

# **Frequenzselektive Analyse des Isotropieverhaltens und der Messunsicherheit für das Feldstärke Messverfahren Add3D**

Dipl. Ing. Harald Haider, ARC Seibersdorf research, ITR  
Dipl. Ing. Alexander Kriz, ARC Seibersdorf research, ITR  
Dipl. Ing. Wolfgang Müllner, ARC Seibersdorf research, ITR

## **1. Einleitung**

Mit zunehmendem Einsatz von Mobiltelefonen nehmen auch die Bedenken der Öffentlichkeit zu Gesundheits- und Sicherheitsaspekten zu. In diesem Zusammenhang wurden Sicherheitsrichtlinien zum Schutz der Bevölkerung vor hochfrequenter Strahlung festgelegt. Um die Einhaltung dieser gesetzlichen Grenzwerte überprüfen zu können, sind adäquate Messsysteme nötig.

An ein solches Messsystem werden gewisse Anforderungen gestellt um genaue und reproduzierbare Bewertungen durchführen zu können. Das Messsystem muss alle einfallenden Wellen gleichwertig berücksichtigen (Isotropie). Eine weitere Anforderung ist die Frequenzselektivität um den in ICNIRP [1] und in nationalen Normen vorgeschriebenen frequenzabhängigen Grenzwerten Rechnung zu tragen. Dabei ist neben einer „groben“ Frequenzselektivität, die zur Unterscheidung von Rundfunk- und Mobilfunksignalen dient, oft auch eine „feine“ sinnvoll, mit welcher zwischen den Kanälen einzelner Mobilfunkbetreiber unterschieden werden kann. Schließlich ist auch eine hohe Empfindlichkeit des Messsystems nötig, um die oftmals weit unter den Grenzwerten liegenden Feldstärkewerte korrekt messen zu können. Für die praktische Nutzung ist die Kenntnis der Messunsicherheit des verwendeten Messsystems von großer Bedeutung.

Das von den Autoren entwickelte Messverfahren Add3D [2] erfüllt die oben genannten Anforderungen und hat sich in der Praxis bereits gut bewährt [3, 4]. Im Folgenden wird das Isotropieverhalten des Messsystems bestimmt und eine frequenzabhängige Abschätzung des Messfehlers durchgeführt.

## **2. Messverfahren**

Zur Messung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern von Rundfunk und Mobilfunksendeanlagen werden drei unterschiedliche Messverfahren eingesetzt. Das einfachste Verfahren verwendet Feldsonden, wobei die simple Handhabung und die gute Isotropie vorteilhaft sind. Nachteilig sind geringe Empfindlichkeit, bedingte Linearität und die fehlende Frequenzselektivität.

Ein alternatives Verfahren bedient sich einer Anordnung bestehend aus einer Richtantenne und einem Spektrumanalysator. Das Problem der fehlenden Isotropie liegt dabei auf Grund der Richtcharakteristik der Antenne auf der Hand. Zur korrekten

Messung ist, für jeden Sender und für jede Frequenz separat, eine manuelle Suche der maximalen Feldstärke erforderlich. Dies ist in der Praxis extrem zeitaufwendig.

Das von den Autoren entwickelte Add3D Messverfahren kombiniert die Vorteile beider zuvor genannten Verfahren. Es erfüllt die Anforderungen an Isotropie, Frequenzselektivität, Empfindlichkeit und Zeiteffizienz, siehe Tabelle 1.

	Feldsonde	Antenne	Add3D
Isotrop	✓	-	✓
Frequenzselektiv	-	✓	✓
Empfindlich	-	✓	✓
Zeiteffizient	✓	-	✓

Tabelle 1: Bewertung der Messverfahren

## 2.1. Das Add3D Verfahren

Add3D ist ein Verfahren, das auf der Addition der drei separat gemessenen orthogonalen E-Feld Komponenten basiert. Das Prinzip dreier orthogonaler Messungen wurde bereits 1992 von Tofani [5] zur Bestimmung der Feldstärke von Rundfunk- und Fernsehsendern eingesetzt. Bei einer Feldsonde werden die E-Feldkomponenten gleichzeitig mit Hilfe dreier orthogonaler elektrisch kurzer Dipole bestimmt. Im Unterschied zur Feldsonde werden bei Add3D die drei Feldkomponenten nicht gleichzeitig sondern nacheinander gemessen 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. Während bei einer Feldsonde die Dipole hochohmig abgeschlossen sind um die gegenseitige Beeinflussung zu verhindern, wird der Messdipol bei Add3D niederohmig abgeschlossen, wodurch im Vergleich zu Feldsonden eine wesentlich höhere Empfindlichkeit erreicht wird.

