**Zeitschrift:** Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

**Herausgeber:** Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe

**Band:** 71 (1993)

**Heft:** 8

**Artikel:** Neuartiger Breitbandsensor zur Messung elektromagnetischer Felder für Anwendungen zum Personenschutz

**Autor:** Furrer, Jürg / Gassmann, Felix

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-875519

**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**

# Neuartiger Breitbandsensor zur Messung elektromagnetischer Felder für Anwendungen zum Personenschutz

Jürg FURRER, Bern, und Felix GASSMANN, Baden-Dättwil

## 1 Einleitung

Die Telecom PTT ist Betreiber zahlreicher zum Teil leistungsstarker Rundfunksender. Neben der gewünschten Versorgung können die erzeugten elektromagnetischen Feldstärken (EM-Felder) in der Umgebung der Sendeanlagen so gross werden, dass Personenschutzmassnahmen zur Einhaltung der gegebenen Grenzwerte erforderlich sind. Die Erfassung des Ist-Zustandes, d. h. die Messung der tatsächlichen elektromagnetischen Feldstärken, ist für den Senderbetreiber deshalb unumgänglich und muss zudem auf einfache Art durchführbar sein.

## 2 Problematik der Mittel- und Kurzwellensendeanlagen

Im Gegensatz zum Frequenzbereich oberhalb 30 MHz bildet im Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich (LMK-Bereich) der Boden mit seiner endlichen Leitfähigkeit einen wesentlichen Bestandteil der Sendeantennen. Dies hat zur Folge, dass die erzeugten Feldstärken in Bodennähe hohe Werte annehmen können. Zudem müssen für die Versorgung in diesem Bereich Senderleistungen bis 600 kW eingesetzt werden können.

Dagegen sind bei VHF/UHF-Antennen durch ihre wesentlich kleineren Abmessungen stärker gebündelte Strahlungsdiagramme erreichbar; zudem führt die in der Regel gewählte möglichst hohe Montagelage am Antennenstandort zu einem wesentlich geringeren Gefährdungspotential.

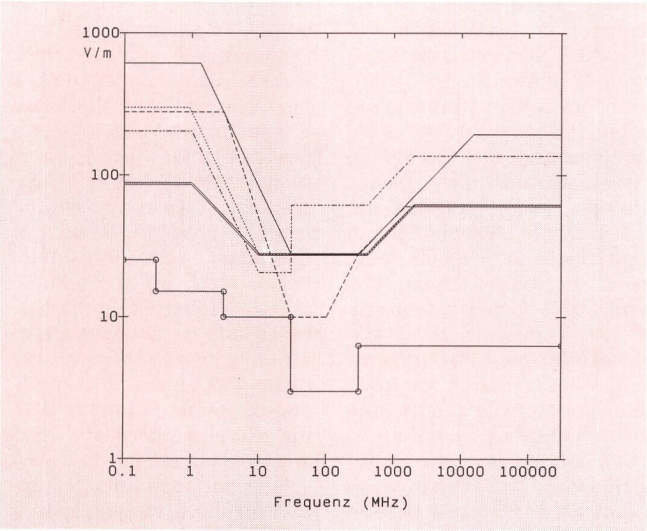


*Fig. 1* *Immissionsgrenzwerte verschiedener internationaler Organisationen*
Elektrische Feldstärke (Effektivwert) für Ganzkörperexposition nach [1]

- IRPA [4], 1988
- UdSSR [5], 1984
- Kanada [6], 1987
- ANSI [7], 1990
- VDE [8], 1991
- NRPB [9], 1989

## 3 Grenzwerte und deren Auswirkungen auf die Messtechnik

In der Schweiz sind seit 1990 die Immissionsgrenzwerte für elektromagnetische Felder gemäss den Empfehlungen des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (Buwal) gültig [1]. Diese Grenzwerte, die den Status einer Empfehlung haben, aber bereits durch ein Bundesgerichtsurteil geschützt werden, folgen den Richtlinien der *Internationalen Strahlenschutzvereinigung* (International Radiation Protection Association IRPA). In den *Figuren 1* und *2* sind die Grenzwerte, zusammen mit andern nationalen Normen, vergleichend dargestellt. Auffallend sind die grossen nationalen Unterschiede, die für Frequenzen unterhalb 30 MHz zum Teil den Faktor 100 erreichen! In zahlreichen Normierungsgremien stehen deshalb heute die Grenzwerte für Personenschutz in Diskussion, und eine Tendenz zu deren Verschärfung ist klar erkennbar.

Die Buwal-Empfehlungen [1, 2] zeigen ferner, dass es im Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich unumgänglich ist, sowohl den elektrischen (E-Feld) als auch den magnetischen (H-Feld) Anteil des elektromagnetischen Feldes getrennt zu bestimmen. Einerseits ist der hohe Feldstärken aufweisende und damit kritische Nahfeldbereich bei tiefen Frequenzen örtlich weit ausgedehnt, und anderseits besteht im Nahfeld zwischen dem E- und dem H-Feld kein fester Bezug wie im Fernfeld. Es genügt also nicht, beispielsweise nur die elektrische Feldstärke zu messen und daraus über die Freiraumimpedanz (377 Ω) die magnetische Feldstärke zu berechnen. Die Messgenauigkeit spielt dabei eine entscheidende Rolle, denn Schutzmassnahmen müssen allfällige Messunsicherheiten einschliessen!

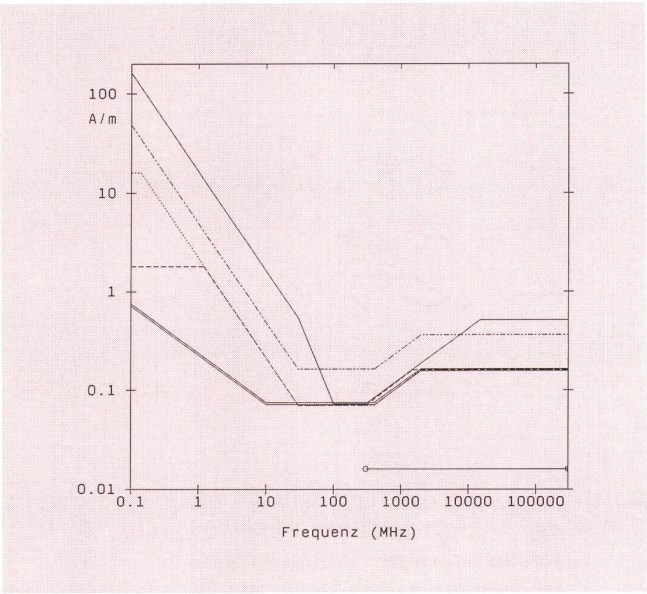


*Fig. 2 Immissionsgrenzwerte verschiedener internationaler Organisationen*
Magnetische Feldstärke (Effektivwert) für Ganzkörperexposition nach [1]

