

ADD3D, EINE NEUE TECHNIK FÜR PRÄZISE, FREQUENZSELEKTIVE FELDSTÄRKEMESSUNGEN Z.B. FÜR GSM BASISSTATIONEN

HARALD HAIDER, WOLFGANG MÜLLNER, GEORG NEUBAUER

ÖSTERREICHISCHES FORSCHUNGSZENTRUM SEIBERSDORF GES.M.B.H.
EMV UND HOCHFREQUENZTECHNIK, A-2444 SEIBERSDORF
TEL. : +43 (0) 50550-2804, FAX.: +43 (0) 50550-2813,
E-mail: harald.haider@arcs.ac.at, WEB: www.arcs.ac.at/itr

Mit zunehmendem Einsatz der Mobiltelefone nehmen auch öffentliche Bedenken und Fragen zu Gesundheits- und Sicherheitsaspekten zu. In diesem Zusammenhang wurden zum Schutz der Menschen vor hochfrequenter Strahlung Sicherheitsrichtlinien festgelegt. Der folgende Beitrag beschäftigt sich mit einem frequenzselektiven Meßverfahren zur Ermittlung der elektromagnetischen Feldstärke. Diese neue Methode verbindet die Vorteile der Messungen mit Feldsonden (unkompliziert und gutes Isotropieverhalten) mit jenen von Richtantennen (empfindlich, präzise und frequenzselektiv). Durch den großen Bandbreitenbereich von 30 MHz bis 2.1 GHz werden die meisten Rundfunk- und TV – Frequenzen, analoge Mobilfrequenzen sowie Funk und GSM-Bänder abgedeckt.

Die neu entwickelte Methode nennt sich Add3D (**A**ddition of **3** Dimensional Field Components). Zur Bestimmung der Ersatzfeldstärke werden 3 orthogonal zueinander orientierte elektrische Feldkomponenten addiert. Daraus kann über den Feldwellenwiderstand des freien Raumes die entsprechende Leistungsflußdichte angegeben werden. Der Einsatz mobiler, breitbandiger Meßeinrichtungen (extrem kleine, bikonische Präzisionsantenne mit portablem Spektrumanalysator bzw. Meßempfänger) ermöglicht. Messungen an beliebigen Orten in einem breiten Frequenzbereich (30 MHz bis 2.1 GHz).