Die Feldstärke  $E$  [V/m] ergibt sich aus den drei Spannungsmessungen  $U$  [V] bei orthogonaler Orientierung der Antennen unter Verwendung des Antennenfaktors  $AF$  [1/m] entsprechend Gl. 1.

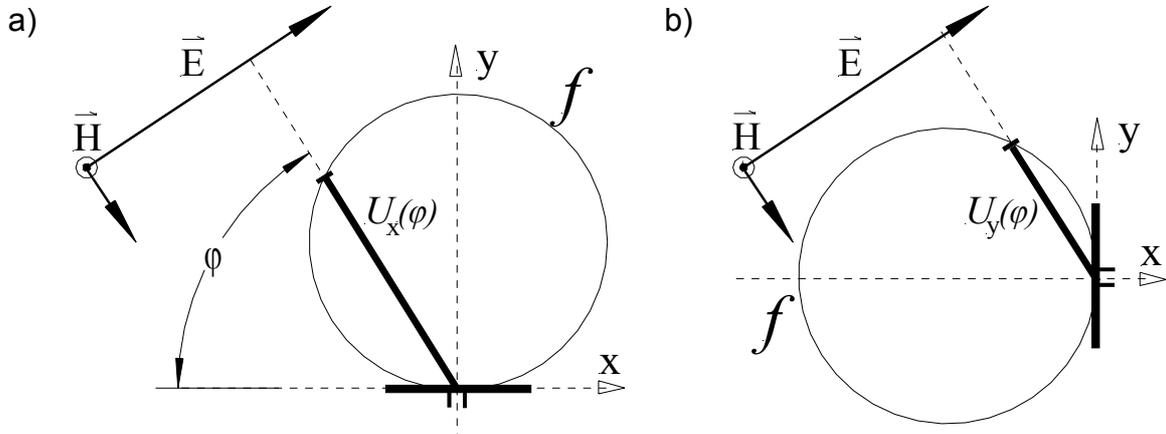
$$E = AF \cdot \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (1)$$

## 2.2. Die Add3D Funktionsweise

Zur Erklärung der Funktionsweise greifen wir einen Spezialfall heraus, wo der H-Vektor des elektromagnetischen Feldes in z-Richtung orientiert ist. Die Einfallsrichtung des E-Vektors ist im allgemeinen unbekannt. Das Richtdiagramm  $f$  des Hertzischen Dipols weist einen sinusförmigen Verlauf in der E-Ebene entsprechend Gl. 2 auf.

$$\begin{aligned} f_x &= \sin \varphi \\ f_y &= \sin(\varphi + 90^\circ) = \cos \varphi \end{aligned} \quad (2)$$

Im Bild 1 ist die Messung der beiden Spannungen  $U_x(\varphi)$  und  $U_y(\varphi)$  dargestellt. Im ersten Schritt wird der Dipol parallel zur x-Achse positioniert und die Spannung  $U_x(\varphi)$  gemessen. Danach folgt die Drehung in die y-Achse und die Messung von  $U_y(\varphi)$ . Im letzten Schritt werden die Komponenten summiert. Gleichung 3 zeigt, wie aus den winkelabhängigen Teilspannungen eine feldstärkeproportionale Gesamtspannung  $U$  abgeleitet wird, die nicht mehr von der Einfallsrichtung der Welle abhängt.

