Prüfgeneratoren zur Simulation von breitbandigen Störgrössen

Autor(en): **Baumann, M.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **75 (1984)**

Heft 7

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904389

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Prüfgeneratoren zur Simulation von breitbandigen Störgrössen

M. Baumann

Neben schmalbandigen, d. h. periodischen Störvorgängen werden in der EMV- (EMV = elektromagnetische Verträglichkeit) Prüftechnik auch die Wirkungen von breitbandigen Störungen untersucht. Der Aufsatz gibt einen Überblick über die in Frage kommenden Störvorgänge und zeigt, wie man sie klassieren kann. Ziel der Klassierung ist, mit einer möglichst kleinen Zahl von Prüfgeneratoren möglichst viele Prüfnormen zu erfüllen. Im weiteren wird gezeigt, nach welchen Prinzipien die Störgeneratoren funktionieren und wie sie für die verschiedenen EMV-Prüfungen eingesetzt werden.

Outre les perturbations à bande étroite, c'est-à-dire périodiques, les effets de perturbations à large bande sont également considérés lors des essais de compatibilité électromagnétique. Cet article donne un aperçu des perturbations en question et montre la façon de les classer, dans le but de satisfaire au plus grand nombre de normes possible avec un minimum de générateurs d'essais. On montre en outre selon quels principes ces générateurs fonctionnent et comment ils sont employés pour les divers essais de compatibilité électromagnétique.

1. Transiente Störgrössen

1.1 Begriff und Entstehung

Der Begriff «transient» gehört zum Gegensatzpaar stationär (bzw. quasistationär) – transient. Periodische Vorgänge oder thermisches Rauschen konstanter Leistung sind quasistationäre Vorgänge, während alle Übergangserscheinungen, die mit Leistungsänderungen verbunden sind, als transient zu bezeichnen sind. Im wesentlichen handelt es sich dabei um Entladungs- oder Umladungsvorgänge von kapazitiv, induktiv oder auch mechanisch gespeicherter Energie, wie

- atmosphärische Entladungen
- Schaltvorgänge in Energieverteilungsanlagen (Kurzschlüsse, Netzausfälle, Laständerungen, Schalterbetätigungen)
- statische Entladungen
- der nukleare elektromagnetische Impuls (NEMP)

Entsprechend den Ausbreitungsbedingungen kann die durch einen transienten Vorgang erzeugte Störung in elektronische Geräte eindringen und diese unerwünscht beeinflussen.

1.2 Beschreibung

Transiente Vorgänge sind definitionsgemäss einmalige Vorgänge, weshalb ihnen ein kontinuierliches Energiespektrum zukommt. Entsprechend den kurzen Zeitkonstanten der Ausbreitungswege können in kurzer Zeit hohe Energiemengen umgesetzt werden. Die Störwirkung ist deshalb breitbandig. Sie kann bis zu einigen hundert MHz reichen. Figur 1 zeigt ein Beispiel eines transienten Störimpulses.

Da sich die Störvorgänge zeitlich und örtlich ständig ändern, können sie nur mit statistischen Methoden erfasst werden. Die Erfahrung zeigt, dass man sie in bezug auf ihr Störpotential durch wenige Parameter recht gut charakterisieren kann. Es sind dies im *Zeitbereich* (Fig. 2):

- der Maximalwert der Störgrösse a_{max},
- die Anstiegszeit τ,
- die Rückenhalbwertszeit T,
- die Häufigkeit der Störung und von diesen Grössen abgeleitet
- das Zeitintegral über das Quadrat der Störgrössen

$$\int_0^\infty a(t)^2 \, dt$$

als Mass für die Störenergie.

Spannung, Strom, Leistung, elektrische oder magnetische Feldstärke sind je nach Impedanz und Ausbreitungsmedium die physikalischen Grössen der Störung.

Diesen Zeitgrössen kann gleichberechtigt ein Satz Frequenzgrössen ge-

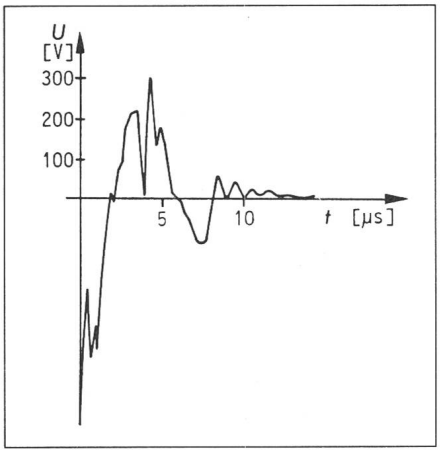

Fig. 1 Beispiel eines transienten Störimpulses

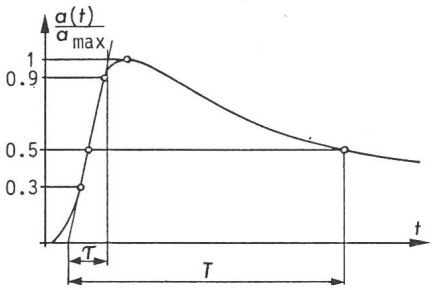

Fig. 2 Genormter Spannungsimpuls

Adresse des Autors

Martin Baumann, dipl. El.-Ing. ETH, Redaktor, Schweiz. Elektrotechnischer Verein, Postfach, 8034 Zürich.