Abb. 1: Frequenzselektive Feldstärkemessung
mit der PBA 10200

GRENZWERTE und NORMEN

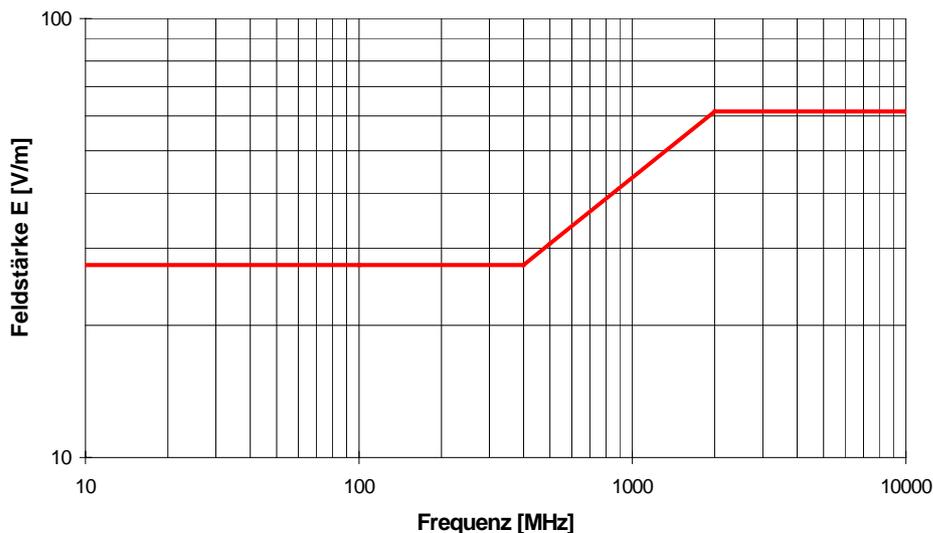
Die Basisgrenzwerte für hochfrequente Strahlungen sind grundsätzlich durch die SAR (**s**pezifische **A**bsorptions**r**ate) gegeben. Der resultierende SAR Wert ist jedoch einer unmittelbaren Messung im lebenden Organismus nicht zugänglich, da dafür die Meßsonden in die jeweiligen Gewebe eingebracht werden müßten. Die direkte Bestimmung der SAR reduziert sich daher auf Phantommessungen im Labor (Messung des Temperaturanstiegs oder elektrische Feldstärkemessung in künstlichem Gewebe von Körperphantomen [1]) und Stimulationen. Aus derartigen Untersuchungen lassen sich jedoch Feldstärkewerte und Leistungsflußdichten für den freien Raum ableiten, die zu unbedenklichen SAR Werten im Gewebe des Menschen führen. Die Abschätzung dieser Unbedenklichkeitswerte obliegt den einzelnen Ländern und findet in Normen (Standards) und Grenzwerten (Limits) ihre Entsprechung. Die abgeleiteten Grenzwerte sind als Leistungsflußdichte S [W/m^2] oder [mW/cm^2] beziehungsweise als elektrische Feldstärke E (V/m) oder magnetische Feldstärke H [A/m] angegeben. Bei hohen Frequenzen wie z.B. für GSM Basisstationen und unter Fernfeldbedingungen genügt die Messung der elektrischen Feldstärke. Unter diesen Bedingungen beschreibt Gleichung 1 die Korrelation zur Leistungsflußdichte.

$$E [V/m] = \sqrt{S [W/m^2] \cdot 377 [\Omega]} \quad (1)$$

Die Grenzwerte sind üblicherweise frequenzabhängig festgelegt, wie in Abb. 2 für den geltenden, international empfohlenen ICNIRP Grenzwert zu sehen ist.

ICNIRP Richtlinien von 1998 bzw. Richtlinie des Rates Juli 1999 (1999/519/EG)

ICNIRP 1998, Bevölkerung



Frequenz	S
10 MHz - 400 MHz	2000 mW/m ²
400 MHz - 2 GHz	f [MHz] / 0,2 mW/m ²
2 GHz - 40 GHz	10000 mW/m ²

Abb. 2:
Frequenzabhängiger
Feldstärkegrenzwert
für allgemeine
Bevölkerung
entsprechend
ICNIRP Richtlinien
von 1998

Um Meßresultate mit den entsprechenden, für diese Frequenz gültigen, Grenzwert bewerten zu können, ist ein frequenzselektives Meßsystem notwendig. Ist es nicht frequenzselektiv, muß der niedrigste Grenzwert innerhalb der Meßbandbreite des verwendeten Meßsystems zur Grenzwertbeurteilung herangezogen werden.

Die Bezeichnung der Standards und deren Grenzwerte für die GSM-Bereiche ist in der folgenden Tabelle für einige Länder angeführt.

Land	Standard	E_{Lim} bei 950 MHz	E_{Lim} bei 1850 MHz
International	Council Recommendation 1999/519/EG	42 V/m	59 V/m
International	ICNIRP Guidelines, April 1998	42 V/m	59 V/m
Österreich	ÖNORM S1120	49 V/m	61 V/m
Deutschland	26. Deutsche Verordnung	42 V/m	59 V/m
Italien	Decreto n. 381, 1998	6 bzw. 20 V/m	6 bzw. 20 V/m
Niederlande	Health Council	51 V/m	83 V/m
Schweiz	Verordnung 1999	4 V/m	6 V/m
USA	IEEE C95.1	49 V/m	68 V/m
China	Draft: National Quality Technology Monitoring Bureau	49 V/m	61 V/m
Japan	Radio-Radiation Protection Guidelines, 1990	49 V/m	61 V/m