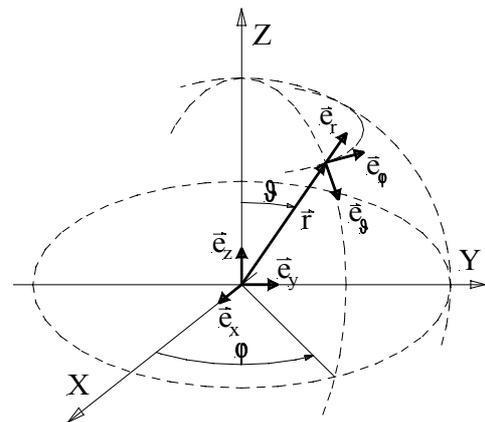


**Bild 1:** Messung der Feldstärkekomponenten  $U_x(\varphi)$  in a) und  $U_y(\varphi)$  in b)

$$U(\varphi) = \sqrt{U_x^2(\varphi) + U_y^2(\varphi)} = \sqrt{\frac{E^2 \cdot f_x^2}{AF^2} + \frac{E^2 \cdot f_y^2}{AF^2}} = \frac{E}{AF} \sqrt{\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi} = U \quad (3)$$

Dieses Prinzip funktioniert nur dann perfekt, wenn die Richtcharakteristik der Antenne, der eines Hertzschen Dipols entspricht.

Die Beschreibung der Richtcharakteristik im dreidimensionalen Fall erfolgt zweckmäßiger Weise im Kugelkoordinatensystem entsprechend Bild 2. Dabei wird die Richtcharakteristik einer Antenne polarisationsabhängig mittels  $f_\vartheta(\vartheta, \varphi)$  und  $f_\varphi(\vartheta, \varphi)$  beschrieben. Ein zusätzlicher Index beschreibt die Orientierung des Dipols im kartesischen Koordinatensystem. So gilt z.B.  $f_{\vartheta,x}(\vartheta, \varphi)$  für die Orientierung des Dipols in x-Richtung. Das Richtdiagramm der Überlagerung (Addition) der drei Einzelmessungen in Kugelkoordinaten ist in Gl. 4 dargestellt. Prinzipiell werden alle Richtdiagramme mit dem Maximalwert auf 1 normiert.



**Bild 2:** Kugelkoordinatensystem

$$f_\vartheta(\vartheta, \varphi) = \sqrt{f_{\vartheta,x}(\vartheta, \varphi)^2 + f_{\vartheta,y}(\vartheta, \varphi)^2 + f_{\vartheta,z}(\vartheta, \varphi)^2} \leq 1$$

$$f_\varphi(\vartheta, \varphi) = \sqrt{f_{\varphi,x}(\vartheta, \varphi)^2 + f_{\varphi,y}(\vartheta, \varphi)^2 + f_{\varphi,z}(\vartheta, \varphi)^2} \leq 1 \quad (4)$$

Für den Hertzschen Dipol folgt daraus der Idealfall völliger Isotropie

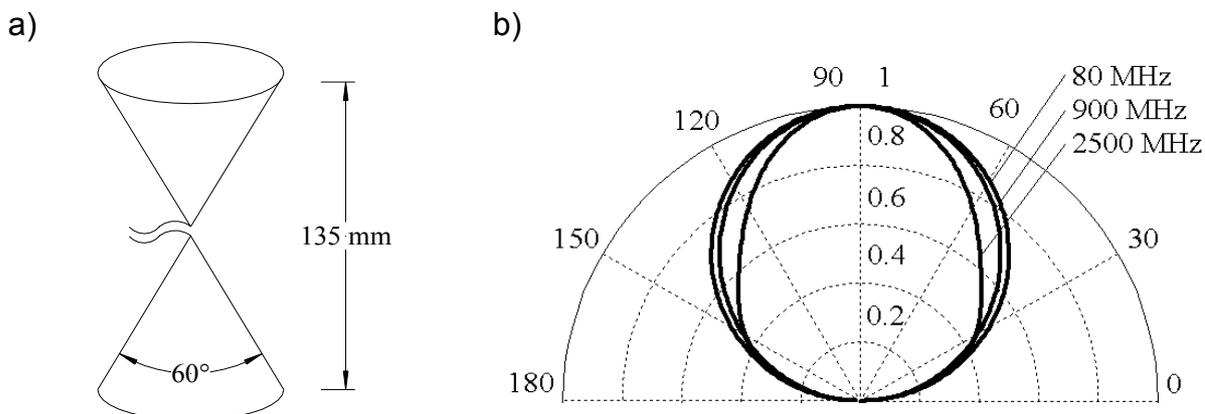
$$f_{\vartheta,ideal}(\vartheta, \varphi) = f_{\varphi,ideal}(\vartheta, \varphi) = 1 \quad (5)$$