Der Autor hat diesen Aufsatz während seiner Tätigkeit bei Emil Haefely & Cie AG, 4028 Basel, verfasst.

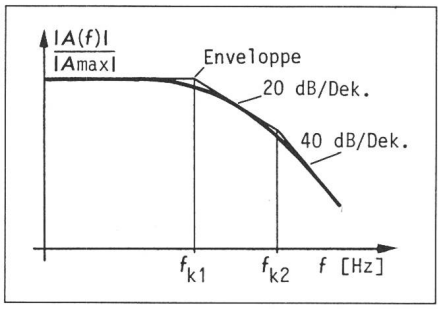

Fig. 3 Amplitudendichtespektrum

genübergestellt werden (Fig. 3), nämlich die maximale Amplitudendichte A_{max}, die 20-dB- und 40-dB-Knickpunkte f_{k1}, f_{k2} (Fig. 3), die Häufigkeit der Störung sowie das Frequenzintegral über das Quadrat der spektralen Grösse

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |A(f)|^2 \, df.$$

Die Zuordnung Zeit-Frequenzbereich geschieht über die Fouriertransformation:

$$A(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi jft} \, a(t) \, dt \qquad a(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{+2\pi jft} A(f) \, df$$

Ob man mit Zeit- oder Frequenzgrössen arbeitet, hängt weniger von der Störgrösse als von der Kopplung zwischen Störgrösse und dem gestörten Gerät (Störsenke) ab. Ist die Kopplung linear, empfiehlt sich die Frequenzmethode, ist sie nichtlinear, kommt man zumindest um zusätzliche zeitliche Betrachtungen nicht herum. Ein Hilfsmittel zur Darstellung von Störvorgängen im Frequenzbereich ist die sog. EMV-Tafel (Fig. 4) [1]. Sie entspricht dem bekannten Bodediagramm, d. h. der doppeltlogarithmischen Frequenzgangdarstellung.

Die Grösse, die in Funktion der Frequenz aufgezeichnet wird, ist im Fall transienter Störquellen die *Amplitudendichte* der Störung (kontinuierliches Spektrum) mit der Dimension Vs, As, Vs/m, As/m oder seltener die *Leistungsdichte* (Ws). Die Fouriertransformation eines Zeitsignals liefert eine komplexe Grösse, d. h. neben der Amplitudendichte auch den Phasengang des Signals. Unter der Voraussetzung linearen Störverhaltens kann man die Phase aus der Betrachtung ausklammern mit dem einzigen Nachteil, dass man ohne Phasenkenntnis nicht eindeutig auf den Zeitvorgang zurückschliessen kann. So besitzen z. B. die Zeitfunktionen 1 und 2 (Fig. 5) dasselbe Amplitudendichtespektrum (Fig. 4).

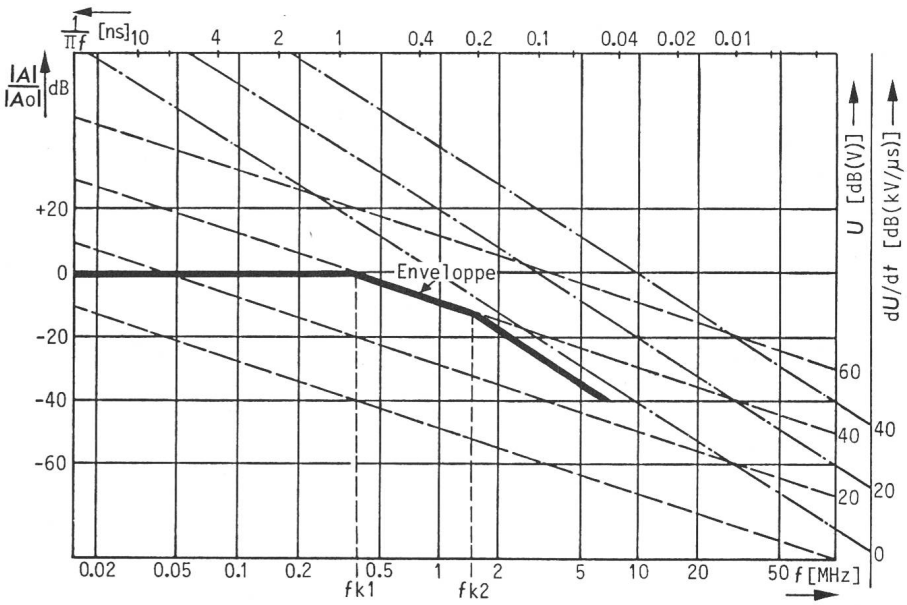

Fig. 4 Diagramm zur Darstellung des Amplitudendichtespektrums (EMV-Tafel)
(DIN 57 847 Teil 1 / VDE 0847 Teil 1)

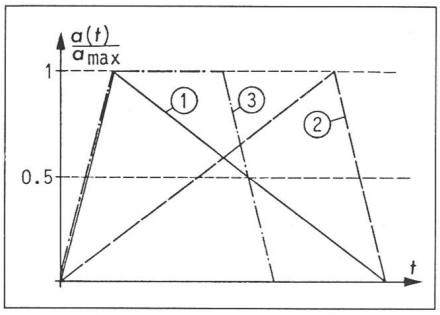

Fig. 5 Beispiele von Impulsformen
1 und 2 haben gleiches Amplitudendichtespektrum

Für Störbetrachtungen kann man zumeist noch weiter vereinfachen, indem man sich mit der Enveloppe des Spektrums begnügt. Dieselbe Enveloppe gehört aber zu einer ganzen Klasse von Signalen, die ähnliches Störverhalten zeigen (gleiche charakteristische Grössen). So besitzen alle Funktionen der Figur 5 dieselbe Enveloppe (Fig. 4), welche durch die drei charakteristischen Frequenzgrössen A_0, f_{k1} und f_{k2} bestimmt ist. Es leuchtet ein, dass eine solche Datenkonzentration wesentlich zu einer einfachen Problembehandlung beiträgt.

