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: 83 (1992)

Heft: 11

Artikel: Ursachen, Auswirkungen und Messung elektromagnetischer Effekte

Autor: Gassmann, Felix

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902831

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: 10.12.2025

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

Ursachen, Auswirkungen und Messung elektromagnetischer Effekte

Felix Gassmann

Bei einem prognostizierten jährlichen Anstieg des elektromagnetischen Störpegels von über 10% machen sich immer mehr Unternehmen Gedanken über die Störfestigkeit und Störaussendung ihrer Produkte. Im Hinblick auf den europäischen Wirtschaftsraum entstehen neue Normen für elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), die den freien Warenaustausch innerhalb der EG begünstigen. Der folgende Bericht beschreibt Ursachen und Auswirkungen elektromagnetischer Störungen und Methoden der EMV-Feldmesstechnik.

Pour une montée annuelle pronostiquée du niveau perturbateur électromagnétique de plus 10%, un nombre croissant d'entreprises réfléchissent sur la tenue aux perturbations et l'émission de perturbations de leurs produits. En vue de l'espace économique européen, de nouvelle normes sur la compatibilité électromagnétique (CEM) sont éditées, qui favorisent les échanges commerciaux au sein de la CE. L'article ci-après décrit des causes et effets de perturbations électromagnétiques et des méthodes de métrologie de la CEM.

Adresse des Autors
Felix Gassmann, Dipl. El.-Ing. ETH,
Direktor EMC Baden AG,
c/o ABB Forschungszentrum,
5405 Baden-Dättwil.

Begriffe zur elektromagnetischen Verträglichkeit EMV

Elektrostatik

Elektrostatische Aufladungen entstehen bei der Trennung zweier, sich berührender Materialien mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften. Es können sich dabei sowohl gleiche als auch ungleiche Polaritäten bilden. Beim Zusammenfügen unterschiedlicher Metalle bildet sich eine Kontaktpotentialdifferenz, und es findet eine Ladungsverschiebung statt. Beim Trennen der Metalle erfolgt aber ein sofortiger Ladungsrückfluss, so dass der ursprüngliche Zustand der Metalle wieder hergestellt ist. Bei der Trennung einer Isolator-Metall- oder Isolator-Isolator-Verbindung hingegen bleiben mehr oder weniger Ladungen auf den Oberflächen der Materialien gefangen. Solche ungewollte Aufladungen entstehen zum Beispiel beim Abrollen von Papier- und Kunststoffbahnen, beim Aufwirbeln von Staub, bei der Handhabung von Kunststoffteilen usw.

Eine besonders grosse Bedeutung hat heute die Entladung des statisch aufgeladenen, menschlichen Körpers erlangt. Beim Gehen auf isolierenden Teppichen nimmt eine Person, je nach Luftfeuchtigkeit und Beschaffenheit der Schuhsohlen, Ladungen auf, die sich auf der Körperoberfläche verteilen. Damit können Potentialdifferenzen von bis zu 30 kV entstehen. Die gespeicherte Energie liegt typisch im Bereich von 0,1 Joule und ist deshalb für den Menschen ungefährlich. Der zeitliche Verlauf einer typischen elektrostatischen Entladung ist in Bild 1 dargestellt. Auf der Ebene von elektronischen Halbleiterbauelementen sind nun aber schon Spannungen von über 50 V gefährlich (Bild 2). Um die

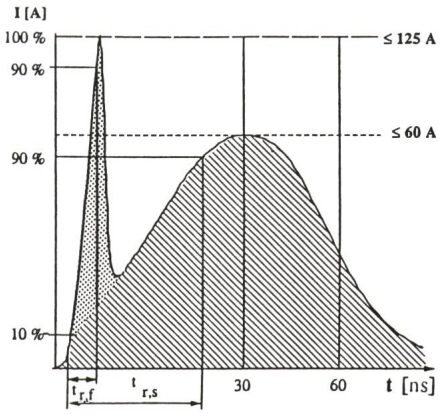

Bild 1 ESD-Normpuls
Stromverlauf $I(t)$ des ESD-Normpulses nach Cenelec (draft). Der schräg schraffierte Teil war bisher als Normpuls anerkannt. Neuere Untersuchungen haben aber den «schnellen» Anfangspuls entdeckt, welcher in den zukünftigen Normen enthalten sein wird.
$t_{r,f}$ 0,2–2 ns
$t_{r,s}$ 1–10 ns

Festigkeit einer elektronischen Schaltung gegenüber solchen elektrostatischen Entladungen von Personen zu prüfen, bedient man sich oft sogenannter ESD(Electro Static Discharge)-Simulatoren, welche den menschlichen Körper in guter Näherung durch ein elektrisches Netzwerk nachbilden. Im einfachsten Fall handelt es sich bei diesem Netzwerk um ein RC-Glied mit den Elementen R = 150 Ω und C = 150 pF (nach IEC 801-2, 1984). Untersuchungen in neuester Zeit haben aber gezeigt, dass dieses einfache Modell den schnellen Anfangsstoss (Bild 1) mit einer Anstiegszeit von <1 ns nicht abdeckt. Deshalb unterteilt man heute den menschlichen Körper in die drei Abschnitte: Rumpf, Arme und Finger. Die Abschnitte werden je durch ein separates Netzwerk mit unterschiedlichen Zeitkonstanten modelliert.