- IRPA [4], 1988
- UdSSR [5], 1984
- Kanada [6], 1987
- ANSI [7], 1990
- VDE [8], 1991
- NRPB [9], 1989

## 4 Bestehende Messgeräte

Messgeräte, die für den Einsatz im Bereiche des Personenschutzes geeignet sein sollen, müssen demnach eine Reihe ganz spezifischer Eigenschaften erfüllen. Eine Marktübersicht zeigte, dass ein Sensor, der den heutigen Ansprüchen gerecht werden soll, nicht erhältlich war. Zwar gibt es Geräte passiver Bauart, doch liegen deren Empfindlichkeiten zu tief, da sie für weniger strenge Normen ausgelegt sind [3]. Eigene Erfahrungen und viele Publikationen belegen, dass eine ganze Anzahl kommerzieller Geräte mit unzulässigen Fehlern behaftet ist [4, 5]. Sie weisen z. B. typische Unzulänglichkeiten auf wie mangelhafte Richtungsunabhängigkeit (anisotrope Charakteristik), fehlende Messmöglichkeit des H-Feldes, gegenseitige Beeinflussung der Ergebnisse durch die Komponenten des E- oder H-Feldes, ungenügende Empfindlichkeit und Genauigkeit. Aus diesem Grunde vergab die Telecom PTT 1990 einen Forschungsauftrag an die Firma *EMC-Baden AG* (vormals *ABB Forschung, Abteilung CRBE 4)* mit dem Ziel, ein allen Ansprüchen genügendes Messinstrument für Personenschutz im Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich zu entwickeln.

## 5 Gleichzeitiges Messen des E- und des H-Feldes

Diese hier erstmalig verwirklichte Möglichkeit der gleichzeitigen Erfassung des E- und des H-Feldes mit ein und demselben Sensor bildet den Schlüssel zur Entwicklung des Gerätes.

### 51 Theorie

Schon 1969 erwähnte *R. W. King* in [6] die Möglichkeit, mit einem einzigen Sensor das elektrische und magnetische Feld gleichzeitig zu erfassen und separat anzuzeigen. Das Prinzip besteht aus einer einfachen, symmetrisch belasteten Schleifenantenne [6, 7].

Die benötigte Abschirmung der üblichen, einfach belasteten oder offenen Schleifen ist ein grosser Nachteil [6, 8, 9]. Trotz aufwendigen mechanischen Konstruktionen sind Abschirmungen nie ideal und verursachen zusätzliche Resonanzen.

Die Tatsache, dass einfache Schleifen sowohl magnetische Felder als auch die «störenden» elektrischen Felder anzeigen [6, 9] führt zum Prinzip des Sensors: Wenn es gelingt, den elektrischen vom magnetischen Einfluss vollständig und definiert zu trennen und zu quantifizieren, wird es möglich, mit drei orthogonalen Drahtschleifen eine vollständige Charakterisierung des elektromagnetischen Feldes zu gewinnen. *Figur 3* zeigt eine solche Schleife im transversalen elektromagnetischen Feld. Dem durch den H-Vektor induzierten Kreisstrom wird eine störende, durch das E-Feld verursachte Spannung überlagert (Dipolmodus der Schleifenantenne).

Bei dieser Konfiguration ist es jedoch unmöglich, beide Komponenten voneinander zu trennen. Mathematisch gesehen handelt es sich um eine Gleichung mit zwei Unbekannten. Also muss eine weitere Beziehung gewonnen werden. Technisch gesehen heisst das, dass man die Schleife an einer zweiten Stelle auftrennen muss, um diese weitere Gleichung zu gewinnen. Dies würde aber die Zerstörung der Schleife bedeuten. Als Kompromiss kann man die Magnetschleife anstelle einer vollständigen Trennung an zwei Stellen mit einer Last versehen.

Damit bleiben die Eigenschaften einer geschlossenen Schleife bestehen. *Figur 4* zeigt eine solche Anordnung einer doppelt belasteten Schleife. Sind die Lasten symmetrisch angebracht, bilden sich auf der einen Seite die Summe und auf der anderen die Differenz der Einflüsse von E- und H-Feld. Damit hat man zwei vollständig lösbare Beziehungen gewonnen. Eine Addition und eine

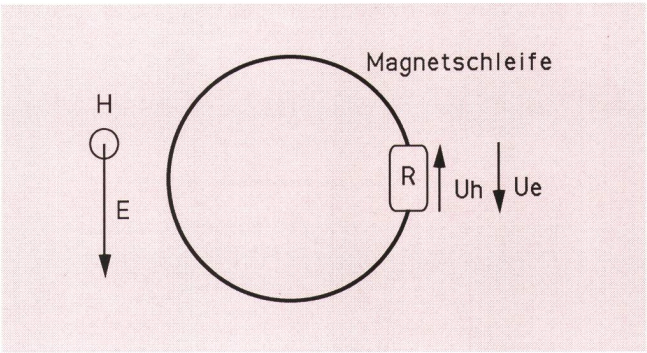


*Fig. 3 Nicht abgeschirmte Magnetschleifen messen zusätzlich eine störende E-Feldkomponente des elektrischen Feldes Ue*
E Elektrisches Feld
H Magnetisches Feld
Ue Durch elektrisches Feld erzeugte Spannung
Uh Durch magnetisches Feld erzeugte Spannung

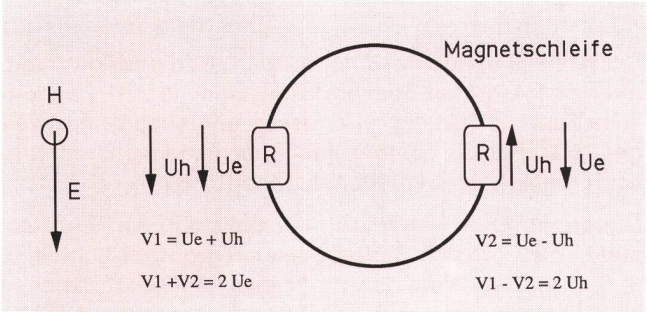


*Fig. 4 Eine symmetrisch belastete Magnetschleife zeigt Summe und Differenz des elektrischen und des magnetischen Feldes an*
R Lastwiderstand
$V_1$, $V_2$ Spannungen in den Lastwiderständen

Subtraktion genügen, um beide Komponenten zu trennen.

