

Hört gut, schielt nicht

Eine breitbandige isotrope Antenne für selektive Sicherheitsmessungen in elektromagnetischen Feldern

Als kompromissloses Design würden es Werbeleute bezeichnen. Doch genau genommen sind es die wohl abgewogenen Kompromisse, die das Design einer Messantenne für den praktischen Einsatz tauglich machen. Denn physikalische Gesetze lassen sich nicht aushebeln, aber nutzen.



Antenne und Messgerät im Einsatz

Schutz vor unzulässig hohen elektromagnetischen Feldern am Arbeitsplatz, in der Öffentlichkeit, im privaten Bereich – dazu haben die International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) und verschiedene nationale Gremien Grenzwerte festgelegt. Nur eine Messung vor Ort kann nachweisen, ob sie eingehalten werden. In der Nähe von Sendeanlagen geht es zum Beispiel um die Festlegung von Sicherheitsbereichen. In Wohngebäuden geht es um die alltägliche Belastung, wobei das DECT-

Telefon im Schlafzimmer oder die so genannte Mikrowelle in der Küche – eigentlich eine Dezimeterwellenquelle – oft mehr zur Feldexposition beitragen als die Mobilfunkantennen auf dem Dach. In beiden Fällen interessiert nicht nur die Gesamtbelastung, sondern auch, welche Quellen überhaupt vorhanden sind und wie viel sie zur Belastung beitragen. Das lässt sich mit einem frequenzselektiven Messgerät und einer geeigneten Messantenne ermitteln.

Die hier vorgestellte Messantenne wurde speziell für diese Aufgabe entwickelt. Sie sollte den wesentlichen Frequenzbereich heutiger Telekommunikationsdienste von UKW bis UMTS, also 75 MHz bis 3 GHz abdecken. Sie sollte isotrop sein, also Signale aus allen Richtungen gleichmäßig empfangen, damit sich der Messende über die Haupteinstrahlungsrichtung keine Gedanken zu machen braucht. Sie sollte elektrisch so empfindlich sein, dass man selbst in Gebäuden aus dem Frequenzgemisch noch einzelne Mobilfunkkanäle selektiv „heraushören“ kann, und mechanisch so robust, dass sie jeder Umgebung Stand hält. Die Gesamtanordnung aus Antenne und Messgerät sollte außerdem so einstrahlungsfest sein, dass man auch in der Nähe von z. B. starken Mittelwellensendern noch zu vertrauenswürdigen Ergebnissen kommt.

Das sind konträre Forderungen. Angefangen bei der Empfindlichkeit: Je größer die Antenne, umso besser. Wenn jedoch die Abmessungen in die Größenordnung der Wellenlänge kommen – bei 3 GHz beträgt die Wellenlänge nur rund 10 cm –, zeigen sich ausgeprägte Resonanzeffekte und Richtwirkungen, und die Isotropie ist dahin. Das begrenzt den möglichen Frequenzbereich. Da die Antenne nicht frei im Raum schwebt, braucht sie Halterung und Zuleitung, die das Feld zusätzlich stören. Und einstrahlfest ist nur ein geschirmtes Messgerät, was wiederum das Feld beeinflussen kann. Alles das stört die Isotropie. Trotzdem kommt man mit geschickter Ausnutzung verschiedener Effekte zu einer Lösung.

Dreidimensionales Dipol-Design

Das kugelförmige Äußere der Antenne suggeriert die gleichmäßige Empfindlichkeit in allen Richtungen. Innen sieht es freilich anders aus: Drei elektrische Dipole sind in räumlich senkrecht aufeinander stehenden Achsen angeordnet (Bild 1, 2). Ihre Empfindlichkeitscharakteristiken – jeweils eine rotierende Acht – ergänzen sich im Idealfall zu einer Kugel, wenn das Messgerät die abgegebenen Einzelspannungen quadratisch addiert [1]. Die von Natur aus hohe Symmetrie dieser Anordnung wird freilich gestört durch die elektrischen Zuleitungen. Sie bringen die Dipole zum „Schielen“. Deshalb sind die Zuleitungen von Ferriten umgeben, die eine Wellenausbreitung auf der Leitung verhindern und sie so elektrisch „unsichtbar“ machen.