Speziell für die Betrachtung thermischer Wirkungen wie z.B. der SAR kommt nicht nur den einzelnen Amplituden große Bedeutung zu, sondern auch der Anzahl der Quellen (Rundfunk, TV, Funk, GSM,...) mit deren Sendekanälen, die über den relevanten Frequenzbereich verteilt sind. Die thermische Gesamtwirkung kann durch geeignete Summation der Einzelanteile berücksichtigt werden, wobei jedem Kanal einer Sendeeinrichtung sinnvoller Weise ein Summand zugeordnet wird. Die einzelnen Summanden ergeben sich aus Feldstärkemessungen für die jeweiligen Kanäle bei Verwendung geeigneter Bandbreiten (typisch 50 KHz bei Rundfunk, 5 bis 7 MHz bei TV und 200 KHz bei GSM). Durch Formel 2 wird eine, von der ICNIRP empfohlene, Abschätzung für die Summe dieser Anteile gegeben. E_i sind die gemessenen Feldstärken der Kanäle und E_{Lim} sind die frequenzspezifischen Grenzwerte (Limits).

$$\sum_{i>1MHz}^{300GHz} \left(\frac{E_i}{E_{Lim}} \right)^2 \leq 1 \quad (2)$$

Sinngemäß kommt diese Formel auch bei der Überlagerung von gleichfrequenten Kanälen verschiedener Sender zur Anwendung.

MESSMETHODEN

Am Beispiel einer Feldstärkemessung im Sendebereich mehrerer GSM Basisstationen in städtischem Gebiet sollen die Vor- und Nachteile verschiedener Methoden aufgezeigt werden. Dabei sind die Frequenzen (GSM-Bänder) und der Modulationstyp bekannt. Nicht verfügbar sind Informationen über die Richtung der maximalen Signalstärke da mehrere Sender (Betreiber) das Gebiet versorgen, die Polarisation beim Meßpunkt da diese z.B. durch Reflexionen im verbauten Gebiet verändert wird, die momentanen aktiven Kanalfrequenzen bzw. die Kanalauslastung der Basisstationen.

Messung mit einer Feldsonde

Der typische Frequenzbereich geeigneter Sonden beträgt 80 MHz bis 18 GHz. Die maximale Empfindlichkeit beträgt meist 1 V/m. Vorteilhaft ist, daß die Messung sehr einfach, rasch und unkompliziert durchgeführt werden kann. Aufgrund der isotropen Charakteristik der Sonde fällt die unbekannt Richtung der maximalen Feldstärke und die unbekannt Polarisation nicht ins Gewicht. Der Meßwert entspricht einer Summensignalmessung.

Tatsächlich stellt sich jedoch die Frage, ob die Messung der Basisstationen dargestellt wird. Das Instrument kann nicht zwischen Emissionen verschiedener Quellen wie Radio-, TV, Funkstationen und GSM Mobiltelefonen oder der Basisstation, die gemessen werden soll, unterscheiden. Grundsätzlich wird das stärkste Signal bzw. die Summe verschiedener Signale erkannt. Die Sonde kann sogar gegenüber Signalen außerhalb der spezifizierten Bandbreite empfindlich sein (out of band response), da der Frequenzbereich der Sonde nicht notwendigerweise mit dem tatsächlich sensitiven Bereich übereinstimmt. Überdies muß der niedrigste Grenzwert - 2000 mW/m^2 bei 80 MHz - für den gesamten Frequenzbereich als Grenzwert zur Beurteilung angewendet werden, weil das gemessene Signal keiner speziellen Frequenz zugeordnet werden darf. Der Kalibrierfaktor der Sonde ist oft nicht über den gesamten Frequenzbereich konstant bzw. nur für sinusförmige Signale gültig. Die reale Signalform ist jedoch von der Kanalauslastung und von Überlagerungen abhängig und daher nicht sinusförmig. Die Empfindlichkeit von Sonden ist ebenfalls gering im Vergleich zu Antennen.

Für eine Mobilfunkmessung ist daher die Verwendung einer Sonde nicht zu empfehlen. Sie sollte nur dann verwendet werden, wenn sichergestellt ist, daß das Signal der zu vermessenden Basisstation viel stärker ist als alle anderen Signalbeiträge.