Schaltelement	ESD-Suszeptibilität [V]
VMOS	30–1800
MOSFET	100– 200
GaAsFET	100– 300
EPROM	100
JFET	140–7000
SAW	150– 500
Operationsverstärker	190–2500
CMOS	250–3000
Schottky Dioden	300–2500
Film Widerstände	300–3000
Bipolare Transistoren	380–7000
ECL	500–1500
SCR	680–1000
Schottky TTL	1000–2500

Bild 2 ESD-Zerstörspannungen
Angaben für verschiedene Halbleitertechnologien

ESD ist aus den oben genannten Gründen ein wichtiger und zu beachtender Störfaktor für moderne elektronische Systeme. In den meisten hochintegrierten Schaltungen hat man entsprechende Schutzmassnahmen vorgesehen. Elektrostatische Entladungen erzeugen aber zusätzlich transiente elektromagnetische Felder, welche die Sicherheit von elektronischen Systemen ebenfalls gefährden können. Experimente haben gezeigt, dass bei einer räumlich isolierten elektrostatischen Entladung in einem Abstand von 1 bis 2 Metern immer noch Feldstärken von über 150 V/m existieren. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Funke selbst den grössten Anteil der Strahlungsquelle darstellt. In realen Systemen können die leitenden Strukturen, die dann wie Antennen wirken, diesen Effekt wesentlich verstärken.

Blitz

Der Blitz verursacht neben den allgemein bekannten direkten Zerstörungen auch einen sehr starken elektromagnetischen Puls (LEMP: Lightning Elektromagnetic Pulse). Einen typischen Verlauf des Blitzstromes an der Einschlagstelle zeigt Bild 3. Der Strom erreicht Scheitelwerte von bis zu 200 kA. Die dabei erzeugten transienten elektromagnetischen Felder können elektronische Systeme beeinträchtigen oder gar zerstören.

NEMP

Bei der Zündung einer Kernwaffe in grosser Höhe über dem Erdboden (400 km) wird Energie in Form von Hitze, Druck, Licht, Röntgenstrahlen, Neutronen und γ-Strahlung freigesetzt. Diese hochenergetische Strahlung ionisiert eine grosse Fläche der Atmosphäre und löst einen Elektronenschauer aus. Die freien Elektronen bilden zusammen mit der ionisierten Atmosphäre einen elektrischen Dipol. Das Magnetfeld der Erde wiederum lenkt die gestreuten Elektronen auf ihrer Bahn ab, so dass auch ein magnetischer Dipol erzeugt wird. So entsteht eine riesige, atmosphärische Flächenantenne, die ganze Kontinente mit einem starken nuklearen elektromagnetischen Puls (NEMP) verseucht. Die dabei erzeugte Feldstärke auf der Erdoberfläche kann bis zu 50 kV/m, mit Anstiegszeiten im Bereich von 5 ns, betragen (siehe Bild 4). Ähnliche elektromagnetische Pulse treten lokal auch beim Schalten von Hochspannung (z.B. gasisolierte Schalter, SF_6-Schaltanlagen) auf.

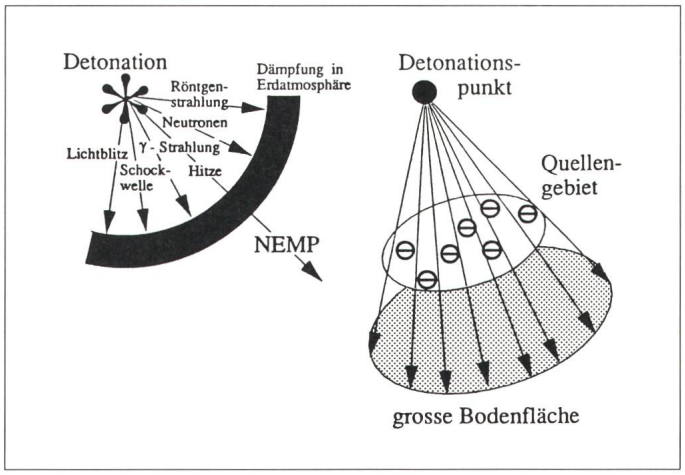

Bild 4 NEMP
Der NEMP (Nuclear Electro Magnetic Pulse) entsteht durch die Detonation einer Kernwaffe in grosser Höhe über der Erdoberfläche

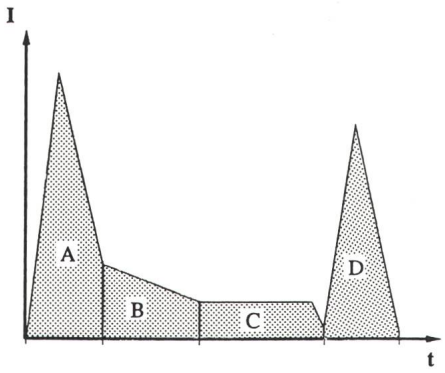

Bild 3 Blitzstrom
Typischer Verlauf des Blitzstromes *I(t)* an der Einschlagstelle. Je nach Situation können noch weitere 'restrikes' (*D*) entstehen