1.3 Statistische Erfassung

Bevor die transienten Störgrössen durch den Verzicht auf unnötige Information in Klassen zusammengefasst werden können, müssen die Daten in mühsamer Arbeit beschafft werden. Ein Beispiel dafür zeigt Figur 6, wo

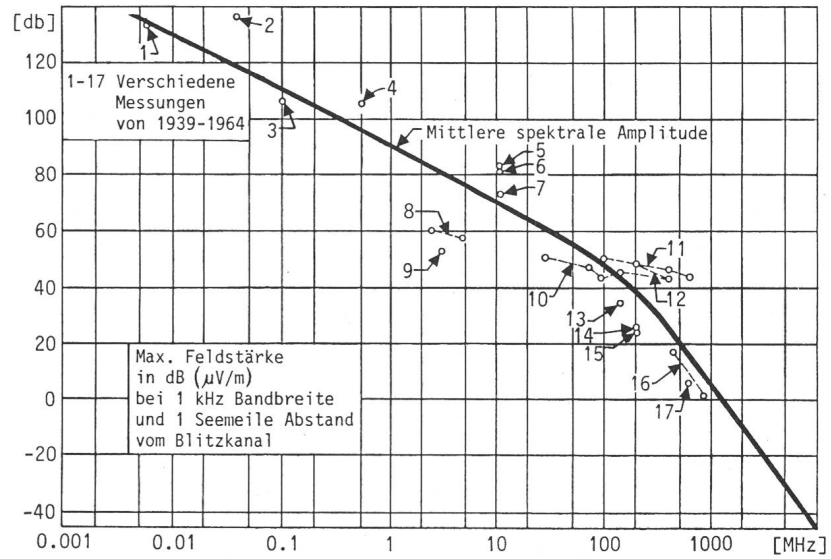

Fig. 6 Messung des Blitzspektrums

Zusammenstellung der Kennwerte transienter Störgrössen Tabelle I

	Blitzentladungen	Kurzschlüsse und Schaltvorgänge in HS-Netzen	Elektrische Entladungen	NEMP
elektrisches Feld E kV/m	40 (in 100 m Abstand)	10 (in 10 m Abstand)	-	≈ 50 (in 1000 m Abstand)
magnetisches Feld H A/m	160 (in 100 m Abstand)	300 (in 10 m Abstand)	-	≈ 1000 (in 1000 m Abstand)
Anstiegszeit des Feldes Rückenzeit (Dauer)	200...5000 ns 5...20 µs	10...50 ns 0,5...1 µs	10...50 ns 0,2...1 µs	10 ns 200 ns/10 µs
di/dt kA/µs	120	1000	-	-
i kA	100	15...40		-
u kV		je nach Netzspannung	15...30 kV	
Frequenzbereich	breites Spektrum 1 kHz...5 MHz	breites Spektrum 10 kHz...100 MHz	1 MHz...100 MHz	breites Spektrum 100 kHz...100 MHz
Wirkungsfläche	lokal	lokal	lokal	sehr gross

verschiedene Messpunkte von Blitzvorgängen eingezeichnet sind. Detaillierte Angaben dazu finden sich in [2] und [3].

Durch Mittelung ergibt sich aus den Einzelmessungen der mittlere Frequenzverlauf der beobachteten elektrischen Feldstärken in definiertem Abstand von der Blitzentladung. Da alle Messwerte auf 1 kHz bezogen sind, kann man durch einfache Division durch diese Bandbreite das Amplitudendichtespektrum eines äquivalenten Normblitzes gewinnen.

Eine Darstellung der verschiedenen zu erwartenden Störgrössen zeigt die Tabelle I.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass der EMV-Ingenieur nicht in erster Linie am Spektrum der Störquelle, also z. B. der Blitzfeldstärke im freien Raum, interessiert ist, sondern am Spektrum des über die verschiedensten Kopplungs- und Übertragungsstrecken verformten Impulses an der Schnittstelle zum beeinflussten Schaltelement oder Gerät. Damit kommt ein weiteres statistisches Element in die Betrachtung, das wegen seiner Orts- und Zeitabhängigkeit (verschiedenartige Netzwerke) mit mehr Unsicherheiten behaftet ist als die Erfassung der Störursache. Hier hilft einzig eine vernünftige Normung, die selbstverständlich den Erfahrungen angepasst sein muss. In dieser Normung müssen folgende Einflussgrössen berücksichtigt werden: Störquelle, Koppel- und Übertragungsstrecke, beeinflusste Komponenten bzw. Geräte (Prüflinge).

Es verwundert nicht, dass sich auf Grund der verschiedenen Netzverhältnisse und Prüflinge im Laufe der Jahre eine Normenvielfalt entwickelt hat, die nicht nur dem Gerätehersteller Sorgen bereitet.