Diese einfache Betrachtung ist aber keineswegs vollständig und hat ihre Gültigkeit nur im idealen transversalen Feld. Um die Anwendbarkeit des Prinzips für alle auftretenden Fälle, besonders bei Nahfeldbedingungen, zu beweisen, müssen die Sensorspannungen auf eine viel allgemeinere Art berechnet werden: eine beliebig polarisierte Welle soll aus beliebiger Richtung auf den Sensor treffen. Eine Behandlung der dabei auftretenden Integralgleichungen würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen. Eine geschlossene Berechnung findet sich in [6, 7, 10]. Sobald aber, wie es in Wirklichkeit der Fall ist, zusätzlich der Bodeneinfluss oder unterschiedliche Schleifenformen mitberücksichtigt werden müssen, ändern sich die Verhältnisse derart, dass von einer geschlossenen Berechnung gänzlich abzusehen ist.

Viel bequemer eignet sich für diesen Zweck eine numerische Methode. Die Momentenmethode [11] ist ein modernes Verfahren zur numerischen Lösung von Integralgleichungen und wird oft für die Berechnung elektromagnetischer Felder verwendet.

Die Simulation verlangt, dass leitende Gegenstände im Feld durch Stabstrukturen nachgebildet werden. Für eine kreisförmige Schleife wäre dies sehr aufwendig. Deshalb beschränkt man sich vorerst auf eine quadratische Form von 10 cm Kantenlänge, bestehend aus vier

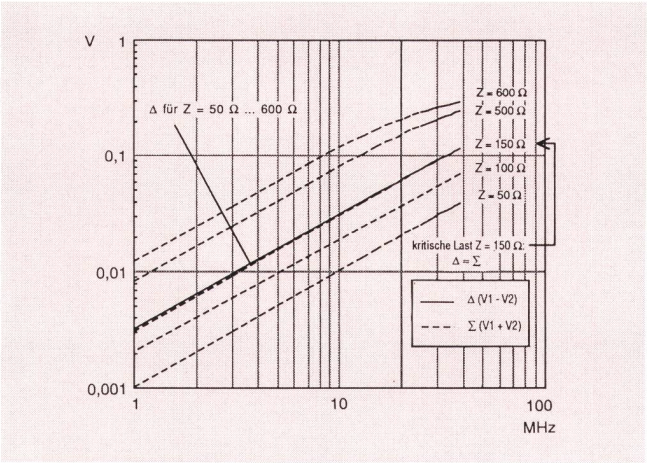


*Fig. 6 Steuerung des Dipolmodes Σ durch Veränderung der symmetrischen Schleifenlasten Z (einschliesslich 7 pF Streukapazität)*
Die Differenz Δ bleibt bei Laständerungen konstant. Bei Z = 150 Ω sind die Anteile des elektrischen (Σ) und des magnetischen (Δ) Feldes etwa gleich

1 mm dicken, ideal leitenden Stäben *(Fig. 5)*. Die Lasten Z sollen in der Simulation verändert werden. In einer Nachweismessung wurden aber 50-Ω-Widerstände eingesetzt, um gängige Hochfrequenzmessgeräte verwenden zu können. Mit der Erhöhung der Lastwiderstände Z nimmt der Dipolmodus (dem E-Feld proportionales Signal) überhand, während die durch das H-Feld induzierten Kreisströme etwa konstant bleiben *(Fig. 6)*. Daraus lässt sich schliessen, dass es eine kritische Last gibt, bei der die Summe und die Differenz der Spannungen $V_1$ und $V_2$ etwa gleiche Pegel haben. Eine weitere Berechnung hat gezeigt, dass die kritische Last von den Dimensionen der Schleife abhängt und im linearen Frequenzbereich konstant bleibt [7]. Damit lässt sich also die elektrische Signalantwort des Sensors durch die Einstellung der Last und die magnetische Signalantwort durch die Dimension der Schleife steuern.

## 52 Experimentelle Überprüfung

Ein erster Prototyp wurde in einer abgeschirmten Testkammer (GTEM-Zelle, GHz-Testzelle im TEM-Modus) ge-

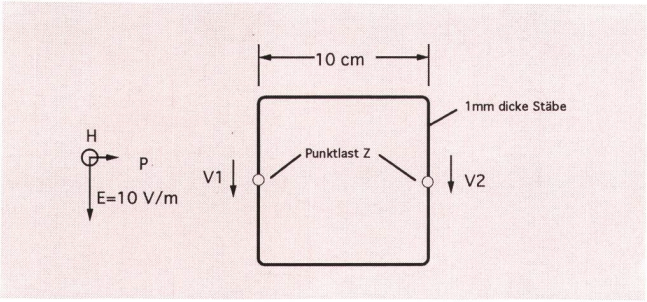


*Fig. 5 Modell für die numerische Simulation: Vier ideal leitende Stäbe bilden eine Schleife*
Berechnet werden die Spannungen $V_1$ und $V_2$ über den punktförmigen und symmetrisch angeordneten Widerständen Z. Das elektrische Feld verläuft parallel zu den Stäben, während das magnetische Feld in die Zeichenebene hineinzeigt

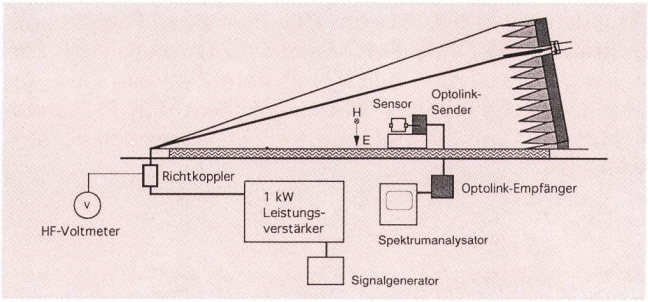


*Fig. 7 Messaufbau in der GTEM-Zelle*
Die Spannung über einem der beiden Sensorwiderstände wird mit Glasfasern (0 bis 100 MHz) zum Spektrumanalysator übertragen
Optolink Glasfaserübertragung
HF Hochfrequenz

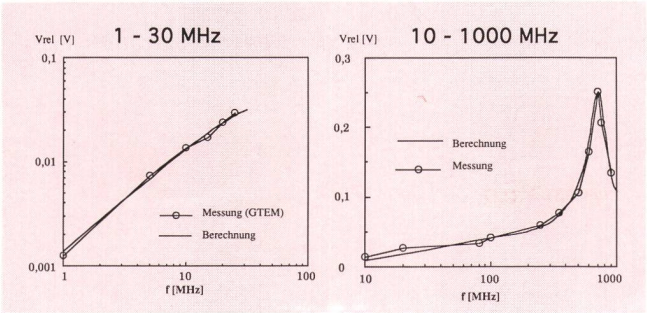


*Fig. 8 Vergleich zwischen Messung und Berechnung für zwei Frequenzbereiche: 1 bis 30 MHz und 10 bis 1000 MHz*
Die Schleifenlasten betragen 50 Ω