Genau genommen kann man den großen Frequenzbereich 75 MHz bis 3 GHz bei der geforderten Empfindlichkeit nicht mit ein und denselben Dipolen abdecken. Es ist nicht nur der metallische Würfel, der bei höheren Frequenzen stört. Bei einer Dipollänge von rund 10 cm würde im Bereich von 1,5 GHz schon die sog. $\lambda/2$ -Resonanz erscheinen. Deshalb sind die Dipole mit Widerständen bedämpft, so dass die effektive Dipollänge mit steigender Frequenz kürzer wird. Dieses Verfahren ist grundsätzlich bekannt [2]. Die Besonderheit besteht hier in der Einfachheit: Miniaturwiderstände in einem Kunststoffröhrchen fungieren zugleich als Antennenleiter und Dämpfungsglieder – eine präzise und dennoch bezahlbare Lösung.

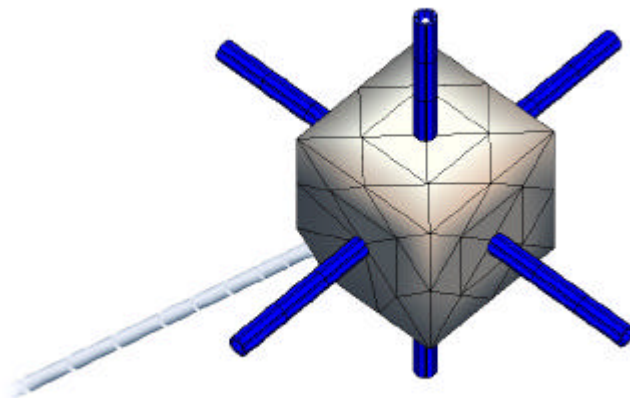


Bild 1: Modellierung von Antennenkopf und Zuleitung.

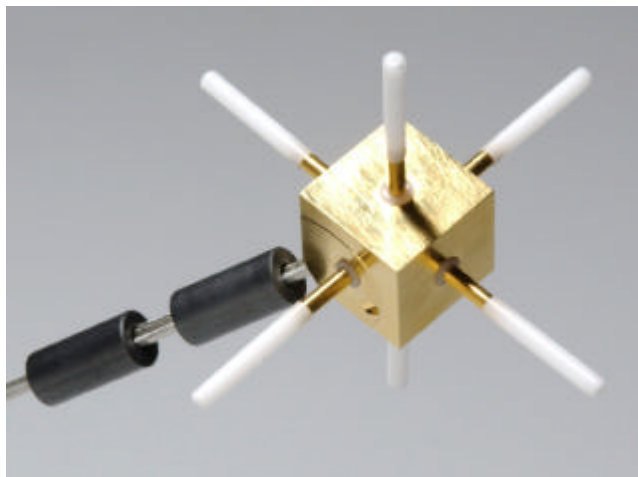


Bild 2: Der reale Antennenkopf mit seinen Dipolen und der Zuleitung.

der Einfachheit: Miniaturwiderstände in einem Kunststoffröhrchen fungieren zugleich als Antennenleiter und Dämpfungsglieder – eine präzise und dennoch bezahlbare Lösung.

Simulation und Messung

Simulation kann keine Messung ersetzen, aber vorab manchen Irrweg ersparen. Das Verhalten der Dipolanordnung wurde mit FEKO – Feldberechnung bei Körpern beliebiger Oberfläche – simuliert. Dieses Programm basiert auf der Momentenmethode, einem exakten Lösungsverfahren: Die Genauigkeit hängt allein von der Modelltiefe ab, also der Detaillierung des Modells. Für die Dipolanordnung führte ein vergleichsweise grobes Modell mit 246 Drahtsegmenten, 192 Dreiecken und 144 Kuben schon zu Ergebnissen, die den praktischen Messergebnissen sehr nahe kamen.

Mit der Simulation konnte u. a. die Empfindlichkeit so gestaltet werden, dass kein ausgeprägtes Maximum bei einer Vorzugsfrequenz entsteht, sondern ein breiter Bereich dort, wo die Mobilfunkbänder liegen (Bild 3). Dem entsprechen die Messwerte (Bild 4). Wegen der unvermeidlichen Streuung der Exemplare wird der Frequenzgang individuell kalibriert. Die Kalibrierdaten sind zusammen mit anderen Antennendaten in einem EEPROM in der Antenne abgelegt. Über ein Steuer-Nebenkabel liest sie das Messgerät aus, um die Rohmesswerte damit automatisch zu korrigieren. Die Empfindlichkeitskurve kann man indirekt ablesen am Grundrauschen des Geräts, das von Natur aus praktisch weiß ist, aber durch die Frequenzgangkorrektur eine breite „Wanne“ zeigt, in der sich die Empfindlichkeitskurve abbildet (Bild 9).