A 'initial stroke': <500 μs, ≦ 200 kA
B 'intermediate current': <5 ms, 2 kA, 10 As
C 'continuing current': 0,25-1 s, 0,2–0,8 kA, 200 As
D 'restrike': <500 μs, 100 kA

TEMPEST – elektromagnetischer Abhörschutz

Ein typisches Büro ist heute mit mindestens einem PC und verschiedenen Telekommunikationsinstrumenten (Telefon, Fax, drahtlose Telefone) ausgerüstet. Alle diese Geräte senden, leitungsgebunden oder feldgebunden, je nach Bauart und Technologie, ein bestimmtes elektromagnetisches Spektrum aus. Zum Beispiel ist es möglich, ein Computerterminal in relativ grosser Entfernung aufgrund seines «elektromagnetischen Fingerabdrucks» abzuhören. Dabei können wichtige oder gar geheime Daten in unbefugte Hände gelangen. Es müssen bei solchen Anlagen, vor allem bei Banken, Versicherungen und Militär, Schutzmassnahmen getroffen werden. TEMPEST (Total Electrical and Mechanical Protection against Emission and Spurious Transponse) ist ein zunehmend wichtiger Zweig der elektromagnetischen Verträglichkeit.

Gefährden elektromagnetische Felder unsere Gesundheit?

Relativ gut untersucht und bekannt sind die Folgen hoch- oder radiofrequenter Felder, wie sie bei Radaranlagen, Funkgeräten, Radio- oder TV-Sendern und Mikrowellenöfen auftreten. Diese elektromagnetische Strahlung erwärmt biologisches Gewebe. Vor allem Kopf und Augen sind in der Nähe von Sendeanlagen – unter anderem auch bei Natel-C-Geräten – vom Feld betroffen.

Für niederfrequente Felder hingegen, wie sie bei Hochspannungsleitungen, Haushaltgeräten und elektri-

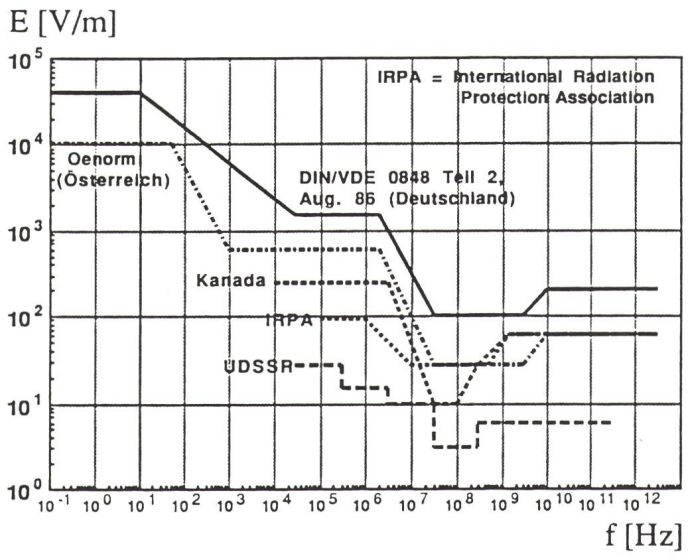

Bild 5
Expositionsgrenzwerte für das elektrische Feld
E elektrische Feldstärke
f Frequenz

schen Installationen auftreten, ist eine klare Einschätzung möglicher Auswirkungen auf biologische Systeme schwierig. Ob sie – wie immer wieder behauptet wird – zu Kopfschmerzen und Depressionen führen, den Biorhythmus verändern oder sogar Krebs auslösen können, ist wissenschaftlich noch eine offene Frage.

Niederfrequente Felder erzeugen biologische Effekte; im Labor lassen sich subtile Veränderungen an Zellen und Nervensystem durch niederfrequente Felder messen. Wirkungsmodelle zu ihrer Erklärung fehlen aber. Ob solche Veränderungen eine Gefährdung oder Belästigung darstellen, darüber ist man sich heute noch nicht einig. Eine wichtige Besonderheit der Laborversuche ist, dass gewisse Effekte nur in bestimmten Frequenzfenstern und Feldstärken auftreten. Mit anderen Worten: Die Wirkungen der niederfrequenten elektrischen und/oder magnetischen Felder passen nicht in das Bild, das für andere umweltrelevante Immissionen gilt. «Je höher die Dosis, desto gravierender der Effekt» stimmt beim Elektrosmog offenbar nicht. Trotzdem wurden und werden grosse Anstrengungen unternommen, um verbindliche Feld-Grenzwerte festzulegen. Das Bild 5 zeigt eine Zusammenstellung der Grenzwerte für das elektrische, und das Bild 6 für das magnetische Feld.

Die Krebsdebatte über niederfrequente Felder wird die Wissenschafter wohl noch lange beschäftigen, bewiesen ist noch sehr wenig. Mit ziemlicher Sicherheit kann heute gesagt werden, dass niederfrequente Felder nicht direkt Krebs auslösen, sondern «nur», in Kombination mit andern Umwelteinflüssen, eine sogenannte krebspromovierende Wirkung zeigen können.