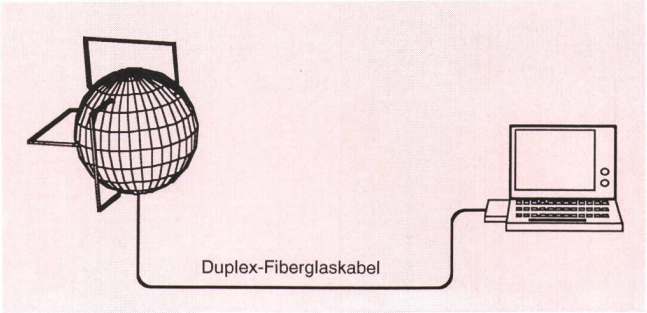


*Fig. 10 Die Kugel als Sensorträger und Elektronikgehäuse*
Die Krümmung der Erdungsfläche hat qualitativ keinen Einfluss. Im Vergleich zu einer idealen Erdungsfläche werden die Sensorspannungen kleiner, bleiben aber über den Nutzfrequenzbereich linear. Der Kugeldurchmesser beträgt 15 cm, die Sensorfläche 7,5 × 10 cm

mäss *Figur 7* aufgebaut [12]. Allerdings war es nicht möglich, beide Spannungen gleichzeitig zu messen, da eine Anordnung mit zwei Sensorabgriffen eine zusätzliche geschlossene Schleife im Feld bildet und damit die Messung empfindlich stört. Diese Tatsache stellt vorerst ein Hindernis für den Bau eines solchen Sensorsystems dar.

Wie Figur 7 zeigt, werden der Sensor und der Sendeteil einer faseroptischen Übertragung auf einer Höhe von 30 cm über dem Zellenboden auf einem Styropor-Schaumstoffklotz aufgebaut. Der Sensor steht parallel zur Ausbreitungsrichtung des Feldes und soll deshalb den vollen Betrag von E- und H-Feld anzeigen. Eine Messung bis in den Resonanzbereich des 10-cm-Sensors zeigte tadellose Übereinstimmung von Theorie und Praxis *(Fig. 8)*. Für die numerische Berechnung wurde Freiraumausbreitung angenommen. Die gute Übereinstimmung hat gezeigt, dass die GTEM-Zelle durchaus Freiraumbedingungen simulieren kann.

## 6 Isotropes Sensorsystem

Für ein dreidimensionales, isotropes Sensorsystem scheint eine symmetrisch belastete Schleife vorerst gänzlich ungeeignet. Ein Abgriff beider Lastspannungen mit Koaxialkabeln würde über den Kabelschirm eine weitere Schleife im Feld bilden und dadurch die Messung empfindlich verfälschen. Die entscheidende Idee ist die Reduktion der Sensorstruktur von einer *Dipol-* zu einer *Monopolanordnung (Fig. 9)*. Die Monopolstruktur konnte erfolgreich in der GTEM-Zelle getestet werden. Auch die numerische Simulation bestätigte die Anwendbarkeit dieses Prinzips. Ein praktischer Sensorträger wäre z. B. ein Würfelgehäuse. Aus der Radartechnik [13] ist aber bekannt, dass Körper mit Ecken starke und unregelmässig im Raum verteilte Reflexionen verursachen. Die Kugel ist dagegen der ideale, isotrop reflektierende Körper *(Fig. 10)*. Sind die Sensoren für alle Achsen x, y, z genau orthogonal angebracht, können gegenseitige Verkopplungen vernachlässigt werden. Im Inneren der Kugel muss aber auf eine gute Abschirmung der Sensorspannungen geachtet werden.

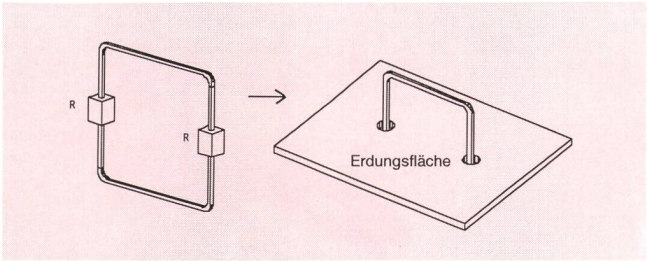


*Fig. 9 Die Monopolstruktur bietet zwei Vorteile: die Sensorspannungen können unter der Erdungsfläche (Groundplane) abgegriffen werden, und das Gehäuse der Messelektronik und des Sensors bilden eine Einheit*

## 7 Aufbau der Elektronik

Die gewünschte Messgenauigkeit von ±1 dB erfordert einen grossen Aufwand für die Messelektronik: Es müssen sechs Signale mit grosser Dynamik (52 dB induktiver Pegelanstieg von 75 kHz bis 30 MHz und 42 dB Messbereich von 10 bis 1200 V/m) und einer Bandbreite von drei Zehnerpotenzen gemessen werden. Der kleinste Signalpegel liegt bei etwa 50 µV (75 kHz) und muss daher, um einen Detektor anzusprechen, aktiv verstärkt werden. Ausserdem soll der gesamte Stromverbrauch möglichst niedrig sein, um einen Einsatz von mindestens acht Stunden mit dem verfügbaren Akkumulator zu gewährleisten. In *Figur 11* ist ein Blockschema der Elektronik dargestellt. Die drei Sensoren liefern sechs Signale an einen HF-Multiplexer, der auf Befehl auch die vektorielle Summenbildung besorgt. Eine sehr genaue Frequenzkompensation (0,1 dB) und HF-Verstärker mit regelbarer Verstärkung (1, 10, 100) liefern dem Detektor einen ausreichenden Signalpegel. Der Detektor ist für tiefe Modulationsfrequenzen bis zu 50 Hz ausgelegt. Die Gleichspannung wird mit einem AD-Wandler digitalisiert. Ein Wandler-IC (UART, Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) wandelt die digitalen Daten in ein serielles, RS232-kompatibles Signal um, das mit einer optischen Verbindung direkt an einen IBM-kompatiblen PC (Laptop) übertragen und dort verarbeitet werden kann.

