

	Straßenfahrzeuge Erzeugung von genormten elektromagnetischen Feldern für die Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten im Frequenzbereich 20 kHz bis 1000 MHz Identisch mit ISO/TR 10305 : 1992	DIN 70305
Einsprüche bis 31. Jul 1995 Dieser Norm-Entwurf enthält die deutsche Übersetzung des Internationalen Technischen Berichts ISO/TR 10305 ICS 29.020; 43.040.10 Road vehicles - Generation of standard EM fields for calibration of power density meters from 20 kHz to 1000 MHz (ISO/TR 10305:1992) Véhicules routiers - Génération de champs électromagnétiques pour l'étalonnage des champmètres entre 20 kHz et 1000 MHz (ISO/TR 10305:1992) Die Internationale Norm ISO 10305:1992 "Road vehicles - Generation of standard EM fields for calibration of power density meters from 20 kHz to 1000 MHz" ist unverändert in diesen deutschen Norm-Entwurf übernommen worden. Anwendungswarnvermerk Dieser Norm-Entwurf wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt. Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren. Stellungnahmen werden erbeten an die Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE), Geschäftsstelle Frankfurt, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main. Fortsetzung Seite 2 bis 36 Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)		

Nationales Vorwort

Dieser Norm-Entwurf enthält die deutsche Übersetzung des Internationalen Technischen Berichts ISO/TR 10305, Ausgabe 1992, "Road vehicles - Generation of standard EM fields for calibration of power density meters from 20 kHz to 1000 MHz".

Der Internationale Technische Bericht wurde vom TC 22, "Straßenfahrzeuge", der Internationalen Normungsorganisation (ISO) erarbeitet und verabschiedet.

Für den vorliegenden Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium UK 767.13, "Elektromagnetische Verträglichkeit, Fahrzeuge", der Deutschen Elektrotechnischen Kommission im DIN und VDE (DKE) zuständig.

ANMERKUNG 1: In das Literaturverzeichnis wurde zusätzlich der an mehreren Stellen erwähnte Bericht von Herrn R.R. Bowman aufgenommen.

ANMERKUNG 2: Der Technische Bericht ISO/TR 10305 beinhaltet die angelsächsische Einheit "inch" und die Einheit "Zoll". Die Anwendung dieser Einheiten ist nach dem Gesetz über Einheiten im Meßwesen (vom 22. 2. 1985) in Deutschland nicht zulässig.

Anwender dieses Norm-Entwurfes müssen diese Einheiten daher in die entsprechenden SI-Einheiten übertragen.

Deutsche Übersetzung

Straßenfahrzeuge - Erzeugung von genormten elektromagnetischen Feldern für die Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten im Frequenzbereich 20 kHz bis 1000 MHz

Vorwort

Die ISO (Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitglieds Körperschaften). Die Erarbeitung internationaler Normen obliegt den Technischen Komitees der ISO. Jede Mitglieds Körperschaft, die sich für ein Thema interessiert, für das ein Technisches Komitee eingesetzt wurde, ist berechtigt, in diesem Komitee mitzuarbeiten. Internationale (staatliche und nichtstaatliche) Organisationen, die mit der ISO in Verbindung stehen, sind an den Arbeiten ebenfalls beteiligt. ISO arbeitet in allen Fragen der elektrotechnischen Normung eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Hauptaufgabe der ISO Technischen Komitees besteht in der Erstellung Internationaler Normen. In Ausnahmefällen kann ein Technisches Komitee die Erstellung eines Technischen Berichts einer der folgenden Arten empfehlen:

- Typ 1, wenn die notwendige Unterstützung für die Veröffentlichung einer Internationalen Norm trotz wiederholter Bemühungen nicht erreicht werden kann
- Typ 2, wenn das Thema einer schnellen Weiterentwicklung unterliegt, die eine weitere Verbreitung nötig macht
- Typ 3, wenn ein Technisches Komitee Daten gesammelt hat, die in ihrer Art von denen abweichen, die üblicherweise als Internationale Norm veröffentlicht werden (z.B. "Stand der Technik").