EMV-Feldmesstechnik

Messung der feldgebundenen Störung

Erhöhte Anforderungen an die Störfestigkeit von elektrischen und elektronischen Systemen machen es notwendig, dass Messmittel zur Verfügung gestellt werden, mit denen man die Störfestigkeit und die Störaussendung reproduzierbar überprüfen kann. Betrachtet man die Störprobleme von elektrischen/elektronischen Systemen, so kann man diese grob in zwei Klassen einteilen: Probleme, verursacht durch leitungsgebundene, und solche verursacht durch feldgebundene Störungen. Beide Störarten können gleichzeitig in unterschiedlicher Gewichtung auf ein System einwirken oder von diesem System ausgesandt werden. Die erwarteten Pegel für feldgebundene Störungen und leitungsgebundene Störungen sind in den Bildern 7 und 8 aufgezeigt. Die generelle Aufgabe in der EMV-Messtechnik besteht darin, entweder die Beeinflussung eines Objektes durch diese Störungen zu untersuchen oder die ungewollten Aussendungen zu bestimmen. Die Kategorie der leitungsgebundenen Störungen ist relativ leicht zu behandeln. Man hat konkrete Ansatzpunkte zur Störsimulation (über die Zuleitungen zum System) oder kann gezielt an diskreten Punkten die Störaussendungen messen. In beiden Fällen kann man die Störquellen und die Auswirkungen der Störungen eindeutig herausfinden und einander zuordnen. Etwas anders sieht die Situation im Fall der feldgebundenen Störungen aus.

Freifeld-Testeinrichtungen

Die Freifeld-Testeinrichtung war der erste Messplatz für Störfestigkeits- und Störabstrahlungstests. Die Freifeld-Testeinrichtung, auf Englisch als Open Area Testsite (OATS) bezeichnet, setzt sich im wesentlichen aus drei Elementen zusammen: Antennenmast, eine leitende Bodenfläche und das zu prüfende Objekt. Die Antenne wird auf verschiedene, in den Normen vorgeschriebene Höhen gefahren und sowohl horizontal- als auch vertikalpolarisiert betrieben.

Vielfach ist das Spektrum der elektromagnetischen Umgebung (Background Noise) weit stärker als die

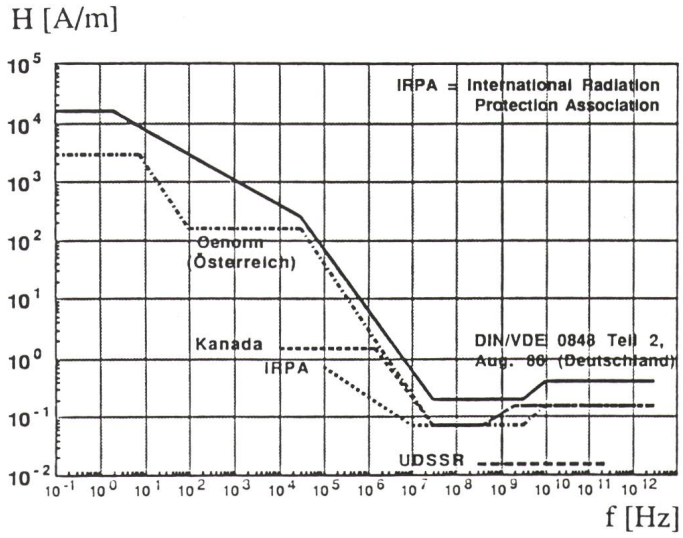

Bild 6
Expositionsgrenzwerte für das magnetische Feld
H magnetische Feldstärke
f Frequenz

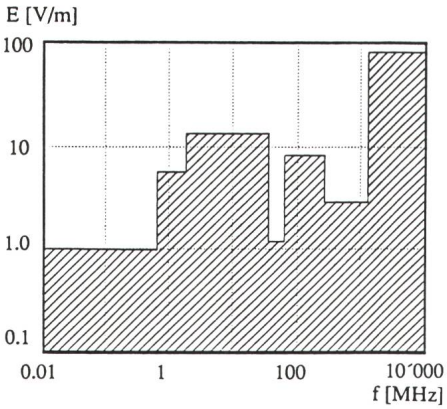

Bild 7 Störpegel für elektrische Felder
E Erwartete Störpegel für elektrische Felder im Frequenzbereich von 10 kHz bis 10 GHz
f Frequenz

Emission des Testobjekts. Zum Teil überdeckt die Hintergrundstörung (Radiosender, Fernsehen u.a.) die Störstrahlung des Messobjekts und überschreitet oft die einzuhaltenden Grenzwerte für Störabstrahlung. Zur Messung der Störfestigkeit könnte das Freifeld-Testverfahren ebenfalls angewandt werden. Hierbei wäre ein Objekt mit der entsprechenden Störfeldstärke – manche Standards fordern bis zu 400 V/m – über den geforderten Frequenzbereich zu bestrahlen. Die gesetzlichen Bestimmungen erlauben ein solches Vorgehen aber nicht.