### 3. Frequenzselektive Fehleranalyse der Add3D Methode

Für die Erklärung der Funktionsweise des Add3D Verfahrens wurde der Hertzsche Dipol verwendet. Zur Fehleranalyse des Messverfahrens kommt nun eine reale Antenne zur Anwendung. Wir verwenden eine konische Dipolantenne PCD 8250 (Bild 3a), die im Frequenzbereich 80 MHz bis 2.5 GHz eingesetzt werden kann. Für diesen Frequenzbereich wird auch die Fehlerabschätzung nach [6] vorgenommen. Dazu ist es nötig, die Isotropie und die Fehlanpassung genauer zu betrachten.

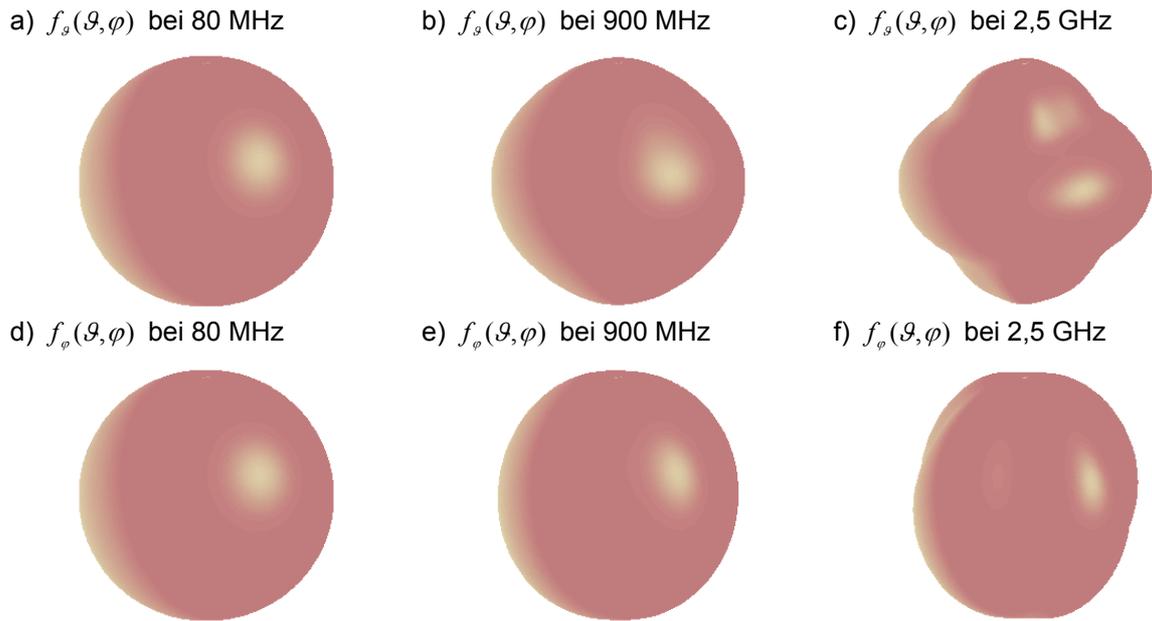
#### 3.1. Isotropie des Add3D-Messsystems

Die Richtcharakteristik der Messantenne wurde mittels Numerical Electromagnetic Code (NEC) simuliert. In Bild 3b ist das Ergebnis für verschiedene Frequenzen dargestellt. Bei tiefen Frequenzen ist das Richtdiagramm praktisch mit dem eines Hertzschen Dipols identisch. Bei 900 MHz ist eine Verformung sichtbar. Am oberen Ende des Frequenzbereiches ist die Abweichung des Richtdiagramms bereits deutlich ausgeprägt.



**Bild 3:** a) Abmessungen der PCD 8250 Antenne  
b) Richtdiagramm in der E-Ebene, jeweils auf 1 normiert

Unter Verwendung der berechneten Richtcharakteristik für die reale Messantenne werden nun entsprechend Gl. 4 die Richtcharakteristika der Überlagerungen der drei Einzelkomponenten für die gewählten Frequenzen berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 4, a-f dargestellt. Bei einer Frequenz von 80 MHz ist keine Abweichung von der Kugel erkennbar, bei 900 MHz ist sie erkennbar, und bei 2,5 GHz ist sie in beiden Polarisationsrichtungen deutlich ausgeprägt.