Technische Berichte Typ 1 und Typ 2 werden innerhalb von drei Jahren nach ihrer Veröffentlichung dahingehend überprüft, ob sie in eine Internationale Norm umgewandelt werden können. Technische Berichte des Typs 3 müssen nicht notwendigerweise überprüft werden, ehe die darin enthaltenen Daten als nicht mehr gültig oder nützlich angesehen werden.

ISO/TR 10305, der ein Technischer Bericht des Typs 3 ist, ist vom Technischen Komitee ISO/TC22, Straßenfahrzeuge, Unterkomitee 3, Elektrische und elektronische Ausrüstung, ausgearbeitet worden.

Dieser Technische Bericht dient ausschließlich der Information. Er zeigt den technischen Stand bei der Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten.

1 Anwendungsbereich

Dieser Technische Bericht beschreibt Verfahren zur Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten in Feldern hoher Intensität (Personengefährdung) im Frequenzbereich 20 kHz bis 1000 MHz. Er bezieht sich auf Straßenfahrzeuge.

2 Verfahren

Die empfohlenen Verfahren sind dem Schriftstück NBSIR 75-804, "Erzeugung von genormten elektromagnetischen Feldern für die Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten im Frequenzbereich 20 kHz bis 1000 MHz" (Ausgabe Januar 1975, revidiert), entnommen, das als Anhang wiedergegeben ist.

ANMERKUNG: Zum Zweck internationaler Normung hat der Verfasser dieses Schriftstücks die Bilder 5, 8 und 12 korrigiert.

3 Überarbeitung des Technischen Berichts

Es ist mit dem Nationalen Institut für Normung und Technologie vereinbart worden, daß das Technische Komitee ISO/TC 22 konsultiert wird, wenn das Schriftstück NBSIR 75-804 überarbeitet oder korrigiert wird.

Anhang

NBSIR 75-804

Erzeugung von genormten Feldern für die Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten im Frequenzbereich 20 kHz bis 1000 MHz

M. L. Crawford

Electromagnetic Division
Institute for Basic Standards
National Bureau of Standards
Boulder, Co 80302

Januar 1975

Abschließender Bericht

Erstellt für
die Koordinationsgruppe für Kalibrierung
Armee/Marine/Luftwaffe

US Department of Commerce, Frederick B. Dent, Secretary

National Bureau of Standards, Richard W. Roberts, Director

Inhalt

	Seite
Vorwort	8
1 Einleitung	8
2 Techniken zur Erzeugung von Standard-Prüffeldern	9
2.1 Streifenleitung (Parallelplatten-TLS)	9
2.2 Streifenleitung (Paralleldraht-TLS)	9
2.3 TEM-Zellen	10
2.4 Richtantennen	10
3 Beschreibung, Konstruktion und Prüfung der TEM-Zellen (empfohlenes Verfahren zur Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten von 20 kHz bis 500 MHz)	12
3.1 Aufzeichnung des Feldes innerhalb der Zellen.....	14
4 Meßverfahren	14
5 Fehleranalyse für die Normung des Feldes in den Zellen	16
6 Vergleich von Parallelplattenleitung, TEM-Zellen, OEG und Standard-Hornantenne	17
7 Zusammenfassung und Schlußfolgerung	19
Literaturhinweise	21