Geschirmte Räume

Um andere Systeme bei der Störfestigkeitsmessung nicht zu beeinflussen, begibt man sich mit der Testeinrichtung in abgeschirmte Räume. Bei diesem Verfahren treten aber Resonanzen und erhebliche Reflexionen an den Wänden des Raumes auf. Dies führt zu Feldstärkevariationen, die zum Teil in der Grössenordnung von einem Faktor 1000 liegen. Deshalb ist diese Vorgehensweise mit einem sehr grossen Unsicherheitsfaktor belastet.

Absorberhallen

Kleidet man die Wände eines geschirmten Raumes mit Absorbern aus, so können die unerwünschten Wandreflexionen erheblich vermindert werden. Leider haben Absorberhallen (englisch: Anechoic Chambers «ALC») neben den erheblichen Anschaffungskosten (≈1,5 Mio. Schweizer Franken und mehr) einen grossen Nachteil. Die Absorber wirken erst ab etwa 80 MHz. Dies begrenzt den Anwendungsbereich auf CW(Continuous Wave)-Einstrahlungen und -Abstrahlungen bei Frequenzen oberhalb von rund 80 MHz.

Es ist nun klar, dass die existierenden klassischen Feldtestverfahren gravierende Fehlerquellen aufweisen. Es erscheint daher sinnvoll, nach anderen, einfachen Testverfahren zu suchen, die universell anwendbar sind.

TEM-Zellen

Die Probleme der Freifeld-Testeinrichtung, der geschirmten Räume und der Absorberhallen führen vom Weg der klassischen Freiraumausbreitung über Antennenanordnungen weg zu anderen Wellenausbreitungsarten. Zum Beispiel zur Möglichkeit der Ausbreitung der Felder in Wellenleiterstrukturen. In diesen Strukturen geschieht die Ausbreitung im sogenannten TEM(Transversal Electro Magnetic)-Mode. Bei diesem Wellenausbreitungstyp stehen die elektrische und die magnetische Feldkomponente senkrecht zueinander. Der Pointingvektor **S** zeigt immer in die Ausbreitungsrichtung der Welle. Gleichzeitig gilt für das Verhältnis zwischen E und H immer $E/H = 120\ \pi\Omega = 377\ \Omega$ (Feldwellenwiderstand). Somit liegt eine Wellenausbreitung unter Freiraumbedingungen vor.

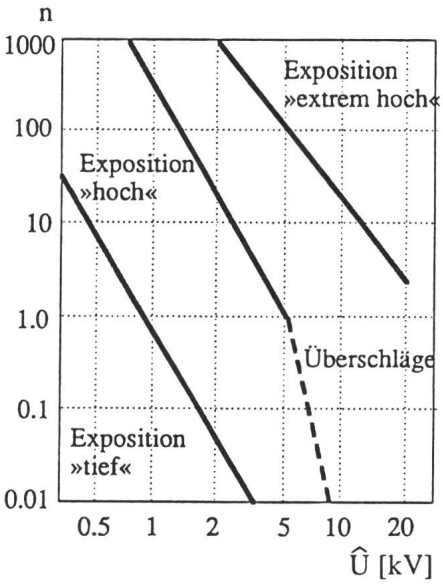

Bild 8 Leitungsgebundene Störungen
n Erwartete Anzahl leitungsgebundener Störungen pro Jahr für drei verschiedene Expositionen: tief (normale Haushaltsumgebung), hoch (industrielle Umgebung) und extrem hoch (harte industrielle Umgebung, z.B. SF_6-isolierte Hochspannungsschaltanlagen)
Û Scheitelspannung
Quelle: IEC, TC 77: «radio environment expected in populated areas»

Wellenleitersysteme können zum Beispiel Kabel oder Leitungen sein. Besonders hier erscheint es manchmal unverständlich, dass sich in einem Kabel mit beispielsweise einem Leitungswellenwiderstand von 50 Ω eine TEM-Welle mit einem Feldwellenwiderstand von 377 Ω ausbreitet. Zur Erläuterung diene folgende Betrachtung: Der Leitungswellenwiderstand für eine Leitung mit Luft als Dielektrikum lässt sich mit der bekannten Gleichung angeben (r_1 = Radius Innenleiter, r_2 = Innenradius Aussenleiter):

$$Z_0[\Omega] = 60 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) = \frac{U}{I} \qquad (1)$$

An einem Punkt mit Abstand r vom Zentrum der Koaxialleitung, im Innenraum zwischen Innenleiter und Aussenleiter, herrscht die magnetische Feldstärke H:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \qquad (2)$$

Am selben Ort ist die elektrische Feldstärke E:

$$E = \frac{U}{r \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \qquad (3)$$

Bildet man nun den Feldwellenwiderstand $Z_w = E/H$, so erhält man:

$$Z_w = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \cdot \frac{U}{I} \qquad (4)$$

Setzt man nun für das Verhältnis U/I den Leitungswellenwiderstand Z_o ein, so ergibt sich daraus der Freiraumfeldwellenwiderstand $Z_o = 120\ \pi\Omega$. Man beachte, dass dieser Wert unabhängig vom aktuellen Verhältnis r_1/r_2 und damit von den Kabeldimensionen ist. Der Leitungswellenwiderstand hat somit keinen Einfluss auf den Feldwellenwiderstand.