**Bild 4:** Richtcharakteristik des Add3D Messverfahren

Der relative Fehler  $F$  wird als Differenz von Messwert und wahren Wert, bezogen auf den wahren Wert ausgedrückt. Unter Berücksichtigung von Gl. 5 folgt

$$F(\vartheta, \varphi) = \frac{f(\vartheta, \varphi) - f_{Ideal}(\vartheta, \varphi)}{f_{Ideal}(\vartheta, \varphi)} = F(\vartheta, \varphi) = f(\vartheta, \varphi) - 1 \quad (6)$$

Unter der realistischen Annahme, dass der Einfallswinkel und die Polarisation des E-Feldes völlig zufällig sind, erhält man den wahrscheinliche Fehler  $u$  durch Mittelung der Fehlerquadrate über die Kugeloberfläche (Gl. 7).

$$u = \sqrt{\frac{\iint F(\vartheta, \varphi)^2 d\vartheta d\varphi}{4\pi}} \quad (7)$$

Aus den Gleichungen 4 und 6 ist ersichtlich, dass der Fehler nie positiv sein kann. Er weist daher ein unsymmetrisches Fehlerintervall auf. Diese Tatsache kann benutzt werden, um den Fehler durch Einführen eines Korrekturfaktors zu verringern. Dieser wird als Isotropiefaktor  $IF$  bezeichnet und entspricht dem Mittelwert der Richtcharakteristik über die Kugeloberfläche.

$$IF = \frac{\iint f(\vartheta, \varphi) d\vartheta d\varphi}{4\pi} \quad (8)$$

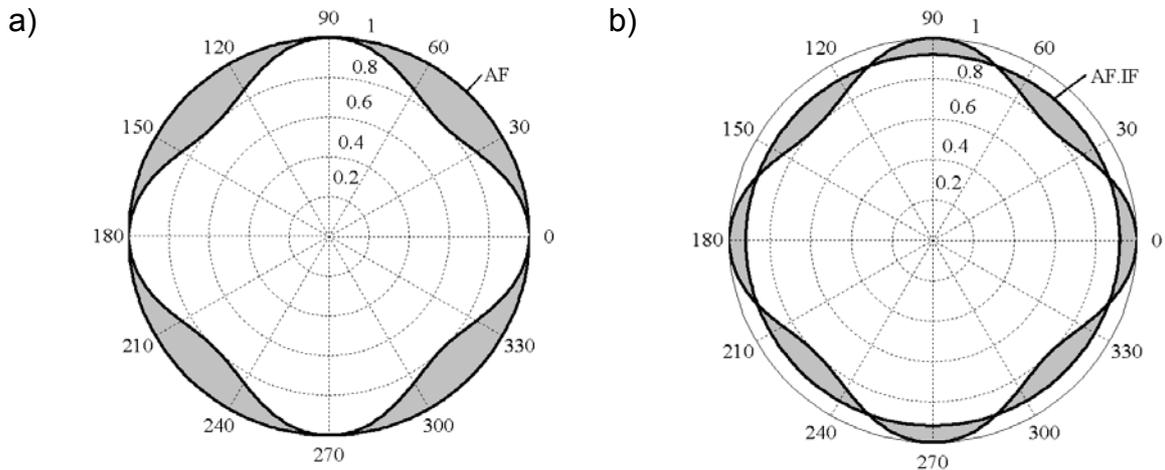
Damit kann die reduzierte Isotropieunsicherheit, die zur Berechnung der Messunsicherheit verwendet wird, nach Gl. 9 angegeben werden.

$$u_{ISO} = \sqrt{\frac{\iint (f(\vartheta, \varphi) - IF)^2 d\vartheta d\varphi}{4\pi}} \quad (9)$$

Der Isotropiefaktor wird entsprechend Gl. 10 berücksichtigt. Aus Gl. 1 und Gl. 10 folgt die für Add3D wichtige Gl. 11.

$$AF_{Add3D} = AF_{Antenne} \cdot IF \quad (10)$$

$$E = AF_{Add3D} \sqrt{U_X^2 + U_Y^2 + U_Z^2} \quad (11)$$



**Bild 5:** Darstellung der Unsicherheit bei gegebenem Richtdiagramm  
a) ohne  $IF$  und b) mit  $IF$

Bild 5 dient zur Veranschaulichung des Isotropiefaktors. Man erkennt, dass der Messfehler von  $[+0 \dots -0.2]$  auf  $[\pm 0.1]$  symmetriert wird. Das wirkt sich in einer kleineren Unsicherheit bei der Effektivwertbildung aus.

