data. Albuquerque/N.M., Dikewood Ind. Inc., 1980.

[6] EMP engineering and design principles. R. Shermann. Whippany/N.Y. Bell Laboratories Incorporation, 1975.

[7] *R.N. Ghose:* EMP environment and system hardness design. Germantown/Md., Don White Consultants Incorporation, 1984.

[8] *I.N. Mindel:* DNA EMP avareness course notes. Third edition with supplement. Chicago, Illinois Institute of Technology, Research Institute, 1977/78.

[9] *O.M. Clarke* a.o.: Feasibility study for EMP terminal protections. Tempe/Arizona, General Semiconductor Industries Inc., 1973.

[10] *D. Hansen* u.a.: Transienten-Killer im Test. Elektronik 33(1984)11, S. 65...67.

[11] *H.R. Philipp* a.o.: ZnO–varistors for protection against nuclear electromagnetic pulses. Journal of Applied Physics 52(1981)2.

[12] *H. Schlicke:* Worst case filter measurements. Plymouth Meeting/Pa., Interference Technology Engineering Master (ITEM) R. & B. Enterprises, 1979.

[13] *R.M. Vines* a.o.: Impedance of residential power-distribution circuit. IEEE Trans. EMC 27(1985)1, p. 6...12.

[14] Guide sur les méthodes de mesure des transitoires de courte durée sur les lignes de puissance et de contrôle basse tension. Publication de la CEI N° 816, 1984.

[15] *C.R. Paul:* Printed circuit board EMC. Electromagnetic Compatibility 1985. 6th symposium and technical exhibition on electromagnetic compatibility, Zurich, March 5...7, 1985; paper No. 21 El, p. 107...114.

[16] Program plan for research and development of technologies under influence of NEMP. Oak Ridge/Tenn., Oak Ridge National Laboratory/US Department of Energy, 1983.