Bilder

Bild 1	Typische Parallelplatten-Streifenleitung nach MIL-STD-462	22
Bild 2	Blockdiagramm einer Streifenleitung (Paralleldrahteinrichtung)	23
Bild 3	TEM-Zellen und dazugehörige Einrichtungen zur Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten	24
Bild 4	Blockdiagramm zur Prüfung von Leistungsdichtemeßgeräten bei Verwendung von Richtantennen	25
Bild 5	Kurze Backfire-Antenne mit Strahlungsfeldverteilung	26
Bild 6	Vierelement-Dipolantenne	27
Bild 7	Leistungsdichtemeßsonde vor einem Wellenleiter mit offenem Ende (OEG)	28
Bild 8	Konstruktion einer rechteckigen TEM-Zelle	29
Bild 9	Querschnitt durch eine rechteckige Übertragungsleitung	30
Bild 10	TDR-Aufzeichnung der Impedanzverteilung in einer leeren Zelle	31
Bild 11	Eingangs-Spannungstehwellenverhältnis (VSWR) der leeren Zelle, $b \times w = 25 \text{ cm} \times 42 \text{ cm}$	32
Bild 12	Relative Verteilung des elektrischen Feldes in der Zelle. Querschnitt durch die obere Hälfte in der Mitte der Zelle	33
Bild 13	Blockdiagramm eines TEM-Zellen-Meßsystems zur Prüfung und Kalibrierung von HF-Leistungsdichtemeßgeräten (1 MHz bis 500 MHz)	34
Bild 14	Blockdiagramm eines TEM-Zellen-Meßsystems zur Prüfung und Kalibrierung von HF-Leistungsdichtemeßgeräten (20 kHz bis 1 MHz)	35
Bild 15	Kunststoffturm als Unterbau für eine Sonde vor einer Standard-Hornantenne auf dem NBS Prüfgelände	36

Vorwort

Dieser Bericht beschreibt Verfahren zur Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten, die vom Verteidigungsministerium zur Messung von HF-Feldern hoher Intensität (Personengefährdung) im Frequenzbereich 20 kHz bis 1000 MHz benutzt werden. Er berichtet über den Teil der Arbeit der Koordinierungsgruppe für Kalibrierung des Verteidigungsministeriums, der den Frequenzbereich 20 kHz bis 20 GHz umfaßt.

Verschiedene Verfahren für die Erzeugung eines Standardfeldes, wie Parallelplatten- und Paralleldraht-Streifenleitungen, TEM-Zellen, verschiedene Richtantennen und Wellenleiter mit offenen Enden (OEG), wurden untersucht. Das Hauptaugenmerk in diesem Bericht ist auf TEM-Zellen gerichtet, die für den Frequenzbereich 20 kHz bis 500 MHz empfohlen werden. Einzelheiten der Konstruktion und der Entwicklung und eine Fehleranalyse im Zusammenhang mit dem TEM-Zellen-Meßsystem werden angegeben. Leistungsdichtewerte können in den Zellen von einigen wenigen $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ bis $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ mit Fehlergrenzen von $\pm 1 \text{ dB}$ erzeugt werden.

Außerdem werden eingeschränkte Informationen gegeben zur Benutzung des OEG, zur empfohlenen Technik für den Frequenzbereich 500 MHz bis 2,6 GHz, und über die Ergebnisse von Vergleichen zwischen Parallelplatten-Streifenleitungen, TEM-Zellen, OEG, und Standard-Hornantennen.

Schlüsselwörter: Gefährliche Feldstärken, Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten, TEM-Zelle.

1 Einleitung

In militärischen und zivilen Kreisen wachsen Bedenken hinsichtlich der Effekte von nicht-ionisierender (HF-)Strahlung auf Einrichtungen und Personal. Zum Beispiel kann möglicherweise gefährliche elektromagnetische (EM-)Strahlung in der Nähe von Radar- oder Radioantennen auftreten, oder durch Elektrogeräte wie Mikrowellenherde erzeugt werden. Zur Überwachung der Stärke des elektromagnetischen Feldes werden verschiedene Typen von käuflichen Meßgeräten verwendet. Dieser Bericht beschreibt Arbeiten zur Ausarbeitung und Bewertung der Instrumentierung und einheitlicher Verfahren zur Erzeugung von bekannten HF-Feldern zur Kalibrierung dieser Strahlungsmeßgeräte, die vom DoD/CCG unterstützt worden sind.