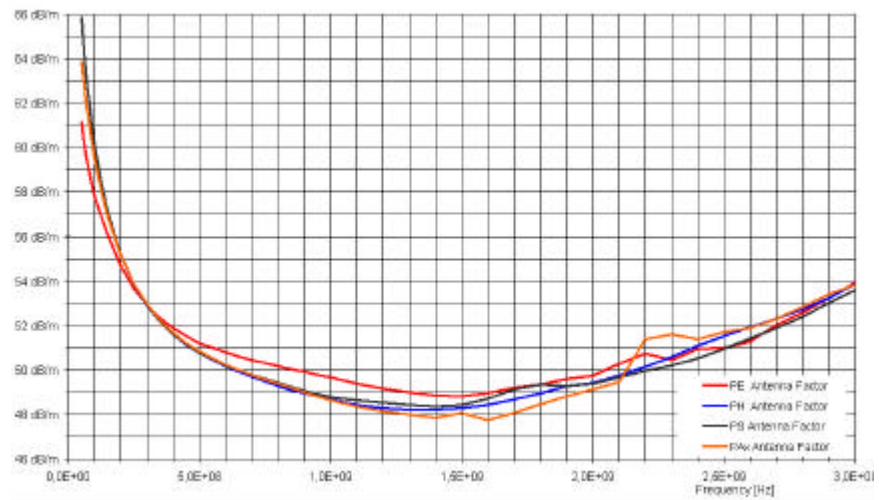


Bild 3: Ergebnis der Simulation. Über der Frequenzachse ist der logarithmierte Antennenfaktor (das Wandlungsmaß) eingetragen. Die Simulation wurde für verschiedene Orientierungen im Feld durchgeführt: Symmetrieachse parallel zum elektrischen Feld (PE), parallel zum magnetischen Feld (PH), parallel zur Ausbreitungsrichtung der Wellen (PS) und Symmetrieachse im analytischen Winkel (PAX).

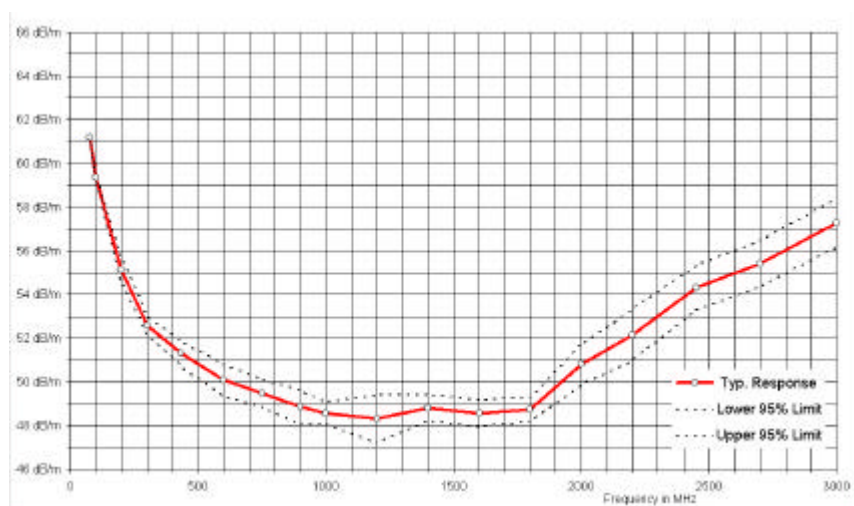


Bild 4: Antennenfaktoren (Wandlungsmaße) von 37 Exemplaren der Serienfertigung; dargestellt sind Mittelwert und Streubereich über der Frequenzachse. Deutlich erkennt man die breite Empfindlichkeits-„Wanne“ für die Mobilfunkbänder bei 900 MHz (D-Netz) und 1,8 GHz (E-Netz).

Kalibrierung

Die Messunsicherheit, landläufig als Genauigkeit bezeichnet – für ein Handmessgerät nicht so wichtig wie für ein Labormessgerät? Das Messergebnis kann immerhin darüber entscheiden, ob ein Senderbetreiber oder Dienstanbieter an einem Standort besondere Maßnahmen ergreifen muss, z. B. die Sendeleistung reduzieren oder die Aufstellung der Anlagen verändern. Deshalb sind reproduzierbare Messergebnisse wichtig – mit garantierten, auf nationale Normale rückführbaren Kalibrierdaten.