Auch Temperatur und Batteriespannung werden bei jedem Zyklus einmal gemessen. Das Rechnerprogramm linearisiert die Detektorkennlinie und kompensiert die

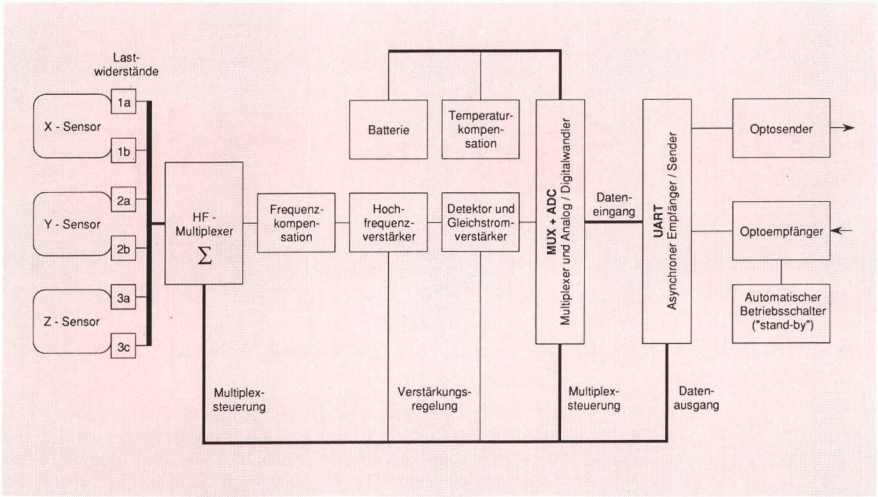


*Fig. 11 Blockschema der Sensorelektronik*

Auswirkung der Temperaturänderungen. Alle Funktionen des Sensors sind direkt vom Computer gesteuert. Da die sechs Signale sequentiell verarbeitet werden und zudem die Amplitude der zu messenden Feldstärken moduliert sein kann, wird jedes Signal mehrere Male gemessen und gemittelt. Dies ist vor allem wichtig, wenn ein amplitudenmodulierter Rundfunksender mit dynamischer Trägersteuerung (DCC) ausgerüstet ist. Je nach Bedarf kann die Messzeit (Zahl der Messungen) programmiert werden. Der Computer zeigt die Effektivwerte der Feldstärkekomponenten des E- und des H-Feldes für alle drei Achsen x, y, z und berechnet die Ersatzfeldstärken $E_{tot}$ ($E_{tot} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$) und $H_{tot}$ gemäss den Personenschutznormen [1]. Mehrere gleichzeitig vorhandene Frequenzkomponenten werden ebenfalls mit ihrem Effektivwert addiert.

Die Sensorelektronik schaltet sich beim Empfang optischer Steuersignale selbst ein. Sobald keine Kommandos mehr vom Rechner empfangen werden, schaltet sich das Gerät nach etwa zwei Sekunden selbständig aus. Die Betriebszeit des Sensors kann damit je nach Gebrauch bis auf mehrere Wochen gesteigert werden.

Die Messdaten werden automatisch in tabellarischer Form gespeichert und können beliebig mit Messkommentar ergänzt werden. Mit einem handelsüblichen Tabellenkalkulations- oder Graphikprogramm kann die so angelegte Datei bei Bedarf direkt weiterverarbeitet werden.

## 8 Kalibration, technische Daten

Die Anzeige der magnetischen Feldstärke wurde mit einer *Helmholtz*-Spule (1 m × 1 m) geeicht und mit dem Kalibrierfeld des IRT (Institut für Rundfunktechnik, München) verglichen. Der Absolutwert der elektrischen Feldstärke wurde in einer GTEM-Zelle kalibriert.

Zusätzlich wurde im Januar 1993 ein Instrument in der nationalen Eichstelle der USA, NIST (National Institute of Standards and Technology, früher NBS), in einer aufwendigen Messreihe zertifiziert. Das Institut kann definierte Feldstärken mit einer Absolutgenauigkeit von ±1 dB erzeugen. Die vom Sensor angezeigten Werte waren in jedem Fall innerhalb dieser Toleranz. Im geforderten Frequenzbereich (75 kHz bis 30 MHz) und Temperaturbereich (0 bis 50 °C) erfüllt der Sensor die Fehlergrenzen von ±1 dB. Die Isotropie wird mit ebenfalls ±1 dB spezifiziert, sie liegt jedoch oft innerhalb ±0,5 dB. Der Messbereich erstreckt sich von 6 V/m bis 1500 V/m (E-Feld), beziehungsweise von 30 mA/m bis 4 A/m (H-Feld).

## 9 Praktische Aspekte

Feldstärkemessungen müssen in der Praxis oft unter ungünstigen, stark von Laborverhältnissen abweichenden Bedingungen durchgeführt werden, so dass der praktischen Handhabung eine wesentliche Bedeutung zukommt. Bei der Auswahl des Steuerrechners spielten deshalb Eigenschaften wie Feldtauglichkeit (gute Anzeige, Temperaturbereich, Widerstandsfähigkeit gegen Feuchtigkeit, Schmutz und Schläge), eine lange Batteriestandzeit sowie ein hervorragendes EMV-Verhalten eine entscheidende Rolle. *Figur 12* zeigt das Gerät im Einsatz. Viele Praxiseinsätze bewiesen, dass Messungen

*Fig. 12 Sensor und Rechner im Feldeinsatz*

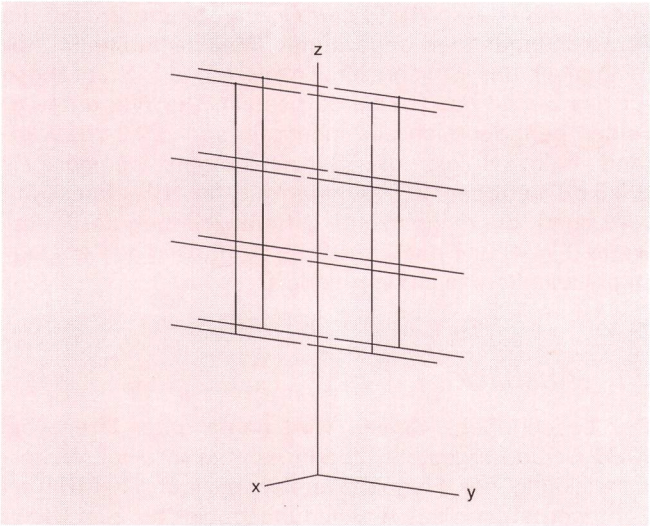


*Fig. 13 Perspektivisch dargestelltes Stabmodell der analysierten Vorhangantenne, Typ HR 4/4/0,8, bestehend aus 32 horizontalen λ/2-Dipolelementen (16 Strahler, 16 Reflektoren) und den zugehörigen, jeweils gekreuzten Speiseleitungen. Die untersten Elemente befinden sich 0,8 λ über dem Boden*

auch unter extremen Verhältnissen, bei denen beispielsweise der Rechner sehr hohen Feldstärken (500 V/m, 1 A/m) ausgesetzt ist, problemlos möglich sind.