Zweck der Arbeiten war es, optimale Verfahren zur Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten zu entwickeln, die vom DoD zur Messung von Freiraum-HF-Feldern (personengefährdende Werte) über den Frequenzbereich 20 kHz bis 20 GHz benutzt werden. Die erforderlichen Leistungsdichtewerte sind etwa 1 bis $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ oder elektrische Feldstärken von 60 bis 600 V/m. Die gewünschte Kalibrierengenauigkeit beträgt $\pm 1 \text{ dB}$. Dieser Bericht beschreibt Verfahren für die Anwendung unter 1000 MHz mit Betonung der TEM-(Transversal Electromagnetic Mode)Zelle, die für den Frequenzbereich 20 kHz bis 500 MHz empfohlen wird. Der begleitende Bericht beschreibt mit mehr Einzelheiten die Verfahren, die im Frequenzbereich 20 kHz bis 500 MHz angewendet werden sollten.

Es wurden verschiedene Verfahren untersucht und hinsichtlich Einfachheit, Genauigkeit und Kosten für die Wiederholbarkeit der Meßverfahren bewertet. Diese Verfahren werden kurz im Anhang 2 dieses Berichts beschrieben und enthalten: (a) die Erzeugung eines homogenen Feldes zwischen zwei parallelen leitenden Platten oder zwei parallelen Drähten, (b) die Erzeugung eines homogenen Feldes in einer TEM-Zelle oder einem Wellenleiter, (c) die Erzeugung eines berechenbaren Feldes vor Richtantennen wie Standard-Hornantenne oder Wellenleiter mit offenem Ende (OEG). Die Vorteile und Einschränkungen der verschiedenen Verfahren werden beschrieben, um die Wahl der empfohlenen Techniken (z.B. TEM-Zelle und OEG) zu rechtfertigen. Abschnitte 3, 4 und 5 beschreiben das TEM-Zellen-Verfahren in allen Einzelheiten, weil es für einen großen Teil des Frequenzbereichs 20 kHz bis 500 MHz empfohlen wird. Einzelheiten für die Benutzung der OEG über den Frequenzbereich 500 MHz bis 2,6 GHz werden von Bowman [9] in einem weiteren Bericht beschrieben und werden deshalb hier nicht wiederholt. Dennoch werden einige Hintergrundinformationen gegeben, die zur Auswahl des OEG führten, zusammen mit Ergebnissen einiger Vergleiche zwischen Parallelplattenleitungen, TEM-Zellen, OEG und Standard-Hornantennen. Diese Messungen sind mit überlappenden Frequenzen gemacht worden, um das Vertrauen in das jeweilige Verfahren zu stärken und den Nachweis der Erfüllung der Genauigkeitsanforderungen zu führen, die im

Abschnitt über die Fehleranalyse in diesem Bericht enthalten sind. Diese Ergebnisse sind in Abschnitt 4 enthalten und zeigen hervorragende Übereinstimmung innerhalb der festgelegten Fehlergrenzen ± 1 dB, die diesen besonderen Meßtechniken zuzuschreiben sind.

2 Techniken zur Erzeugung von Standard-Prüffeldern

2.1 Streifenleitung (Parallelplatten-TLS)

Diese Technik wird seit einiger Zeit für Untersuchungen von EM-Pulsen und für die Prüfung der Störfestigkeit elektronischer Ausrüstungen benutzt. Verschiedene Autoren haben die Technik im Detail beschrieben [1], [2], deshalb wird hier nur eine kurze Beschreibung gegeben. Im wesentlichen wird das Prüffeld zwischen den leitenden Ebenen einer Parallelstreifen-TLS (siehe Bild 1) erstellt, die mit ihrer charakteristischen Impedanz abgeschlossen ist und durch eine Hochleistungs-HF-Quelle über ein Impedanzanpassungsnetzwerk gespeist wird. Statische Feldanalysen in [1] zeigen, daß die TEM-Mode einer Parallelplatten-Streifenleitung eine ebene Welle im freien Raum über einen wesentlichen Teil ihres inneren Bereichs simulieren kann.