Der Feldwellenwiderstand bei TEM-Wellenausbreitung ist unabhängig von der Ausbreitungsstruktur und nur abhängig vom Ausbreitungsmedium. In Luft ist dieser immer 377 Ω. TEM-Zellenkonstruktionen mit einem *Leitungs*wellenwiderstand von 377 Ω sind nicht falsch, aber technisch unsinnig, weil dann wieder auf eine Generatorimpedanz von 50 Ω angepasst werden muss. Man sollte eher auf eine gute Generatoranpassung der

Leitung achten (Innenwiderstand = 50 Ω). Der Feldwellenwiderstand wird nur durch das Ausbreitungsmedium bestimmt.

Crawford vom National Institute for Standards and Technology (NIST) zeigte, wie die Stripline (Streifenleiter) in eine geschirmte Anordnung überzuführen ist. Der grosse Vorteil dieser geschirmten Struktur liegt darin, dass Störfestigkeitsuntersuchungen ohne Beeinflussung der Umgebung möglich sind. Ferner stellt die Zelle ein erdunsymmetrisches System dar. Da Generatoren normalerweise ebenfalls erdunsymmetrisch ausgeführt sind, entfällt beim Anschluss die Notwendigkeit eines sogenannten BALUN (BALanced to UNbalanced [1]).

Die Grenzfrequenz f_c der klassischen TEM ergibt sich aus Formel (5):

$$f_c[\mathrm{MHz}] = \frac{75}{a}\sqrt{1+\frac{4ab}{\pi b_1 b_2 \ln\left(\frac{8a}{\pi g}\right)}} \qquad (5)$$

Dabei bedeuten a die halbe Breite der Zelle, b die halbe Höhe der Zelle, b_1 den Abstand des Innenleiters zur Zellendecke, b_2 den Abstand des Innenleiters zum Zellenboden und g den Abstand des Innenleiters zur Zellenwand.

Oberhalb dieser Grenzfrequenz können sich höhere Moden als der TEM-Mode ausbreiten. Diese höheren Moden werden durch die Knicke in der Wellenleiterstruktur angeregt. Ein Weg, die Anregung von höheren Moden zu vermeiden, wäre es, die TEM-Zelle mit Absorbern auszulegen. Verschiedene Arbeiten haben in den letzten Jahren diesen Weg verfolgt. Prinzipiell ist es möglich, den nutzbaren Frequenzbereich um einen Faktor 2 nach oben zu verschieben. Der erfolgversprechende Weg ist aber eher in der Vermeidung der Knicke zu sehen. Dies ist bei der Entwicklung der GTEM(Gigahertz TEM)-Zellenfamilie geschehen.

Vergleicht man das Konzept der klassischen TEM-Zelle mit dem GTEM-Zellenkonzept (siehe Bild 9), so werden die Unterschiede deutlich: Im Gegensatz zur TEM-Zelle wird bei der GTEM-Zelle die Wellenausbreitung nicht gestört. Durch sphärische Anordnung der Absorberwand ist ebenfalls dafür gesorgt, dass die ebenfalls sphärische TEM-Welle ohne Laufzeit- und Phasenverschiebungen im Abschlussteil reflexionsfrei aufgenommen wird. In diesem Konzept sind keine grundsätzlichen Störungen der Wellenausbreitung mehr vorhanden. Etwaige Abweichungen sind auf Fertigungstoleranzen und nichtideale Materialeigenschaften zurückzuführen. Mit der GTEM-Zelle kann sowohl die Einstrahlung als auch die Abstrahlung von Testobjekten im Frequenzbereich von DC bis einige GHz gemessen werden.

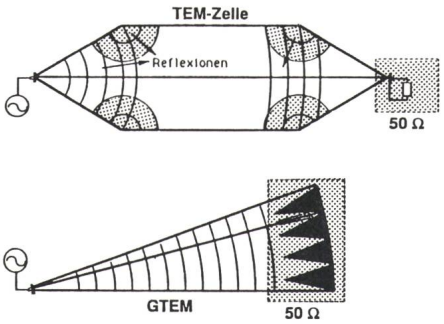

Bild 9 Ausbreitung elektromagnetischer Wellen
Elektromagnetische Wellenausbreitung in einer klassischen TEM-Zelle im Vergleich zum GTEM-Zellen-Konzept. Der breitbandige HF-Abschluss bei der GTEM-Zelle besteht sowohl aus einem flächigen 50-Ω-Widerstand als auch aus Absorbern

Feldstärkesensoren

Trotz der wohldefinierten elektromagnetischen Felder von TEM-Zellen ist man oft darauf angewiesen, Feldstärken messen zu können. Der internationale Markt für Feldstärkemessgeräte hat allerdings bis zum heutigen Zeitpunkt ein eher kleines Volumen. Dafür zeigt er einen ungeheuren Variantenreichtum an Produkten.