Erste Kenngröße ist der *Antennenfaktor* bei einer festen Bezugshfrequenz, also das Verhältnis der anliegenden elektrischen Feldstärke zur erzeugten Ausgangsspannung, logarithmiert auch als *Wandlungsmaß* bezeichnet. Zur Kalibrierung wird die Antenne in ein definiertes, linear polarisiertes elektrisches Feld gebracht, was in der praktischen Anwendung dem Fernfeld entspricht. Wenn man die Antenne mit der Längsachse (Achse der Zuleitung) im analytischen Winkel von 54,74 Grad zur Polarisationsrichtung des E-Felds positioniert, muss man sie zur Kalibrierung in den unterschiedlichen Richtungen nur um die Längsachse drehen. Das geschieht in Schritten von jeweils 60 Grad.

Die Kalibrierung des *Frequenzgangs* im Bereich von 75 MHz bis 3 GHz ist recht aufwendig. Mit insgesamt 18 Kalibrierpunkten (frequenzen) lässt sich die Charakteristik ausreichend beschreiben. Der weite Bereich lässt sich jedoch nur mit verschiedenen Techniken abdecken:

- Bis 100 MHz wird in einer TEM-Zelle ein berechenbares Kalibrierfeld erzeugt.
- Von 200 MHz bis 1,6 GHz geschieht die Kalibrierung in einer Absorberkammer mit Breitband-Hornantenne durch Substitution mit einem kalibrierten Transfer-Sensor.
- Ab 1,8 GHz wird mit Standard-Gain-Hornantennen ein berechenbares Feld erzeugt.

Berechenbar heißt, die Kalibriergröße „E-Feld“ wird mathematisch auf andere physikalische Größen zurückgeführt, für die wiederum rückführbar kalibrierte Normale vorhanden sind.

Zusätzlich wird bei der Kalibrierung die *Elliptizität* (Ellipse Ratio) ermittelt. Sie ist ein repräsentatives Maß für die Anisotropie – die Abweichung von der idealen Isotropie. Sie steigt im Allgemeinen mit der Frequenz. Denn die Richtcharakteristik der einzelnen Dipole entspricht nicht mehr der idealen Acht, der Würfel in der Mitte macht sich als Resonanzkörper bemerkbar, und die Frequenzgänge der Dipole sind auch nicht exakt gleich. So verformt sich die Empfindlichkeitscharakteristik der Gesamtanordnung von der Kugel zu einer Form, auf die mancher Art Designer stolz wäre. Für Messzwecke ist sie unerwünscht (Bild 5).

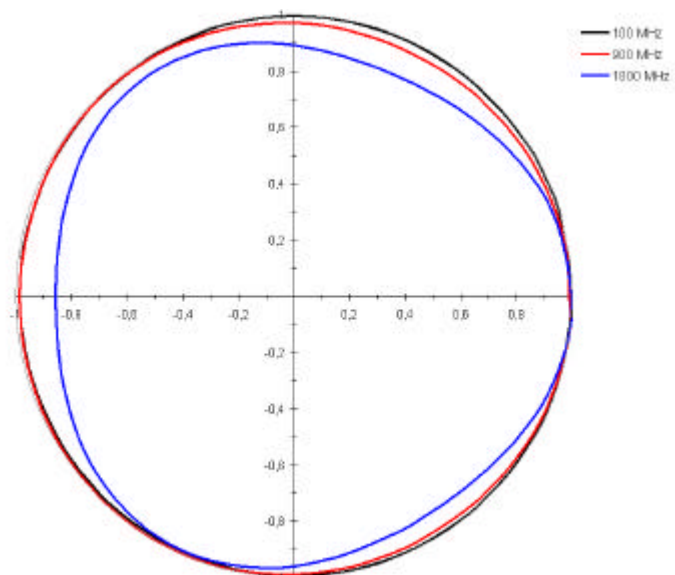


Bild 5: Elliptizität der realen Messantenne, gemessen bei Rotation um die analytische Achse. Das Diagramm repräsentiert einen Schnitt durch die räumliche Richtcharakteristik, die durch Überlagerung der drei Einzelkomponenten entsteht.