Die Impedanz der Leitung, unter Vernachlässigung parasitärer Randeffekte, wird gegeben durch

$$Z_0 \cong 377 \cdot \frac{h}{w} \text{ in } \Omega \quad (1)$$

wobei h und w in Bild 1 angegeben werden. Das elektrische Feld wird gegeben durch

$$E_v = \frac{V}{h} \text{ in V/m} \quad (2)$$

In der gezeigten Leitung können Feldstärken über 200 V/m mit 100-W-Generatoren erreicht werden.

Dieses System kann bei Frequenzen bis zu wenigen hundert MHz mit einem guten Genauigkeitsgrad benutzt werden, wenn der Prüfling oder die Feldsonde klein ist ($< h/5 \cdot w/5$). Wenn aber die Frequenz steigt und h in die Nähe von $\lambda/4$ kommt, strahlt die Leitung stark an ihren offenen Seiten. Dies erzeugt Störungen, die die Messung selbst beeinflussen, das Prüfpersonal gefährden oder andere Messungen, die innerhalb des betroffenen Bereichs gemacht werden, beeinträchtigen können. Es treten immer auch höhere Harmonische auf, wenn der Abstand der Platten $\lambda/4$ übersteigt. Diese Moden verformen das HF-Feld und begrenzen die Genauigkeit der Bestimmung des unbeeinflussten Feldes. Die Hauptnachteile sind dann die Größenbeschränkungen, die durch die obere nutzbare Prüffrequenz und das Fehlen einer Abschirmung zur Verhinderung von Strahlung erzwungen werden. Auch muß die Impedanz des Systems sorgfältig angepaßt sein, und die Maße des Prüflings dürfen ($h/5 \cdot w/5$) nicht überschreiten. Andernfalls können starke stehende Wellen im Prüfbereich auftreten, und das elektrische Feld zwischen dem Prüfling und den Platten wird wesentlich von den Werten abweichen, die auf der Berechnung des Feldes aufgrund der zwischen den Platten gemessenen HF-Spannung beruhen. Die Herstellkosten für eine Leitung, die Prüflinge bis etwa 10 cm Größe bei Frequenzen bis 100 MHz zu messen erlaubt, sind minimal. Kosten der Teile und Arbeitslöhne sollten 2000 \$ bis 3000 \$ nicht überschreiten.

Eine Parallelplattenantenne wurde bei NBS erstellt und bei 15 MHz zur Kalibrierung einer Dipolsonde benutzt, wobei Vergleiche mit ähnlichen Kalibrierungen unter Benutzung einer TEM-Zelle angestellt wurden. Die Ergebnisse dieser Vergleiche sind im Abschnitt 6 enthalten. Die Fehler des Parallelplatten-TLS-Verfahrens sind ähnlich denen, die bei der Untersuchung der TEM-Zelle ermittelt wurden und sollten innerhalb der gewünschten Kalibrierengenauigkeit von ± 1 dB liegen.

2.2 Streifenleitung (Paralleldraht-TLS)

Diese Technik ist der Parallelplatten-Streifenleitung sehr ähnlich, außer daß sie anstelle von elektrisch symmetrischen oder unsymmetrischen Platten elektrisch symmetrische Drähte benutzt. Da typische Leistungsdichte-Meßsonden klein sind, kann auch der Abstand zwischen den Leitern einer Paralleldraht-TLS

klein gehalten werden, wodurch diese Technik für die Erzeugung eines Standardprüffeldes geeignet erscheint [3]. Das Feld mitten zwischen den Leitern ist näherungsweise homogen, wenn der Drahtdurchmesser deutlich geringer ist als der Abstand zwischen den Leitern, und ist gegeben durch