Schmalbandige Feldstärkemessung: So gut wie alle Antennen, angefangen beim einfachen Stück Kupferdraht bis zu komplexen Yagi-Antennen, lassen sich unter die schmalbandigen Feldstärkesensoren einordnen. Es würde deshalb den Rahmen dieses Artikels sprengen, sie alle zu erwähnen. Konventionelle schmalbandige Feldstärkemessgeräte bestehen im wesentlichen aus einer solchen Antenne und einem frequenzselektiven Voltmeter oder Spektrum Analysator. Der Umrechnungsfaktor zwischen dem Ausgangssignal der Antenne und der vorhandenen Feldstärke ist der bekannte Antennenfaktor, welcher bei jeder Frequenz und Orientierung unterschiedliche Werte aufweisen kann. Diese Art von Messgeräten offerieren hohe Empfindlichkeit und Selektivität. Jedoch sind die meisten Ausführungen dieser Gattung nicht tragbar und müssen bei Änderung der Umgebung, der Orientierung oder des Messaufbaus jedesmal neu geeicht werden. Eine lageunabhängige, das heisst eine sogenannte isotrope Messung, wird so verunmöglicht. Bei den Antennen handelt es sich meistens um Dipole oder Monopolantennen, die in Resonanz betrieben werden und deshalb oft die Dimension von einem Viertel der zu messenden Wellenlänge erhalten. Es existieren auch teleskopartige Antennen, die mit Hilfe einer elektronischen Regelung ihre Länge verändern können und so sich in einem grösseren Frequenzbereich anpassen können. Die bekannten Yagi-Antennen setzen sich aus metallischen Stäben unterschiedlicher Länge zusammen und erreichen so eine gute Richtwirkung und einen verbreiterten Frequenzbereich.

Breitbandige Feldstärkemessung: Breitbandantennen gehören zur Gruppe der elektrisch kurzen Antennen. Die Resonanzfrequenz dieser Antennen liegt um ein Vielfaches höher als der zu messende Frequenzbereich. Da hier eine Resonanz absichtlich vermieden wird, sind die gelieferten Signale sehr klein. Die untere Messgrenze für solche kurze Antennen liegt deshalb bei einem Volt pro Meter. Ein grosser Vorteil dieser Antennen ist der über einen grossen Frequenzbereich lineare Amplitudengang. So wird es möglich, mit kleinem Aufwand frequenzunabhängig zu messen. Falls keine höheren Empfindlichkeiten gefordert werden, können rein passive Detektoren zum Einsatz kommen. Solche Sonden können deshalb äusserst kompakt aufgebaut werden.

Experimentelle Sensoren im Frequenzbereich von 100 kHz bis 18 GHz wurden bereits realisiert: man setzte zum Beispiel Flüssigkristalle ein, die je nach anliegendem Feld ihre Farbe ändern. Auch verlustreiche Dielektrika, die ihren ohmschen Widerstand im elektrischen Feld verändern, wurden getestet. Als Indikatoren wurden auch Miniatur-Neonröhren als Last für einen elektrisch kleinen Dipol verwendet. Doch all diese eben erwähnten Sensoren sind so unempfindlich und unstabil, dass man sie kaum für seriöse Messungen einsetzen kann.

Ein kürzlich für die schweizerische PTT (Bereich Forschung und Entwicklung in Bern) bei EMC Baden AG entwickeltes, isotropes Feldstärke-

messgerät (Bild 10) ermöglicht es zum ersten Mal, gleichzeitig und lageunabhängig die elektrische und magnetische Feldstärke in allen Richtungen (alle Komponenten E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z) zu erfassen. Im Fernfeld gilt bekanntlich $E/H = 377\ \Omega$, und hier würde es genügen, E zu messen und H zu berechnen. Im Nahfeld von Sendeantennen für Lang-, Mittel- und Kurzwellen dagegen ist es besonders wichtig, E und H separat zu messen, da hier das Verhältnis der Wellenimpedanz nicht mehr konstant ist. Der Messbereich des Feldstärkemessgerätes wurde so festgelegt, dass alle gängigen Grenzwerte für elektromagnetische Strahlung (Bilder 5 und 6) in einem Frequenzbereich von 75 kHz bis 30 MHz abgedeckt werden können. Die ganze Elektronik für die Messwertverarbeitung ist in einer Kugel mit 15 cm Durchmesser untergebracht, welche gleichzeitig den Sensorkörper darstellt. Die drei Sensoren auf der Kugeloberfläche erfassen je für eine Achse x, y und z die elektrische und die magnetische Feldstärke. Die Messdaten werden via Fiberglaskabel einem Laptop Computer geliefert. Mit dem Einsatz einer Glasfaserverbindung erreicht man ideale Isotropie und Isolation des Sensorkörpers und optimalen Personenschutz bei sehr hohen Feldstärken.