1.4 Klassierung

Eine Klassierung transienter Störgrössen in Hinsicht auf die Entwicklung von Störgeneratoren lässt sich nur sinnvoll vornehmen, wenn man die Störquelle unter dem Gesichtspunkt ihrer Störwirkung betrachtet. Es sind ja die Störwirkungen, die man in den verschiedensten Tests simulieren will. Tabelle II zeigt, wie man eine solche Klassierung vornehmen kann. Durch Zuordnung der hauptsächlichen Störgrössen zu den Störwirkungen erhält man eine Matrix, deren Elementen die entsprechenden Normen zugeordnet werden können. Die Aufstellung gibt nur einen kleinen Teil der heutigen Normen wieder. Zudem sieht man, dass nicht jedes Feld durch eigene Normen abgedeckt ist. Teilweise ist dies darauf zurückzuführen, dass sich die Grenzen oft nur schwer und mit vermehrtem Prüfaufwand ziehen lassen. Dazu ist zu bedenken, dass ein Störimpuls alle drei Störwirkungen gleichzeitig verursachen kann.

2. Simulation von Störgrössen durch Prüfstörgrössen

2.1 Konstruktionsprinzipien für Impulsgeneratoren

Ziel einer Prüfnormung ist, reproduzierbare Aussagen über das Verhalten einer Klasse von Prüflingen zu erhalten. Um Fehlerquellen auszuschliessen, schreiben viele Normen die impulserzeugende Schaltung vor.

Bei der Transientenprüfung werden in den meisten Fällen kurzzeitige hohe Spannungen oder Ströme benötigt, die man am einfachsten durch eine Kondensatorentladung erzeugt. Als Schaltelement findet wegen der relativ hohen Spannungen (mehrere kV), der kurzen Schaltzeiten und des günstigen Preises vor allem die Funkenstrecke Anwendung. Je nach Prüfaufgabe (Impedanzverhältnis) benötigt man einen Stossstrom- oder einen Stossspannungsgenerator.

Klassierung transienter Störvorgänge und deren Nachbildung durch Prüfstörgrössen Tabelle II

Störwirkung	I Isolationsdefekte	II Thermische Defekte	III Funktionsstörung
Kritische Grösse Störgrösse	Elektrische Feldstärke	Energie	Störabstand
A Blitzentladung	Prüfimpuls 1,2/50 µs	µs 8/20; 20/60; 10/1000; 10/50; 0,5/700; 10/70	1,2/50 µs abklingender 1-MHz- und 100-kHz-Impuls
	IEC: 23 (E), 60-2, 521 VDE: 110 b, 0418, 0565, 0663, 0664, 0845 IEEE: 587.1	IEC: 60-2 CCITT: K.12 VDE: 0845	IEC: 60, 255-4 IEEE: 587.1, 472
B Schaltvorgänge	µs 1,2/50; 250/2500		5/50 ns; 1 MHz
	wie A I	wie A II	IEC: 654.5 (Vorschlag)
C Statische Entladung			ns 5/30; 50/150
	wie C III	wie C III	IEC: 654.5 (Vorschlag) VDE: 0847-2 (Entwurf) VG: 95373/14 MIL: 883B
D NEMP			ns <10/200; <10/600
	wie D III	wie D III	inoffiziell NATO
E Übrige Störer	Abgedeckt durch A bis D oder durch spezielle Normen; z. B. in der Bahnelektronik		

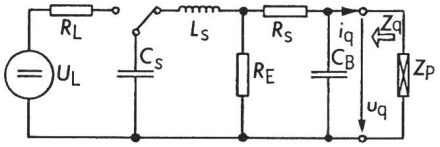

Fig. 7 Schaltung eines Stossspannungsgenerators

R_L Ladewiderstand
C_S Stosskapazität
L_S Serieinduktivität
R_E Entladewiderstand
R_S Seriewiderstand
C_B Grundbelastungskapazität
Z_p Prüflingsimpedanz
Z_q Quellenimpedanz

Stossspannungsgenerator (Fig. 7): Dieser wird normalerweise so dimensioniert, dass die Anstiegszeit durch die Zeitkonstante $T_{SB} = f(L_s, R_s, C_B)$ und die Abfallzeit durch $T_{ES} = R_E \cdot C_S$ gegeben ist. Damit der Impuls nicht verfälscht wird, muss $Z_q \ll Z_P$ sein. Die Quellenimpedanz Z_q ist frequenzabhängig. Bei hohen Frequenzen ist vor allem C_B wirksam, für niedrige die Serieschaltung von R_E und R_S.

Stossstromgenerator (Fig. 8): Der Stossstromgenerator erzeugt die vorgeschriebenen Anstiegs- und Abfallzeiten mittels einer gedämpften Schwingung. Um möglichst hohe Ströme zu erreichen, wird ein gewisses Unterschwingen in Kauf genommen. Damit der Impuls durch die Prüflingsimpedanz nicht unzulässig verformt wird, darf dieses einen bestimmten von den Kreisgrössen abhängigen Wert nicht überschreiten.