$$E_v \cong \frac{377}{\pi \cdot d} \cdot |I_l| \quad (3)$$

wobei I_l der Strom in den Leitern und d die Hälfte des Abstands zwischen den beiden Leitern der TLS ist. Die charakteristische Impedanz einer offenen Zweidrahtleitung in Luft ist gegeben als

$$Z_0 = 120 \cosh^{-1} \frac{2d}{a} \quad (4)$$

wobei d oben definiert ist und a der Leiterdurchmesser ist. Der Strom in der Leitung I_l wird bestimmt, indem die Leitung mit ihrer charakteristischen Impedanz (etwa 600 Ω) abgeschlossen wird, der Widerstand R des Abschlusses und die in R umgesetzte Leistung genau gemessen wird und unter Benutzung der Gleichung

$$|I_l| = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (5)$$

Ein Blockdiagramm der Streifenleitung und der dazugehörigen Ausrüstung wird in Bild 2 dargestellt. Die Thermosäule wird benutzt, um den Aufheizeffekt der HF-Leistung im Abschlußwiderstand mit einer äquivalenten Gleichstromleistung zu vergleichen, die mit dem Gleichstrom-Spannungsmeßgerät gemessen wird.

Diese Technik hat im wesentlichen dieselben Nachteile wie die Parallelplatten-Leitung mit dem zusätzlichen Nachteil einer geringeren Feldhomogenität; es wurde deshalb darauf verzichtet, sie für die Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten weiterzuentwickeln.

2.3 TEM-Zellen

Dieses Verfahren benutzt eine TEM-Zelle, die als angepaßtes 50- Ω -Netzwerk arbeitet (siehe Bild 3). Ein berechenbares, homogenes TEM-Feld wird in der Zelle bei der gewünschten Prüffrequenz erzeugt, indem HF-Energie durch die Zelle von einem Sender eingekoppelt wird, der mit dem Eingang der Zelle verbunden ist. Ein (reflexionsfreier) 50- Ω - Abschluß wird mit dem Ausgang der Zelle verbunden. Dieses Verfahren arbeitet im wesentlichen wie eine Parallelplattenleitung, wobei es aber den großen Vorteil hat, keine Energie in den umgebenden Raum abzustrahlen, d.h. das EM-Feld bleibt innerhalb der Zelle. Sie ist äußerst breitbandig in der Frequenz, wobei die einzige Begrenzung in der Wellenleiter-Multimodefrequenz liegt, die mit der Größe der Zelle zusammenhängt. Die Zellen sind billig herzustellen (etwa 3000 \$ je Zelle), und die Benutzung von teuren echofreien Räumen oder Schirmräumen ist nicht erforderlich. Die Zellen können benutzt werden, um bekannte Feldstärkewerte von unter 1 V/m bis 600 V/m mit Fehlergrenzen von $\pm 1,0$ dB zu erzeugen. Diese Technik erwies sich als das optimale Verfahren zur Erzeugung von Standardfeldern zur Kalibrierung von Leistungsdichtemeßgeräten bei Frequenzen unterhalb von etwa 500 MHz. (Einzelheiten dieses Verfahrens sind in den Abschnitten 3 bis 5 enthalten.) Bei Frequenzen über 500 MHz bietet die kleine physikalische Größe der Zelle (erforderlich, um Vielfachmoden zu vermeiden) einen zu kleinen Prüfbereich, um typische im Handel erhältliche Einheiten zu prüfen. Dann müssen andere Verfahren zur Erzeugung von bekannten Feldern benutzt werden.

2.4 Richtantennen

Bei Frequenzen oberhalb von einigen wenigen 100 MHz erwies sich die Strahlung einer Richtantenne als die am besten anwendbare Technik zur Erzeugung eines genau bekannten CW-Kalibrierfeldes. Die Sonde wird auf einem Halter montiert und vor der Antenne ausgerichtet. Messungen werden durchgeführt, indem die Eingangsleistung zu der Antenne verändert wird, bis der gewünschte Wert der Leistungsdichte abgelesen wird. Der genormte Prüfwert wird dann berechnet nach der Gleichung

$$\frac{E^2}{377} = P_d = \frac{P_n \cdot G_p \cdot NZC}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \text{ in W/m}^2 \quad (6)$$

wobei:

P_n die Nettoleistung in die Antenne,

G_p der Antennengewinn,

NZC der Nahfeldkorrekturfaktor, der eine Funktion von r ist,

r der Abstand zwischen der Antenne und der zu prüfenden Sonde und

E das Standardprüffeld in V / m

ist.