Feldstärkemessung bei Radarfrequenzen: Heute existieren aber auch schon experimentelle Sensoren, die bis zu Frequenzen von 40 GHz vorstossen. Dabei handelt es sich um spezielle, verlustbehaftete Dipole. Zu ihrer Herstellung wurden auf einem Glassubstrat Metallegierungen mit unterschiedlicher spezifischer Leitfähigkeit aufgedampft (Bild 11). Als geeignetes Material hat sich Nichrome, eine Legierung aus 70% Nickel, 15% Chrom, 10% Eisen und 2% Titan, bewährt. Der hohe Widerstand und der kleine Temperaturkoeffizient sind die besonderen Eigenschaften, die für den Sensor wichtig sind. Um die Stromverteilung auf dem Dipol möglichst gleichmässig zu halten, produziert man an den Dipolenden mittels einer sehr dünnen Metallschicht einen sehr hohen Widerstand (> 1 MΩ). In der Mitte ist die Schicht am dicksten und hat einen Widerstand von 5 kΩ/m. Damit erhält man einen Dipol, der über einen grossen Frequenzbereich einen linearen Amplituden- und Phasengang besitzt. Ein passiver Dioden-Detektor liefert eine Gleichspannung, die dann über eine sehr hochohmige Nichrome-Leitung zu einem entfernten Voltmeter führt. Die schlechte Leitfähigkeit der Ableitung verhindert eine zu starke Beeinflussung des Feldes, und man kann auf eine optische Übertragung verzichten. Es muss darauf geachtet werden, dass die drei Dipole sowohl orthogonal zueinander liegen, als auch alle den selben Winkel zu ihrer Gleichspannungsableitung haben. Dies wird erreicht, indem die Dipole in die Raumdiagonalen eines virtuellen Würfels plaziert werden und die Gleichspannungsableitung parallel zu einer Würfelkante weggeführt (54,3° zu Dipol) wird.

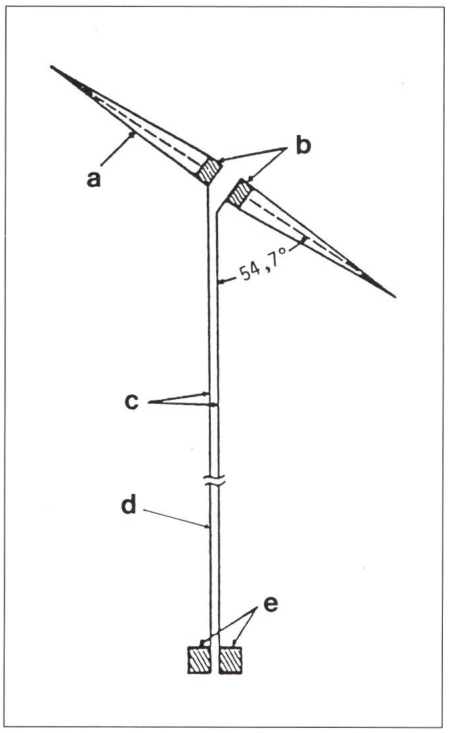

Bild 11 Experimenteller Feldstärkesensor
Auf einem Glassubstrat aufgedampfte Metallegierung sorgt für konstante Stromverteilung im Dipol. Mit dem Sensor erreicht man Bandbreiten bis zu 40 GHz

a aufgedampfte Widerstandslegierung aus Nichrome
b Diodenkontakte (Gold-Bonding)
c hochohmige Nichrome-Zuleitung
d Quarz-Substrat
e Ausgangskontakte (Gold-Bonding)

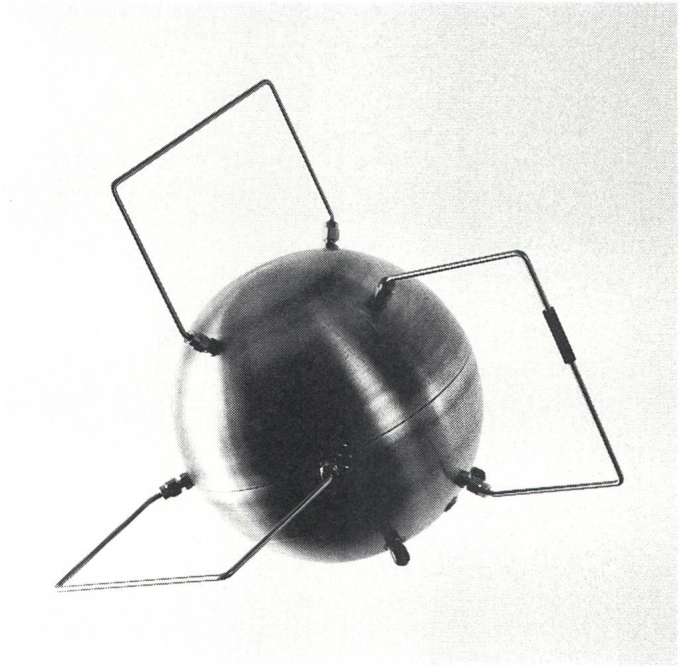

Bild 10 Feldstärkemessgerät
Computergesteuertes Feldstärkemessgerät für die gleichzeitige Erfassung des elektrischen und magnetischen Feldes für den gesamten Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich (75 kHz bis 30 MHz). Durchmesser der Kugel 15 cm

Literatur

[1] Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. Hg. H. Meinke und F. W. Gundlach. Springer Verlag, Berlin, 1968.