Bei jeder Kalibrierfrequenz wird Elliptizität gemessen und im Kalibrierschein ausgewiesen. Deshalb wird die Antenne bei jeder Frequenz in jeweils 60- und nicht in 120-Grad-Schritten gedreht. Denn sonst würde man nur die Haupttrichtungen erfassen. Um eine Größe zu nennen: Bis 900 MHz (Mobilfunk, D-Netz) liegt die Elliptizität in 98 % der Fälle unter $\pm 0,5$ dB, bis 1,8 GHz (Mobilfunk, E-Netz) in 98 % der Fälle unter $\pm 1,25$ dB.

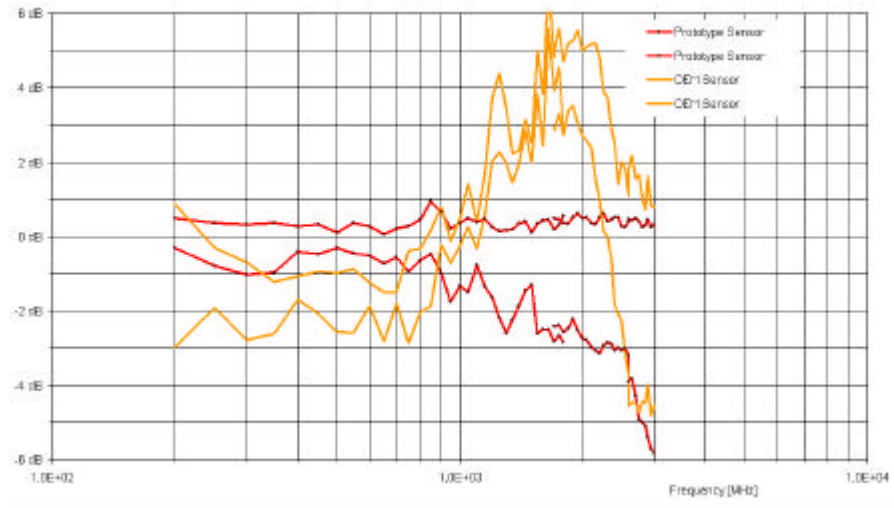


Bild 6: Gemessene Anisotropie eines Prototypen (rot) und einer Messantenne von einem Fremdhersteller (gelb).

Die *Reflexionsdämpfung* der Zuleitungen ist eine weitere Kalibriergröße. Denn Mehrfachreflexionen zwischen Antenne und Gerät würden für eine weitere Unsicherheit im Verhalten sorgen.

Weitere Untersuchungen

Die Kalibrierung ist auf ein technisch nötiges und wirtschaftlich sinnvolles – und damit für den Kunden bezahlbares – Maß beschränkt. Für die Entwicklung wurden weiterreichende Simulationen und Untersuchungen bis zur praktischen Messung im Gelände durchgeführt. So wurde die Antenne in weiteren, extremen Positionen gemessen, u. a. mit der Achse in Richtung des elektrischen Felds, des magnetischen Felds und der Ausbreitungsrichtung der Wellen. Gegenüber den Ergebnissen der Kalibrierpositionen ergaben sich tendenziell etwas größere Antennenfaktoren, was zu einem etwas geringeren Anzeigewert am Messgerät führt. Die Laborergebnisse lagen typisch innerhalb von $+1/-3$ dB bis 2GHz. Ein praktischer Test in der Nähe von UKW-Sendern ergab Abweichungen von $\pm 2,5$ dB.

Der elektromagnetische „Härtetest“ fand unter Laborbedingungen statt, nämlich in einer Modenverwirbelungskammer, wie sie für EMV-Untersuchungen z. B. an Auto-