## 10 Durchgeführte Messungen und Berechnungen, Vergleiche

Bei den durchgeführten Kalibrationen des Sensors gilt es zu bedenken, dass die Testbedingungen im Labor durchwegs Spezialfälle darstellen: In der GTEM-Zelle herrschen Fernfeldbedingungen (E/H = 377 Ω), und die Helmholtz-Spule erzeugt im wesentlichen ein reines Magnetfeld. Aus diesem Grunde ist es wichtig, auch über Messungen aus der Praxis auf die erreichbare

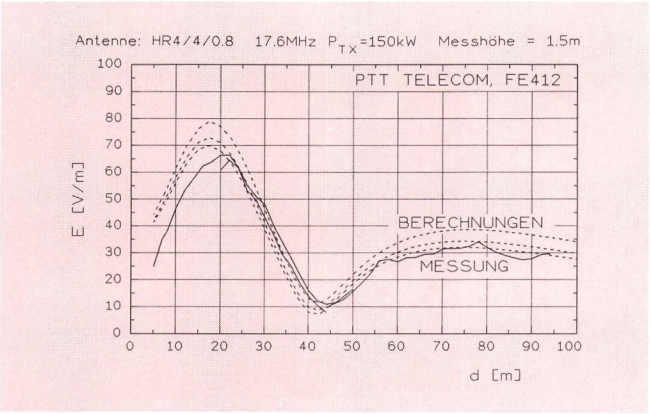


*Fig. 14 Elektrische Feldstärke in Funktion der Distanz zum Antennenzentrum*
Vergleich der gemessenen und berechneten Feldstärken im Nahfeldbereich (5 bis 100 m) der Vorhangantenne HR 4/4/0,8. Die angenommene Bodenleitfähigkeit liegt im Bereich von $\sigma$ = 0,1 bis 1 mS, $\varepsilon_r$ = 5...20 (punktierte Linien)
Messhöhe 1,5 m

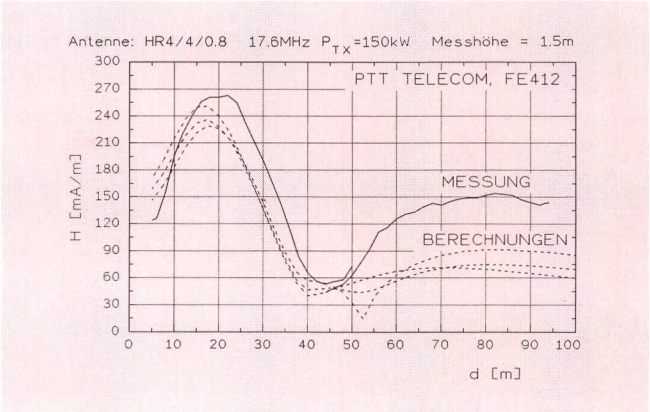


*Fig. 15 Magnetische Feldstärke in Funktion des Abstands d zum Antennenzentrum*
Messhöhe 1,5 m

Messgenauigkeit des Sensors schliessen zu können. Zu diesem Zwecke erfolgten umfangreiche Messungen in der Umgebung von bekannten Mittel- und Kurzwellenantennen. Zugleich wurden die elektromagnetischen Felder im Nahfeldbereich dieser Antennen mit dem Simulationsprogramm INAC-3, das die Momentenmethode [8] anwendet, berechnet, und zwar unter Einbezug der Bodenleitfähigkeit. *Figur 13* zeigt das dabei verwendete Modell einer Kurzwellen-Vorhangantenne. Ein Vergleich der berechneten und gemessenen Ergebnisse lässt gute Rückschlüsse auf die zu erwartende Messgenauigkeit zu. Dabei ist allerdings zu beachten, dass gewisse Vorgaben der Simulation nur mit beschränkten Genauigkeiten zur Verfügung stehen (z. B. Bodenparameter, Erdnetzdetails) und dass der Boden mit seinen Ersatzparametern als homogen und eben angenommen wird.

Die Ergebnisse einer Vorhangantenne vom Typ HR 4/4/0,8 sind jeweils als vergleichbare Feldstärkeprofile in der Hauptstrahlrichtung aus den *Figuren 14* bis *17* ersichtlich; die Testpunkte befinden sich in einer Höhe von 1,5 und 4,5 Metern über dem Erdboden. Die berechneten Kurvenscharen beziehen sich auf verschiedene Annahmen der Bodenleitfähigkeit ($\sigma$ = 0,1 bis 1 mS, $\varepsilon_r$ = 5 bis 20). Zu beachten sind ferner die unterschiedlichen Feld-

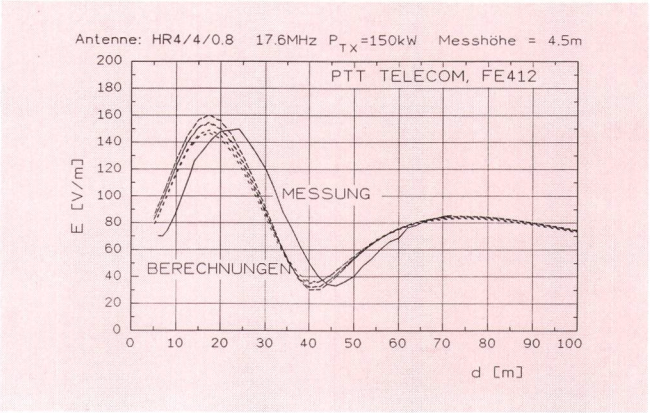


*Fig. 16 Elektrische Feldstärke in Funktion des Abstands d zum Antennenzentrum*
Messhöhe 4,5 m

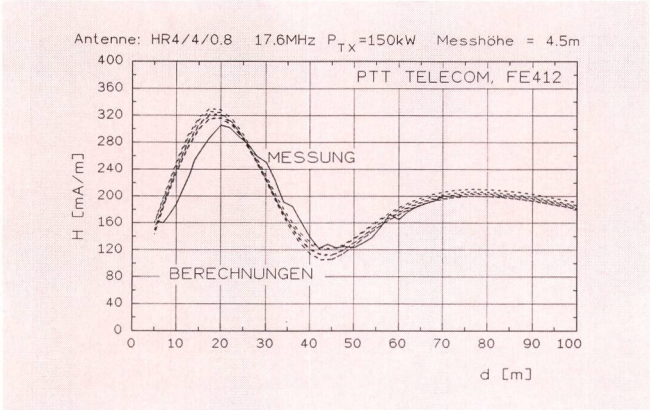


*Fig. 17 Magnetische Feldstärke in Funktion des Abstands d zum Antennenzentrum*
Messhöhe 4,5 m

stärke-Absolutwerte für die beiden Mess- bzw. Testhöhen.

Die erreichte Übereinstimmung zwischen den Messungen und Berechnungen zeigt sowohl die hohe Präzision des Sensors als auch die gute Brauchbarkeit der Rechenergebnisse. Die *Figuren 18* und *19* zeigen die Feldstärkeprofile eines vertikalen Mittelwellenstrahlers. Als Bodenleitfähigkeit wurde hier ein Bereich von $\sigma = 0{,}1$ bis 10 mS und $\varepsilon_r = 2$ bis 20 angenommen. Die hier teilweise ersichtlichen Abweichungen sind durch die unvollkommene Modellierung des Erdnetzes bedingt: Das gemessene H-Feld (Fig. 19) weist an gewissen Orten Überhöhungen auf, die aufgrund naher Erdnetzdrähte entstehen. Diese Erfahrung lehrt, dass trotz immer raffinierterer Simulationssoftware auch in Zukunft der messtechnische Nachweis immer wichtig sein wird!