Messung mit einer Antenne mit Richtwirkung (directive antenna)

Die Messung wird mit einer handelsüblichen Antenne mit Richtwirkung (z.B. einer Logarithmisch-periodischen Antenne oder mit Hornantennen) und einem Empfänger durchgeführt. Die Meßresultate müssen mit dem, für die jeweilige Frequenz gültigen, Antennenfaktor gewichtet werden (log. AF wird addiert, lin. AF wird multipliziert, wie in Formel 4 gezeigt). Sollte der zu untersuchende Frequenzbereich größer sein als die Meßbandbreite, so können Frequenz-scan Methoden durchgeführt werden.

Folgende Vorteile ergeben sich bei dieser Methode: Die Frequenz ist bei jeder Messung bekannt. Daher kann der frequenzabhängige Antennenfaktor exakt berücksichtigt und der jeweilige Grenzwert angewendet werden. Wenn der Empfänger von guter Qualität ist, werden Signale außerhalb der Meßbandbreite keine Fehler verursachen. Unterschiedliche Kanalauslastungen können durch Messungen im Max-Hold Modus bei verlängerter Meßdauer berücksichtigt werden.

Die Nachteile dieser Methode resultieren vordringlich aus der Richtwirkung und Polarisation der verwendeten Antenne. Da im verbauten Gebiet bzw. bei Vorhandensein von mehreren Sendern weder die Richtung noch die Polarisation der Feldstärke am jeweiligen Meßort bekannt sind, müssen diese durch eine Vielzahl von Messungen ermittelt, festgehalten und im Sinne von Formel 2 richtig bewertet werden. Die maximalen Feldstärken und Polarisationsebenen werden im allgemeinen für verschiedene Kanäle bzw. Sender in unterschiedlichen Raumorientierungen liegen. Besitzt die verwendete Antenne eine Hauptkeule mit einem Raumwinkel von $2/9 \pi$ (45° Keule), so müssen für jeden Kanal 36 Messungen (18 Messungen für ges. Raum von 4π in jeweils 2 Polarisationen) durchgeführt werden. Der damit verbundene Aufwand für diese Messungen und deren Auswertung ist enorm.

In der Praxis wird man sich daher auf eine vertretbare Anzahl von Messungen beschränken müssen. Ist ein Sender dominant und treten keine Reflexionen Brechungen oder Streuungen des Signals bis zum Meßort auf, so ist die Orientierung der Antenne zu diesem Sender naheliegend und es wird nur eine geringfügige Unterschätzung durch die Vernachlässigung anderer Sender eintreten. Im städtischen Gebiet mit hoher Senderdichte wird dies allerdings nicht erfüllt sein. In diesen Fällen muß von einer Messung mit direktiven Antennen abgeraten werden, da eine erhebliche Unterschätzung der Summenfeldstärke am Meßort möglich ist.

Neue Meßmethode: Add3D (“Addition of 3 Dimensional Field Components“)

Unsere neu entwickelte Meßmethode Add3D basiert auf einer frequenzselektiven Messung mit einem Empfänger oder Spektrumanalysator und der Verwendung einer extrem kleinen, bikonischen Empfangsantenne. Die Richtcharakteristik dieser Antennen entspricht über einen weiten Frequenzbereich weitgehend jener von $\lambda/2$ Dipolen. Durch 3 zusammengehörende Messungen mit dieser Antenne in 3 orthogonalen Raumrichtungen mit anschließender Addition wird ein Isotropieverhalten dieses Meßsystems wie mit (isotropen) Feldsonden erreicht. Die 3 erforderlichen