Korrekturen der Mehrwegeausbreitung innerhalb der Kammer können gemacht werden, indem die Anzeigen des Leistungsdichtemeßgerätes, P_{indic} , als Funktion von r aufgezeichnet werden, während die Eingangsleistung der Antenne konstant gehalten wird. Das Verhältnis des Korrekturfaktors, P_d / P_{indic} (in dB), wird dann als Funktion von r berechnet und gemittelt, um den korrigierten Wert zu ergeben.

Vier alternative Antennen wurden untersucht:

- a) kalibrierte einzel- oder mehrfachgespeiste Backfire-Antennen,
- b) eine Vierelement-Dipolanordnung mit berechenbarem Gewinn,
- c) pyramidenförmige Standard-Hornantennen und
- d) kalibrierte "Kurzhörner" oder Wellenleiter mit offenem Ende.

Kurze Backfire-Antennen, wie in Bild 5 gezeigt, wurden wegen ihres relativ hohen Gewinns berücksichtigt [≥ 15 dB], weil dadurch weniger Leistung der Quelle erforderlich ist. Zwei kurze Backfire-Antennen nach Bild 5 wurden bei NBS für Mittenfrequenzen von etwa 500 MHz bzw. 1,0 GHz konstruiert. Der Verlauf ihres Gewinns wurde als eine Funktion der Frequenzänderungen um ihre spezielle Entwurfsfrequenz bestimmt, und es ergab sich, daß er ziemlich stark von Länge und Abstand der speisenden Dipolelemente abhängig war. Dieser Antennentyp ist als Standardantenne im VHF-UHF-Bereich sehr gut geeignet, es sind aber weitere Anstrengungen zu seiner vollständigen Beschreibung erforderlich. Der erforderliche Meßabstand zwischen der Antenne und dem Feldmeßgerät, das kalibriert werden soll (auf der Grundlage eines gegebenen Vielfachen von a^2 / λ , wobei a der Durchmesser des Reflektors ist), ist für diese Antenne groß, wodurch ein Teil des Vorteils des höheren Gewinns wieder verlorengeht. ¹⁾ Im Augenblick ist die Backfire-Antenne nur als ein Übergangsstandard brauchbar, weil der Gewinn auf der Hauptstrahlungsachse nicht direkt berechnet werden kann.

Die Vierelement-Dipolantennenanordnung über einer Masseplatte (siehe Bild 6) hat andererseits erheblichen Gewinn und kann auch mathematisch beschrieben werden [5]. Augenblicklich wird diese Antenne bei NBS sorgfältig untersucht, um ihre Eignung für die Erzeugung berechenbarer Felder im Frequenzbereich 500 MHz bis 2000 MHz zu ermitteln. Diese Antenne hat aber auch einen großen Öffnungswinkel, ihr Gewinn ist stark frequenzabhängig, und sie ist aufgrund ihres Gewichts und ihrer Größe schwierig zu handhaben. Sowohl diese wie auch die Backfire-Antenne sind eher für die Erzeugung von Feldern in größeren Prüfbereichen geeignet, als sie für die Feldmeßsonden erforderlich sind.