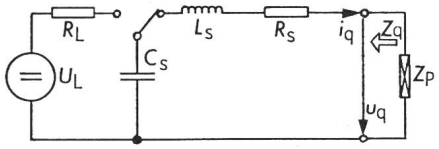

Fig. 8 Schaltung eines Stossstromgenerators

R_L Ladewiderstand
C_S Stosskapazität
L_S Serieinduktivität
R_S Seriewiderstand
Z_p Prüflingsimpedanz
Z_q Quellenimpedanz

Andere Generatoren: Neben diesen Hauptformen gibt es eine Vielzahl anderer Generatoren, wie z. B. Rechteckgeneratoren, Spannungsunterbruchsimulatoren usw.

2.2 Die verschiedenen EMV-Prüfungen

Entsprechend den zu untersuchenden Störwirkungen (Tab. II) kann man die EMV-Prüfungen in drei Gruppen unterteilen [4].

1. Spannungsfestigkeitsprüfung
2. Energieaufnahmeprüfung
3. Störfestigkeitsprüfung

Während die ersten beiden Prüfungen bereits seit vielen Jahren für die verschiedensten Geräte durch Normen festgelegt sind und im wesentlichen nur den sich ändernden Anforderungen angepasst und vereinheitlicht werden müssen, hat die Störfestigkeitsprüfung mit Ausnahme der Rundfunkstörprüfungen erst in den letzten Jahren durch den Einsatz der Mikroelektronik grosse Bedeutung erlangt. Die dringend nötigen Normen wie z. B. IEC 654-5 und VDE 0847 Teil 2 sind erst in naher Zukunft verfügbar und die benötigten Störgeneratoren erst teilweise spezifiziert.

2.3 Prüfung der Spannungsfestigkeit

Die Spannungsfestigkeitsprüfung soll beweisen, dass ein elektrisches Gerät gegen Überspannungen, die beispielsweise durch einen Blitzeinschlag verursacht und über Netz- oder Signalleitungen zugeführt werden, ausreichend geschützt ist.

Impulsformen
und Normen: siehe Tabelle II

Spannungen:	1 kV...etwa 20 kV, in Spezialfällen bedeutend höher
Energie im Stoss-kondensator:	bis etwa 500 J, Spezialfälle weit höher
Schaltung:	Stossspannungsgenerator nach Figur 7

2.4 Prüfung der Energieaufnahmefähigkeit

Für die Energieaufnahmeprüfung werden je nach Impedanz des Prüflings Stossspannungs- oder Stossstromgeneratoren eingesetzt. Auch ist zu beachten, dass es Prüfungen gibt, bei denen man gleichzeitig Spannungsfestigkeit und Energieaufnahmefähigkeit prüft. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn Nichtlinearitäten eine Rolle spielen, wie z. B. bei Schutzeinrichtungen nachrichtentechnischer Geräte. Generatoren für die Energieaufnahmeprüfung zeichnen sich durch hohe, im Stosskondensator gespeicherte Energien aus.

Impulsformen und Normen:	siehe Tabelle II
Spannungen:	bis etwa 6 kV, Spezialfälle weit höher
Ströme:	bis etwa 30 kA, Spezialfälle weit höher
Energie im Stoss-kondensator:	100...1500 J, Spezialfälle weit höher
Schaltung:	Figuren 7, 8, Rechteckgeneratoren

2.5 Prüfung der Störfestigkeit gegen leitungsgeführte transiente Störgrössen (30 Hz–300 MHz)

Im Gegensatz zur Spannungsfestigkeits- und Energieprüfung, bei der man auf bestehende Normen verweisen kann, muss die Störfestigkeitsprüfung etwas eingehender behandelt werden.

Diese hat zur Aufgabe, eine elektrische Einrichtung daraufhin zu testen, ob und wie weit sie Störgrössen einer bestimmten Höhe ohne Fehlfunktion erträgt. Diese Störgrössen können dem gestörten Gerät über Leitungen oder als freie Wellen zugeführt werden. Im folgenden werden nur leitungsgeführte Störgrössen behandelt. Den Nachweis, dass eine elektrische Einrichtung Störgrössen bestimmter Höhe erträgt, erbringt man mit speziellen Prüfimpulsen, die nach Formulierung VDE 0847-2 möglichst den ganzen Frequenzbereich abdecken sollen, für den die Störfestigkeit des Prüflings zu beurteilen ist.

Zur Erzeugung dieser Prüfimpulse benötigt man entsprechende Generatoren sowie Ankopplungen, welche die Prüfstörimpulse örtlich und frequenzmässig dort einkoppeln, wo die tatsächlichen Störgrössen zu erwarten sind. Die Art der Einkopplung ist dermassen wichtig, dass der erwähnte VDE-Normenentwurf im Aufbau den Ankopplungsarten angepasst ist.

Da bis heute noch nicht klar definiert ist, was unter der Aussage «Die Prüfstörgrössen müssen einen bestimmten Frequenzbereich abdecken» zu verstehen ist, wird vom Ansatz ausgegangen, dass das Prüfimpulsspektrum in dem zu untersuchenden Frequenzbereich einen möglichst ebenen Verlauf aufweisen soll. Aus dieser Sicht wäre der Diracstoss ein idealer Prüfimpuls. Wegen unvermeidbarer Nichtlinearitäten sowie wegen der technischen Realisierbarkeit muss die Impulshöhe begrenzt werden. Es gilt deshalb, eine Kompromisslösung zu finden. Dazu sollen die beiden Impulsformen e-Funktion und Rechteckfunktion verglichen werden (Fig. 9).