Messungen müssen zeitversetzt durchgeführt werden. Da jedoch zur Erfassung von unterschiedlichen Kanalauslastungen und Pegeländerungen der Sender ohnedies die Verwendung von Max-Hold Funktionen und etwas längeren Meßzyklen notwendig ist, stellt dies keinen Nachteil dar. Durch die Verwendung frequenzselektiver Empfängergeräte ist in den Meßresultaten natürlich die volle Frequenz-Amplituden Information enthalten. Wie in Formel 3 und 4 angegeben, kann die effektive Feldstärke durch 3 orthogonale Spannungsmessungen und entsprechender Addition der Komponenten (z.B. für die x-, y- und z- Achsen) ermittelt werden. Bei linearer Darstellung der Feldstärke gilt:

$$E_i = U_i \cdot AF, \quad i = \{x, y, z\} \quad (3)$$

Damit wird die effektive Feldstärke E_{eff} [V/m] folgendermaßen berechnet:

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \cdot AF \quad (4)$$

AF ist der lineare Antennenfaktor [1/m]. Alle Beiträge (U, AF) und deshalb auch E_{eff} sind frequenzselektiv. Die Auswertung dieser Zusammenhänge kann auf einfache und übersichtliche Weise automatisiert werden (z.B. Meßsoftware CalStan, in den Abb. 3a bis 3c)

Die Vorteile dieser Methode liegen klar auf der Hand: Durch die isotrope Antennencharakteristik resultierend aus den 3 überlagerten Messungen werden alle Raumrichtungen (und Sendequellen) gleichmäßig berücksichtigt. Weiters ist durch die Verwendung von kleinen, bikonischen Präzissionsantennen und frequenzselektiven Empfängern die volle Frequenzinformation gegeben. Es wird eine gute Empfindlichkeit erreicht und die Auswertung ist einfach zu automatisieren. "Out of band response" spielt keine Rolle, wenn der Meßempfänger von guter Qualität ist. Mit dieser Methode werden also die Vorteile der Sonden (gute Isotropie und damit richtungsunabhängige Summation der Feldstärke im Meßpunkt, breitbandig, besonders einfach) mit jenen der direktiven Antennen (frequenzselektiv und empfindlich) gekoppelt, ohne wesentliche Nachteile (zeitversetzte Messung der 3 Komponenten) zu erhalten. Durch weitgehende Automatisierung und eine spezielle Halterung für die Antennen, mit deren Hilfe die 3 orthogonalen Raumrichtungen einfach durch zweimalige Drehung der Antenne um 120° erreicht wird, ist die Methode nicht nur sehr exakt, sondern auch einfach und zeitsparend anwendbar.

Zur Zeit stehen vom Forschungszentrum Seibersdorf zwei Antennentypen speziell für derartige Messungen zur Verfügung. Dies ist zum einen die PBA3100 für den Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz und die PBA10200, die mit ihrem Frequenzbereich von 80 MHz bis 2.1 GHz die GSM Frequenzbänder abdeckt.

- [1] Strahlungsabsorption im menschlichen Kopf bei Exposition in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern; G.Schmid, G.Neubauer, H.Molla-Djafari, H.Haider; AUVA Report Nr. 19; 1998

Die folgenden Bilder 3a bis 3c zeigen eine Messung für GSM 900 Basisstation und deren Auswertung mit Hilfe der Software CalStan.