Die gute Reproduzierbarkeit lässt sich weiter aus den Messergebnissen (Fig. 14, 15, 18 und 19) erkennen: Identische Messreihen wurden an unterschiedlichen Tagen aufgenommen und übereinander dargestellt.

Die Isotropie des Sensors, d. h. die Richtungsunabhängigkeit der Messergebnisse, wurde ebenfalls im Nahfeld der erwähnten Antennen, bei unterschiedlichen Feldimpedanzen, untersucht. In den *Figuren 20* und *21* sind die Abweichungen der angezeigten Messresultate in Abhängigkeit des Sensordrehwinkels um die Stativachse für das E- und das H-Feld dargestellt. Die Werte des E-Feldes befinden sich alle innerhalb von ±0,2 dB, während beim H-Feld die Schwankungen weniger als ±0,5 dB betragen; die Genauigkeit der H-Feldmessung wird durch die rechnerische Differenzbildung der Messwerte (Fig. 4) und durch die 8-Bit-Auflösung des Analog-Digitalwandlers leicht vermindert.

## 11 Ausblick

Der beschriebene Sensor wird heute unter Lizenz bei *MEB Berlin* hergestellt. Zudem konnte in einer Weiterentwicklung der Frequenzbereich bis auf 110 MHz erhöht werden, um das Anwendungsgebiet bis zum UKW-Rundfunkband zu erweitern. Entsprechende Geräte stehen heute ebenfalls zur Verfügung. Eine kürzlich in Auftrag gegebene Studie zeigt die mögliche Verwirklichung eines Feldstärkesensors für den Frequenzbereich bis 1 GHz, wonach das hier beschriebene Prinzip der gleichzeitigen E- und H-Felderfassung immer noch anwendbar wäre; die rein passive Signalverarbeitung im Sensor selbst würde dagegen auf optoelektronischer Basis funktionieren. Eine entsprechende Entwicklung ist bereits vorgesehen.

## Bibliographie


[1] Biologische Auswirkungen nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung auf den Menschen und seine Umwelt. BUWAL, Schriftenreihe Umweltschutz, Nr. 121, Bern, Juni 1992.

[2] Messung nichtionisierender EM-Strahlung. BUWAL, Schriftenreihe Umweltschutz, Nr. 164, Bern, Mai 1992.

[3] *Raufmann B.* Messsonden zur Beurteilung der Personengefährdung im Nahbereich von Hochleistungssendeanlagen des AM-Rundfunks. Technischer Bericht B 50/83, Institut für Rundfunktechnik, München, Juni 1983.


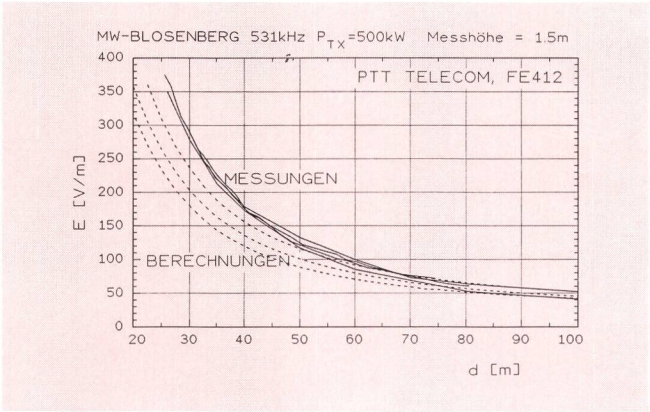


*Fig. 18 Elektrische Feldstärke in Funktion des Abstands d zum Antennenzentrum*
Mittelwellenantenne Blosenberg
Messhöhe 1,5 m

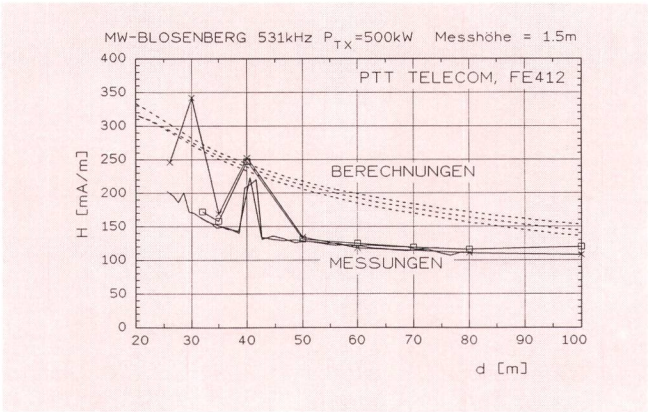


*Fig. 19 Magnetische Feldstärke in Funktion des Abstands d zum Antennenzentrum*
Mittelwellenantenne Blosenberg
Messhöhe 1,5 m

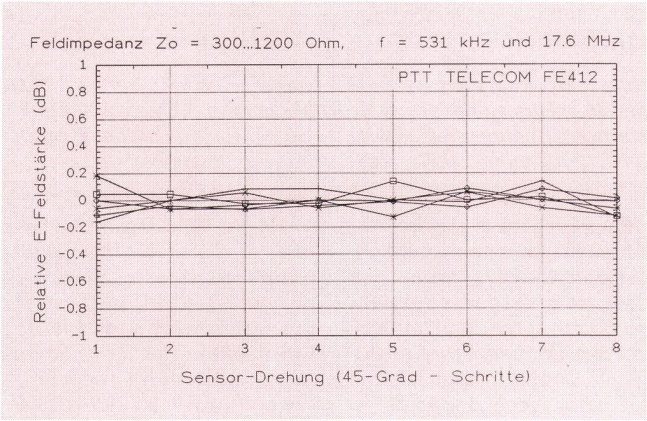


*Fig. 20 Isotropie des Sensors, elektrisches Feld*

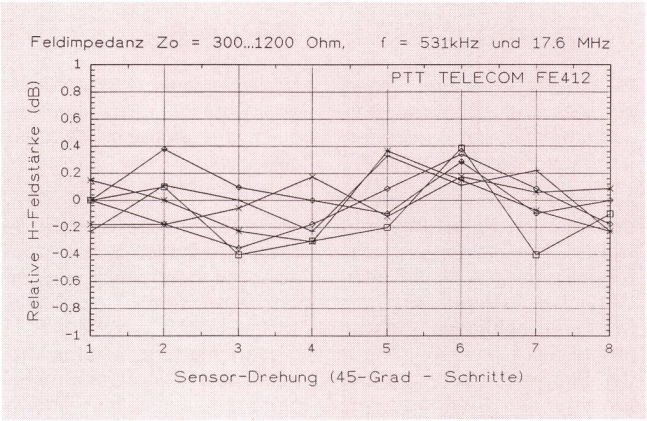


*Fig. 21 Isotropie des Sensors, magnetisches Feld*


[4] *Bossert T.* und *Dinter H.* Beurteilung der Gefährlichkeit starker elektromagnetischer Felder: Kalibrierung und Messgenauigkeit von Nahfeldsonden im Bereich 30 kHz – 30 MHz. ITG-Fachtagung Hörrundfunk, November 1988, Mainz. VDE-Verlag, Berlin.