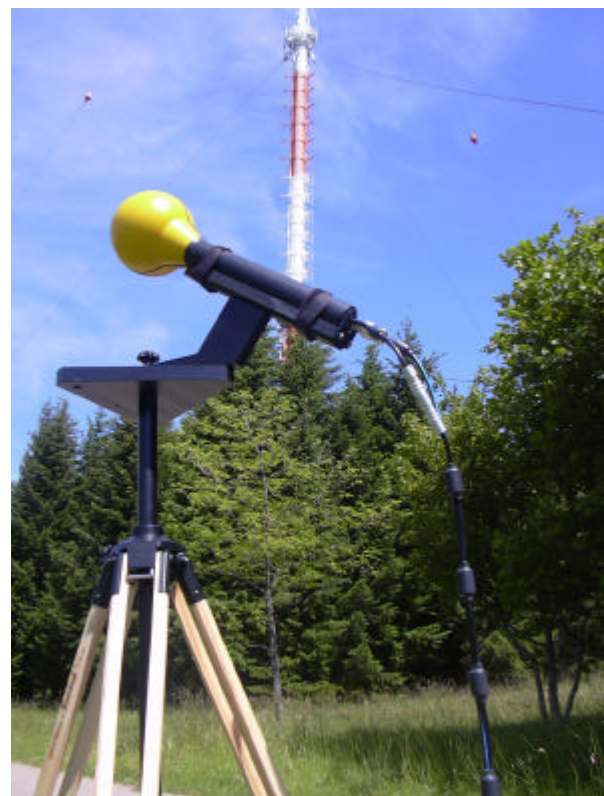


Bild 7: Praktischer Test der Anisotropie in der unmittelbaren Nähe von UKW- und TV-Sendern.

mobilen verwendet wird. Denn in Absorberkammern lassen sich technisch kaum genügend hohe Feldstärken erzeugen. Es zeigte sich, dass Gerät und Sonde einstrahlungsfest sind bis zu mehreren hundert Volt pro Meter – ein wichtiges Kriterium, wenn man auch in der Nähe von Mittelwellensendern mit ein paar hundert Kilowatt „Power“ noch die Feldbeiträge einzelner „zarter“ Mobilfunkkanäle selektiv erfassen möchte.

Bild 8: Modellierung von Antenne und Messgerät. Der speziell geformte Schirm des Geräts hält die Rückwirkung auf die Antenne gering.

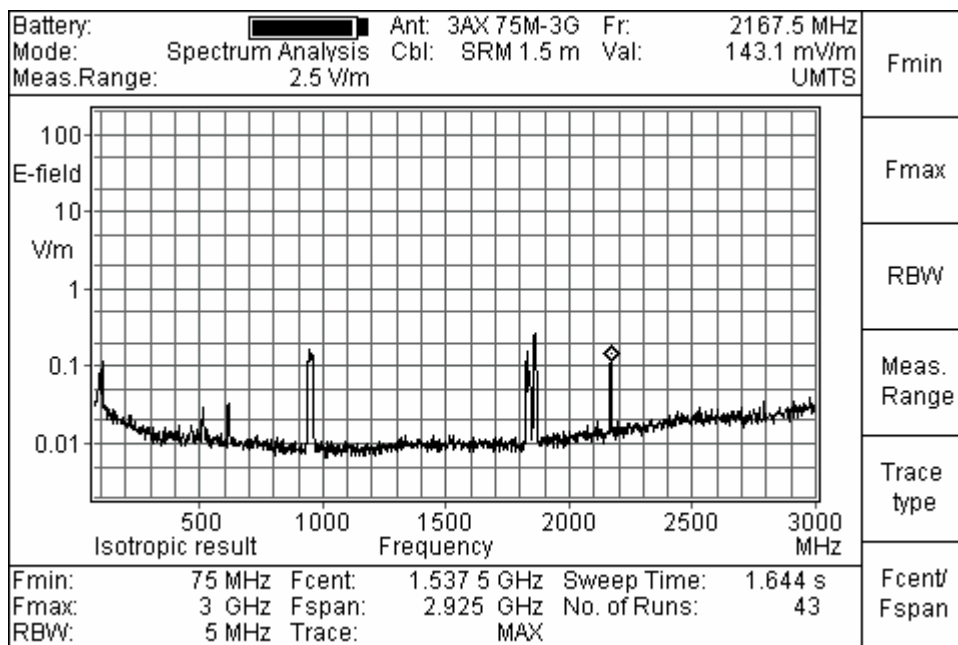
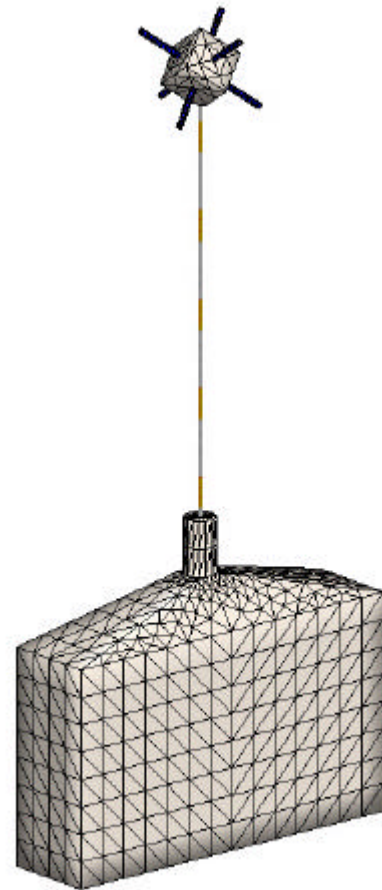