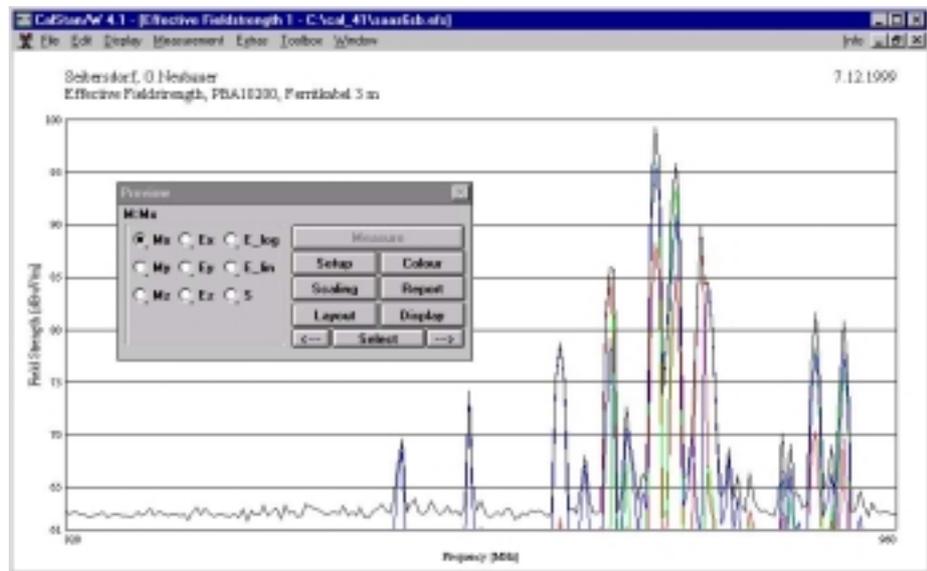


Abb. 3a:
Screen-shot der
Meßsoftware
CalStan/W 4.1

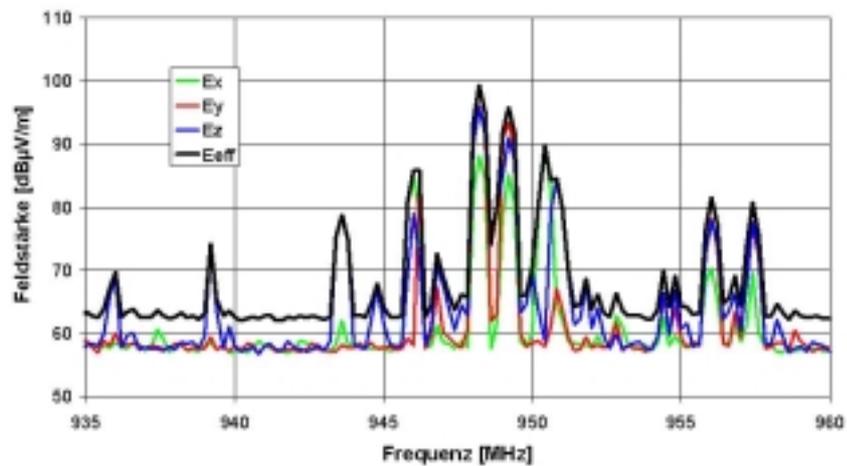


Abb. 3b:
Ergebnis mit den 3
orthogonalen E-Feld
Komponenten –
und der effektiven
Feldstärke E_{eff} in
logarithmischer
Darstellung
($20 \log_{10}(E)$) als
Frequenzfunktion

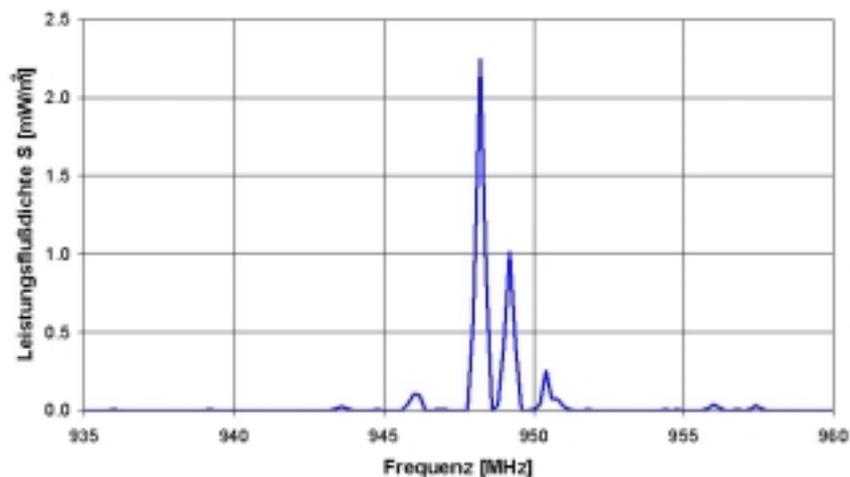


Abb. 3c:
Ergebnis der
Leistungsflußdichte
S in mW/cm^2 als
Funktion der Frequenz
 $S = E_{eff}^2 / 377$