[5] *Glimm J.* und *Münter K.* Feldmesssonden, Monitore für elektromagnetische Strahlung, Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Dortmund (BRD), 1989, ISBN 3-88 314-907-1.

[6] *King R. W. P.* Antennas and Waves, M. I. T. Press, 1969 (S. 593—693).

[7] *Kanda M.* An Electromagnetic Near-Field Sensor for Simultaneous Electric and Magnetic-Field Measurements, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-26, No. 3, August 1984.

[8] *Lindsay J. E.* and *Münter K.* Distributed Parameter Analysis of Shielded Loops Used for Wide-Band H-Field Measurements, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 32 No. 1, March 1983.

[9] *Harrison C. W.* Qualitative Analysis of Loop Antenna Behaviour in Linearly and Elliptically Polarized Electric Fields. ASNE Journal, May 1957.

[10] *Tsun Wu T.* Theory of the Thin Circular Loop Antenna, Gordon McKay Laboratory, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 1962.

[11] *Schroth A.* und *Stein V.* Moderne Numerische Verfahren zur Lösung von Antennen- und Streuproblemen, Oldenburg, München, 1985.

[12] *Hansen D., Garbe H., Wilson P.* und *Königstein D.* Eine Neuartige EMC-Testkammer basierend auf dem hybriden TEM-Zellen-Absorberhallen-Konzept, Mesago EMV, Karlsruhe, 1990.

[13] *Skolnik M.* Radar Handbook, McGraw-Hill, 1990.

## Zusammenfassung

*Neuartiger Breitbandsensor zur Messung elektromagnetischer Felder für Anwendungen zum Personenschutz*

An Feldstärkemessgeräte für den Bereich Personenschutz werden besondere Anforderungen gestellt, denen allerdings die meisten auf dem Markt erhältlichen Instrumente nicht genügen. Die in der Schweiz 1990 eingeführten strengen Grenzwerte für Personenschutz veranlassten die Direktion Forschung und Entwicklung der Telecom PTT zur Vergabe eines entsprechenden Entwicklungsauftrages. Das neuartige Messgerät ist in der Lage, mit demselben Sensor sowohl die elektrischen als auch die magnetischen Feldkomponenten in allen Raumachsen x, y, und z mit einer bisher nicht erreichten, aber heute benötigten Präzision zu erfassen. Die in der Praxis durchgeführten Messreihen und vergleichenden Berechnungen in der Umgebung von Rundfunksendeantennen bestätigen die hohe Genauigkeit. Der ursprünglich vorgesehene Frequenzbereich von 75 kHz bis 30 MHz konnte bis auf 110 MHz erweitert werden.

## Résumé

*Nouvelle sonde à large bande pour mesurer les champs électromagnétiques dans les applications pour la protection des personnes*

Les appareils de mesure de champ, destinés à la protection des personnes, doivent satisfaire à des exigences particulières, auxquelles la plupart des instruments disponibles sur le marché ne répond pas. Les valeurs limites sévères introduites en Suisse en 1990 dans ce domaine a incité la direction Recherche et développement de Télécom PTT à faire développer un appareil approprié. L'instrument de mesure qui en a résulté est capable de saisir, à l'aide de la même sonde, aussi bien les composantes de champs électriques que magnétiques dans tous les axes spatiaux x, y, et z, avec une précision encore inégalée, mais cependant nécessaire aujourd'hui. Les séries de mesures effectuées dans la pratique et les calculs comparatifs à proximité des antennes de radiodiffusion ont confirmé cette exactitude. La gamme de fréquences prévues au départ, soit de 75 kHz à 30 MHz, a même pu être portée à 110 MHz.

## Riassunto

*Nuovo sensore a larga banda per la misurazione di campi elettromagnetici nell'ambito della protezione delle persone*

Gli apparecchi di misura dell'intensità di campo utilizzati nell'ambito della protezione delle persone devono essere conformi a requisiti particolari che la maggior parte degli strumenti disponibili sul mercato non è in grado di soddisfare. I valori limite, molto severi, introdotti in Svizzera nel 1990 per la protezione delle persone hanno indotto la direzione ricerche e sviluppo delle Telecom PTT a ordinare lo sviluppo di un apparecchio adatto. Il nuovo apparecchio di misura è in grado di rilevare mediante lo stesso sensore, con una precisione che finora non era mai stata raggiunta ma che oggi è necessaria, sia le componenti di campo elettriche sia quelle magnetiche negli assi spaziali x, y e z. Le serie di misure eseguite in campo e i calcoli di confronto nelle vicinanze delle antenne di radiodiffusione confermano l'elevata precisione. È stato possibile ampliare fino a 110 MHz la gamma di frequenze prevista originariamente fra 75 kHz e 30 MHz.

## Summary

*Broad Band Sensor for Measuring Electromagnetic Fields for Radiation Protection Applications*

Particular requirements are made on field intensity meters for the area of radiation protection which, however, are not satisfied on most of the instruments available on the market. The strict limits for radiation protection introduced in Switzerland in 1990 compelled the research and development directorate of the Swiss Telecom PTT to place a corresponding development order. The new type of meter is capable of recording with the same sensor the electric as well as the magnetic field components in all axes x, y and z with the required, unprecedented precision. The measurement series and comparison calculations practiced in the vicinity of radio transmitter antennas confirm the high accuracy. The originally planned frequency range from 75 kHz to 30 MHz could be increased up to 110 MHz.


## *Die nächste Nummer bringt unter anderem:*

## *Vous pourrez lire dans le prochain numéro:*

## *Potrete leggere nel prossimo numero:*

# 9/93

| | |
|---|---|
| Maron K. | Schematischer Telecom-Netzplan mit Grafico<br>Plan schématique du réseau Télécom par Grafico |
| Burger P., Trüeb R., Lehmann P., Brandes W. | Strategische Informationsplanung |
| De Weck J.-P., Schilling M. | Mesures des performances de l'interface radio du Natel D GSM<br>Messung der Leistungsmerkmale der Natel-D-GSM-Funkschnittstelle |
| Visconti P., Moresi A. | ETV, das neue System für die Verzeichnisdienste |