Bild 9: Ergebnis der selektiven Übersichtsmessung in einem Gebäude mit vergleichsweise sehr geringen Feldstärken, Frequenzbereich 75 MHz bis 3 GHz. Deutlich zu erkennen sind die Mobilfunkbänder bei 900 MHz und 1.8 GHz sowie UMTS bei ca. 2.2 GHz (Marker-Position). Weniger auffällig sind der UKW-Rundfunk bei rund 100 MHz und diverse Funkdienste bei 500 und 600 MHz.

ANHANG

Die Kalibrierung, mathematisch beschrieben

Die Antenne ist grundsätzlich im analytischen Winkel ausgerichtet (54,74 Grad zwischen der Antennenachse und dem Vektor des elektrischen Felds). Bei jeder Prüffrequenz wird sie jeweils in 60-Grad-Schritten um 360 Grad gedreht. Für jeder dieser Positionen $k \in [1,6]$ werden die Ausgangsspannungen $u_{k,i}$ der einzelnen Dipole $i \in [1,3]$ gemessen und quadratisch addiert:

$$u_{k,rss} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (u_{k,i})^2} \quad \text{in Position } \alpha_k = \frac{k-1}{3} \cdot \pi \quad \text{mit } k \in [1,6]$$

Der Mittelwert u_{out} ergibt sich aus den Minimal- und Maximalwerten zu

$$u_{out} = \sqrt{Min(u_{k,rss}) \cdot Max(u_{k,rss})}$$

Der (lineare) Antennenfaktor AF ist gegeben durch

$$AF = \frac{E_0}{u_{out}}$$

Der Kalibrierschein weist den logarithmischen Antennenfaktor, d.h. das Wandlungsmaß aus:

$$L_{AF} = 20 \text{ dB} \cdot \log(AF) = 20 \text{ dB} \cdot \log\left(\frac{E_0}{u_{out}}\right)$$

Die Elliptizität ergibt sich aus den Maximal- und Minimalwerten zu

$$Ellipse \text{ Ratio} = \pm \frac{1}{2} \cdot 20 \text{ dB} \cdot \log\left(\frac{Max(u_{k,rss})}{Min(u_{k,rss})}\right)$$

Die Antenne wird im Frequenzbereich von 75 MHz bis 3 GHz an insgesamt 18 Frequenzpunkten kalibriert. Insgesamt entstehen also $18 \cdot 6 \cdot 3 = 324$ Einzelergebnisse für die Ausgangsspannung. Sie werden mathematisch zu 18 Antennenfaktoren und 18 Ellipse Ratios zusammengefasst.

LITERATUR

- [1] Santi Tofani, Piero Ossola: "Accuracy in Outdoor Isotropic Measurements of Multiple-Source, Multiple-Frequency EM Fields", IEEE Transaction on EMC, vol. 34, no. 3, Aug. 1992
- [2] M. Kanda and L. Driver, "An isotropic, electric-field probe with tapered resistive dipoles for broadband use, 100 kHz-18 GHz", IEEE Transaction on Microwave Theory Tech, vol. MTT-35, no. 2, pp.124-130, Feb. 1987
- [3] Rainer Bitzer, "Messverfahren "Safety Evaluation" zur Frequenzselektiven Bewertung der hochfrequenten Feldstärke-Exposition in einer Mehrfrequenz-Umgebung", Tagungsband der 36. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Aug./Sept. 2004 (NIR 2004)

Die Autoren:

Dr.-Ing. Rainer Bitzer leitet die Antennen-Entwicklung bei der Narda Safety Test Solutions GmbH in Pfullingen.

Dipl.-Ing. Burkhard Braach ist freier Fachjournalist in Reutlingen.

Oktober 2005

Änderungen vorbehalten

© Narda Safety Test Solutions GmbH

Sandwiesenstr. 7

72793 Pfullingen

Deutschland

Tel. +49 7121 9732-777

Fax +49 7121 9732-790

E-mail support@narda-sts.de

www.narda-sts.de