Zu beachten ist, dass die Isotropie  $I$  [dB], definiert in Gl. 12, durch die Maßnahme nicht beeinflusst wird. Bei der Berechnung des „Worst Case“ Fehlers ändert sich durch die Einführung des Isotropiefaktors nichts.

$$I = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{f_{Min}(\vartheta, \varphi)}\right) \quad (12)$$

Für die gewählte Antenne werden in Tabelle 2 die Isotropie  $I$ , der Isotropiefaktor  $IF$  und der Unsicherheitsbeitrag  $u_{ISO}$  dargestellt. Da die Ergebnisse für die beiden Polarisationen im allgemeinen unterschiedlich sind, wurde stets der größere Wert verwendet.

f [MHz]	$IF$ [dB]	$I$ [dB]	$u_{ISO} (AF_{Antenne})$ [dB]	$u_{ISO} (AF_{Add3D})$ [dB]
80	-0.0017	0.0033	0.0015	0.0010
450	-0.045	0.10	0.055	0.032
900	-0.22	0.51	0.26	0.16
1800	-0.84	2.15	0.94	0.63
2500	-0.70	1.76	0.82	0.56

**Tabelle 2:** Isotropieverhalten des Add3D Verfahrens

### 3.2. Einfluss stehender Wellen

Zufolge der Fehlanpassung von Antenne und Messempfänger kommt es auf dem Messkabel zu stehenden Wellen, die das Ergebnis beeinflussen. Der Unsicherheits-

beitrag wird nach [6] aus den zwei Reflexionsfaktoren entsprechend Gl. 13 berechnet.

$$u_{Steh} = \frac{2|\Gamma_1||\Gamma_2|}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

f [MHz]	VSWR Empfänger	VSWR PCD 8250	$\Gamma_1$	nur Kabel		Kabel mit 6dB Abschwächer	
				$\Gamma_2$	$u_{Steh}$ [dB]	$\Gamma_2$	$u_{Steh}$ [dB]
80	1.5	3	0,2	0,5	1,15	0,12	0,30
450	1.5	2,1	0,2	0,35	0,83	0,089	0,21
900	1.5	1,4	0,2	0,17	0,40	0,042	0,10
1800	1.5	1,1	0,2	0,047	0,11	0,012	0,029
2500	1.5	1,4	0,2	0,17	0,40	0,042	0,10

**Tabelle 3:** Unsicherheitsbeitrag zufolge von Stehwellen

Die Antenne besitzt bei tiefen Frequenzen einen größeren Reflexionsfaktor, der durch das kapazitive Verhalten des sehr kurzen Dipols zustande kommt. Durch Verwenden eines Dämpfungsgliedes unmittelbar am Antennenausgang kann das Stehwellenverhältnis verbessert werden. Die Verwendung eines 6 dB Abschwächers ist unter 700 MHz sinnvoll um die Unsicherheit zu reduzieren. In Tabelle 3 ist der Unsicherheitsbeitrag  $u_{Steh}$  unter Annahme eines typischen Empfänger VSWRs und des gemessenen VSWRs der Antenne für die ausgewählten Frequenzen berechnet.