Natürlich lassen sich auch diese zwei Impulsformen technisch nicht ideal verwirklichen. Die unvermeidlichen Anstiegs- und Abfallzeiten lassen das Spektrum oberhalb f_{k2} mit 40 db pro Dekade abfallen (gestrichelt).

Wie der Vergleich zeigt, unterscheiden sich die Enveloppen der Spektren nicht voneinander. Welcher dieser beiden Grundformen man den Vorzug geben will, ist ohne weitere Randbedingungen nicht entscheidbar. Die meisten der derzeit existierenden Störimpulsgeneratoren arbeiten nach dem Prinzip der e-Funktion.

Tabelle III zeigt eine Zusammenstellung von Störimpulsgeneratoren, die für Störfestigkeitsprüfungen in Frage kommen. Dabei ist zu beachten, dass die Normung auf diesem Gebiet noch nicht abgeschlossen ist. In Figur 10 sind die zugehörigen Amplitudendichtespektren (Enveloppen) sowie die Frequenzverläufe der Quellenimpedanzen in doppeltlogarithmischem Massstab (EMV-Diagramm) aufgezeichnet.

Die Amplitudendichtespektren sind auf ihre jeweilige Maximalamplitude normiert. Der Betrag dieses Maximums ist neben den charakteristischen Grössen Anstiegszeit und Rückenhalbwertszeit in der Legende zu Figur 10 eingetragen, wobei eine Ladespannung von 1 kV angenommen wurde. Die Umrechnung auf die tatsächlichen Spektralwerte ist damit denkbar einfach. Bezugsgrösse ist immer die 0-dB-Linie.

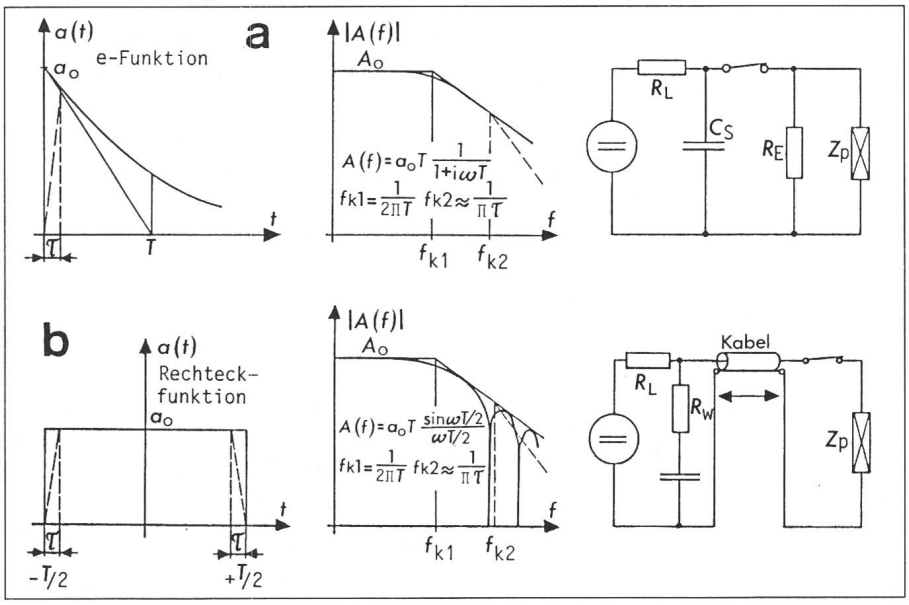

Fig. 9 Vergleich des Impulsspektrums und der Stossschaltung einer *e*-Funktion und eines Rechteckstosses

e-Funktion $a(t) = \begin{cases} a_0 e^{-t/T} & \text{für } t > 0 \\ 0 & \text{für } t < 0 \end{cases}$

Rechteckfunktion $a(t) = \begin{cases} a_0 & \text{für } |t| < T/2 \\ 0 & \text{für } |t| > T/2 \end{cases}$

Impulsgeneratoren für Störfestigkeitsprüfung Tabelle III

Impulsform	Quellenimpedanz Ω	Maximale Amplitudendichte für U_L = 1 kV dB [µVs]	Maximale Repetitionsfrequenz (Haefely)	Genormte Last Ω	Kopplung	Wichtigste Normen	Schaltung C_s nF	L_s µH	R_p Ω	R_s Ω	C_B nF	Fig.	$U_{L\,max}$
A 1,2/50 µs	17,8–15 0–85 kHz	95	6 pro min	5 (VDE 0847-2)	Dioden Impulstrafo	IEC 60	20 000	2	2,8	15	30	7	6 kV
B 0,1/1 µs	30–25 0–1,5 MHz	76	30 pro min	50 (VDE 0847-2)	Dioden Impulstrafo VDE 0847-2	keine	250	2	5	25	0,75	7	12 kV
C <75 ns/1 MHz	200 13–10 MHz	43 (0 dB-Linie) Max. = 61	400 Hz		Kapazität 100 nF oder VDE 0847-2	IEC 255-4 IEEE 472	4	<0,5	Lp 6 µH	200	01,1	≈7	3 kV
D 5/50 ns (Burstgen.)	50 f>7 MHz	24	10 kHz bei U_L≤2 kV	50	Kapazität 10 nF oder VDE 0847-2	IEC 654-5 (Vorschlag)	0,445	>0,2	180	15	~0	7	4 kV
E 5/30 ns (Stat. Entlad.)	150 f>7 MHz	27	50 Hz	1 oder 50	galvanisch	IEC 654-5 (Vorschlag) MIL 883B	0,15	<0,5	~∞	150	~0	8	15 kV
F 10/600 ns NATO: 10/200 (EMP)	< 150 f>0,1 MHz	60 50	1 Hz	100 (inoffiziell) 30	Antenne	keine NATO	10	<0,5	~∞	0,1	~0	8	12 kV

Beispiel

Impuls 1,2/50, Ladespannung U_L = 5 kV; gesucht die Frequenzdichte bei 10 kHz.

$$A_{10\,\mathrm{kHz}} = 20 \log \frac{5\,\mathrm{kV}}{1\,\mathrm{kV}} + 95 - 11 = 97\,\mathrm{dB}\ [\mu\mathrm{Vs}]$$

Als zusätzliches Hilfsmittel bei der Einsatzplanung ist am oberen Rand die Frequenzeinteilung des VDE-Normenvorschlags 0847-2 eingetragen.

Wesentlich für den Einsatz und damit die Dimensionierung eines Generators ist die Quellenimpedanz. Deshalb wird von den Normengremien oftmals die impulserzeugende Schaltung vorgeschrieben. Im unteren Frequenzbereich (30 Hz–150 kHz) sind noch einige Änderungen zu erwarten.

2.6 Ankopplungen

Vor allem bei der Störfestigkeitsprüfung muss das Prüfstörsignal dem Prüfling bei möglichst normalem Betrieb aber unter Ausschluss fremder Störsignale zugeführt werden. Dazu benötigt man Ankopplungsnetzwerke (Fig. 11), an deren Dämpfungsverhal-

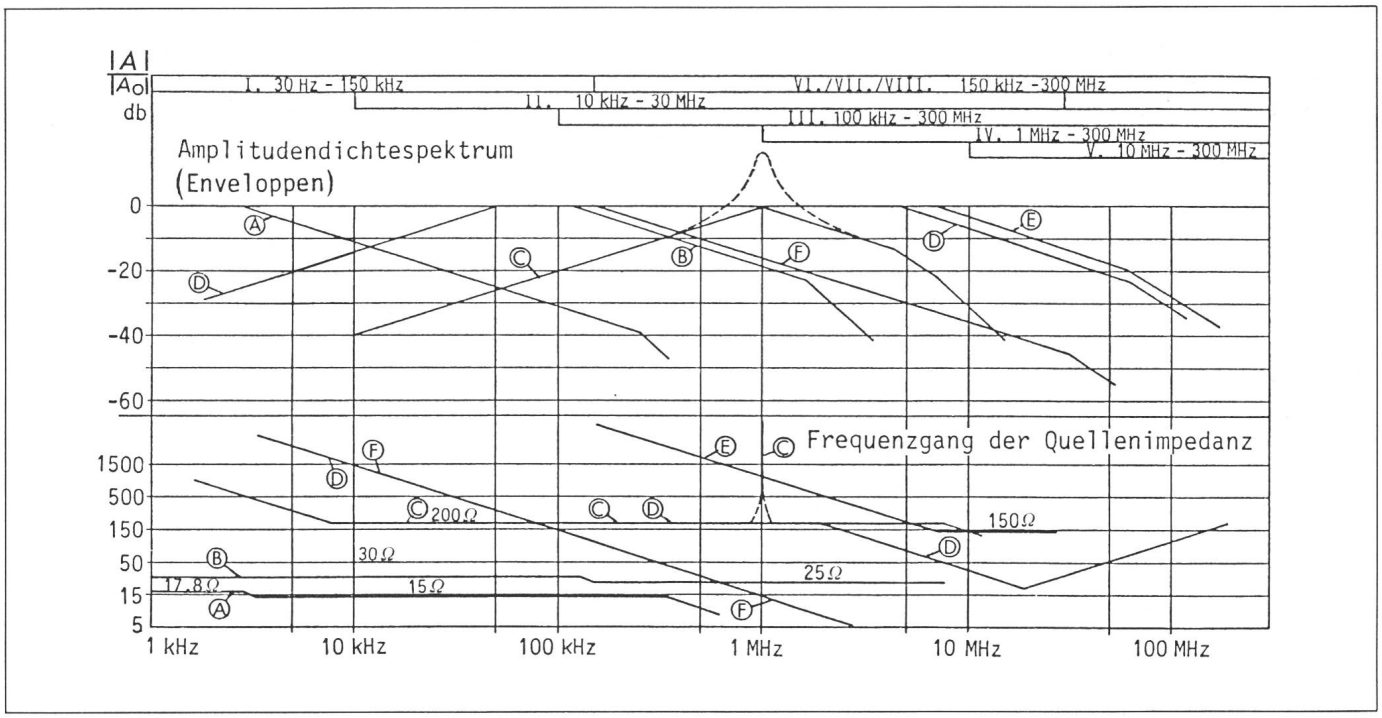

Fig. 10 Amplitudendichtespektrum und Frequenzgang der Quellenimpedanz verschiedener Störimpulsgeneratoren nach Tabelle III