### 3.3. Abschätzung der Gesamtunsicherheit

Die Unsicherheit der Feldstärkemessung wird durch folgende Einflussfaktoren bestimmt:

Symbol	Erklärung	Fehlerbeitrag
$u_{AF}$	Antennenfaktor Kalibrierunsicherheit in Hauptstrahlrichtung	Herstellerangabe 1 dB
$u_{ISO}$	Isotropie des Add3D Verfahrens	siehe Tabelle 2
$u_{Temp}$	Temperaturabhängigkeit (Antenne, Kabel) 0 .. +40°C	Abschätzung 0,6 dB
$u_{ORTHO}$	Winkelfehler des orthogonalen Dreibeins kleiner $\pm 2^\circ$	Abschätzung 0,12 dB
$u_{KD}$	Kabeldämpfung Kalibrierunsicherheit	Anwenderkalibr. 0.4 dB
$u_{Steh}$	Stehende Wellen zufolge Fehlanpassung zwischen Antenne und Messempfänger	siehe Tabelle 3
$u_U$	Unsicherheit in der Spannungsmessung des Messempfängers	Herstellerangabe 1 dB

**Tabelle 4:** Fehlerbeiträge

Die Erweiterte Unsicherheit (k=2, 95,5% Vertrauensniveau) des Add3D Verfahrens wird nach [6] entsprechend Gl. 14 mit logarithmischen Unsicherheitsbeiträgen berechnet.

$$U = 2\sqrt{u_{AF}^2 + u_{ISO}^2 + u_{Temp}^2 + u_{ORTHO}^2 + u_{KD}^2 + u_{Steh}^2 + u_{ME}^2} \quad (14)$$

Tabelle 5 zeigt die einzelnen, teilweise frequenzabhängigen Unsicherheitsbeiträge und die nach Gl. 14 berechnete Gesamtunsicherheit.

f [MHz]	$u_{AF}$	$u_{ISO}$	$u_{Temp}$	$u_{ORTHO}$	$u_{KD}$	$u_{Steh}$	$u_{ME}$	$U$
80	0.5	0.001	0.3	0.06	0.2	0.3 <sup>*)</sup>	0.5	1.7
450	0.5	0.031	0.3	0.06	0.2	0.21 <sup>*)</sup>	0.5	1.6
900	0.5	0.15	0.3	0.06	0.2	0.40	0.5	1.8
1800	0.5	0.58	0.3	0.06	0.2	0.11	0.5	2.0
2500	0.5	0.53	0.3	0.06	0.2	0.40	0.5	2.0

**Tabelle 5:** Messunsicherheit des Add3D-Messsystems in [dB].  
<sup>\*)</sup> mit 6dB Abschwächer

Die Messunsicherheit in der elektrischen Feldstärkemessung unter Verwendung der Add3D Methode mit einer PCD8250 Antenne und einem typischen Messempfänger liegt bei 2 dB und darunter.

## 4. Zusammenfassung

Für das Feldstärkemesssystem Add3D haben wir die Isotropie ermittelt und eine frequenzabhängige Fehlerrechnung im Bereich 80 MHz bis 2.5 GHz durchgeführt. Der "Worst Case" Fall der Isotropie tritt bei Verwendung der PCD 8250 Antenne bei 1800 MHz auf und beträgt 2.15 dB. Durch Einführung des Isotropiefaktors kann die Unsicherheit des Add3D Verfahrens reduziert werden. Die Gesamtmessunsicherheit bei Verwendung typischer Messgeräte ist höchstens 2 dB. Damit ist Add3D sehr gut geeignet um empfindliche, frequenzselektive und richtungsunabhängige Messungen der elektrischen Feldstärke im Bereich von Rundfunk und Mobilfunksendern reproduzierbar und mit bekannter Genauigkeit durchzuführen.

## 5. Literaturangabe

- [1] ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics 74 (4), pp. 494 - 522, 1998
- [2] Harald Haider, Wolfgang Müllner, Georg Neubauer: "Add3D, eine neue Technik für präzise, frequenzselektive Feldstärkemessungen z.B. für GSM Basisstationen", EMV-ESD, 2/2000, S.33
- [3] G. Thurocy: "RF Exposure from mobile phone base station in Hungary: Study within COST 244BIS short term mission on base station", BEMS 23<sup>rd</sup> Meeting, June 2001
- [4] H. Lehmann, P. Fritschi, B. Eicher, U. Knafl: "Measurements of the electric Field in rooms near mobile phone base stations", BEMS 23<sup>rd</sup> Meeting, June 2001
- [5] Santi Tofani, Piero Ossola: "Accuracy in Outdoor Isotropic Measurements of Multiple-Source, Multiple-Frequency EM Fields", IEEE Transaction on EMC, Vol. 34, No. 3, August 1992
- [6] EAL-R2: "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration", EAL Task Force, Edition 1, April 1997