A 1,2/50 µs; 95 dB
B 0,1/1 µs; 76 dB
C < 0,75 ns/1 MHz; 43 dB
D 5/50 ns auf 50 Ω; 24 dB
E 5/30 ns auf 1 Ω; 27 dB
F 10/600 ns; 60 dB

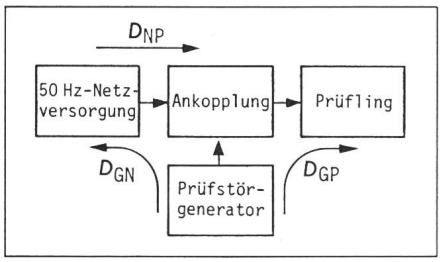

Fig. 11 Ankopplung des Prüfstörgenerators

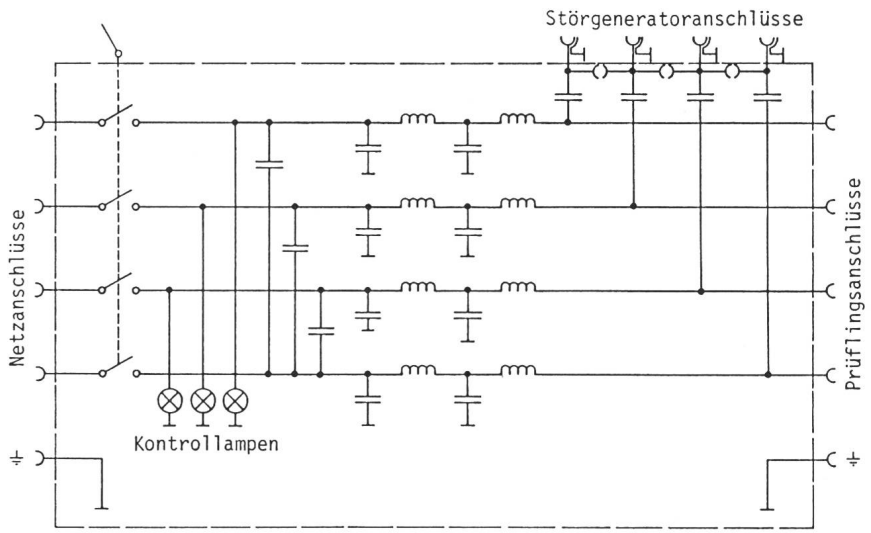

Fig. 12 Netzwerk zur Ankopplung eines Prüfstörgenerators

ten folgende Anforderungen gestellt werden: D_{GP} möglichst klein, D_{GN} möglichst gross, D_{NP} klein für 50-Hz-Speisespannung, gross für höherfrequente Netzstörungen. Dazu wird eine möglichst gute Impedanzanpassung zwischen Störgenerator und Ankopplung verlangt.

Ein Beispiel eines solchen Netzwerkes zeigt Figur 12. Dieses entspricht den Anforderungen des Vorschlages IEC TC 65 für die Burstgeneratorankopplung.

2.7 Technologische Grenzen für Prüfstörgeneratoren

Die technologischen Grenzen für Prüfstörgeneratoren machen sich vor allem bei Generatoren für Störfestigkeitsprüfungen bemerkbar. Bei diesen werden neben sehr hohen Grenzfrequenzen auch hohe Impulsrepetitionsfrequenzen gefordert. Für die Grenzen verantwortlich sind folgende zwei Ursachen:

1. Die Schaltungsabmessung kann wegen der relativ grossen Spannungen (bis zu einigen kV) nicht beliebig klein gemacht werden. Parasitäre Induktivitäten sind die Folge, die der Anstiegszeit Grenzen setzen.

2. Impulsgeneratoren benötigen ein Schaltelement. Für Spannungen über 1 kV kommen dazu nur Funkenstrekken oder Schaltröhren in Frage. Schaltröhren sind ausserordentlich teuer, so dass sie nur in Spezialfällen eingesetzt werden. Zudem sind sie leistungsmässig stark begrenzt. Die Funkenstrecken zeigen ein nichtlineares Verhalten, das auf Coronaeffekte und Induktivitätsänderung bei zunehmender Spannung hinweist. Zudem ist die Zündfrequenz beschränkt, da Funkenstrecken nach dem Löschen eine minimale Wiederverfestigungszeit benötigen. Zu frühe Neuzündung führt zu tieferen Durchschlagsspannungen.

Zahlen über die heutigen Grenzen sind schwierig anzugeben, da man verschiedene Parameter berücksichtigen muss. Einen Anhaltspunkt können die Geräte E und F in Tabelle III geben. Sie liegen an der Grenze des heute mit vertretbarem Aufwand Möglichen.

Literatur

[1] Messverfahren zur Beurteilung der elektromagnetischen Verträglichkeit. Messen leitungsgeführter Störgrössen. VDE-Bestimmung 0847 Teil 1/11.81.

[2] *R.M. Showers, R.B. Schulz* and *S.-Y. Lin:* Fundamental limits on EMC. Proc. IEEE 69(1981)2, p. 183...195.

[3] *L.J. Oh:* Measured and calculated spectral amplitude distribution of lightning sferics. IEEE Trans. EMC 11(1969)4, p. 125...130.

[4] *K. Feser* und *M. Lutz:* Prüfung elektronischer Systeme und Geräte auf Elektromagnetische Verträglichkeit. Industrie-Elektrik + Elektronik 25(1980)13/14, S. 371...374.