Genau beschriebene (Kalibrierung des Gewinns auf der Achse $\leq 0,3$ dB) pyramidenförmige Standard-Hornantennen sind für Frequenzen über einigen hundert Megahertz im Handel erhältlich. Sie haben jedoch auch den Nachteil, für Frequenzen unterhalb 2,6 GHz groß und unhandlich zu sein und darüberhinaus Felder über größere Prüfbereiche zu erzeugen, als sie für die Feldmeßsonden erforderlich sind. Ihre Größe und die daraus resultierende große Meßentfernung a^2 / λ , die für die Minimierung des Nahfeld-Korrekturfehlers erfor-

derlich ist, machen Messungen in Gebäuden schwierig, wenn nicht unmöglich. Standardfelder wurden bei 500, 750 und 1000 MHz mit Standard-Hornantennen in einem großen Freifeldprüfgelände zum Vergleich mit TEM-Zellen und OEG-Strahlern erzeugt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind im Abschnitt 6 enthalten. Für routinemäßige Kalibrierungen von Feldmeßsonden bei Frequenzen unterhalb 2,6 GHz wird jedoch die Benutzung von Standard-Hornantennen für nicht praktisch erachtet.

Die OEG (siehe Bild 7) ist beträchtlich kleiner als jede der drei anderen betrachteten Antennentypen und wurde als die bevorzugte Lösung für die Kalibrierung kleiner Sonden im Frequenzbereich 500 MHz bis 2,6 GHz ausgewählt. Dafür gibt es mehrere Gründe:

- 1) die kleine Apertur bedeutet, daß weniger Oszillatorleistung benötigt wird;
- 2) das Vor-/Rück-Verhältnis ist trotz der geringen Richtwirkung der OEG zufriedenstellend;
- 3) der gesamte Frequenzbereich von 500 MHz bis 2,6 GHz läßt sich mit im Handel erhältlichen rechteckigen Wellenleitern mit genau gestuften Dimensionen abdecken, die Messungen in einem Frequenzband erlauben, die die Grundlage für die Kalibrierung innerhalb dieses Frequenzbandes bilden;
- 4) mindestens längs der Hauptstrahlungsachse ist die Rückstreuung von Feldern, die auf die OEG einfallen, ziemlich gering;
- 5) während der Reflexionskoeffizient der OEG ziemlich groß ist, ist er doch klein genug ($< 2,1$ VSWR), um direkt mit vielen im Handel erhältlichen Verstärkern mit Wanderwellenröhren (TWT) oder Oszillatoren verbunden zu werden, ohne den Oszillator zu schädigen;²⁾
- 6) der Gewinn und die Nahfeldkorrektur für OEG sind glatte und fast lineare Funktionen der Frequenz;
- 7) die relativ kleinen Abmessungen der OEG erleichtern ihre Montage, Ausrichtung und Handhabung.

Vollständige, sehr genaue Messungen des Gewinns der OEG (unter Benutzung eines WR430) wurden für dieses Projekt durchgeführt. Außerdem wurden die obigen Behauptungen 2), 4), 5) und 6), die nicht offensichtlich sind, experimentell gesichert. Einzelheiten dieser Prüfungen, zusammen mit Gleichungen und Graphiken für den Gewinn und für angenäherte Nahfeldkorrekturen für die Wellenleitergrößen WR1500, WR975, WR650 und WR430, werden von Bowman [9] angegeben. Sein Bericht wird auch eine Fehleranalyse enthalten und das Meßverfahren zur Benutzung eines OEG und eines Standardhornstrahlers zur Erzeugung eines Standardfeldes beschreiben, die deshalb hier nicht wiederholt werden.

Die relativ geringe Richtwirkung der OEG bewirkt eine starke Ausleuchtung der umgebenden Prü fzelle, die dann eine relativ hohe Rückstreuung in der Prü fzelle bewirkt. Berechnungen zeigen jedoch, daß dieser Effekt durch die Tatsache, daß der Prü fling viel näher zu dem Strahler mit seiner geringen Richtwirkung gebracht werden kann, als zu einem Strahler mit hoher Richtwirkung, mehr als kompensiert wird. Dies wurde dadurch bestätigt, daß die Sonde entlang der Hauptstrahlungsachse bewegt wurde und die Störungen durch Mehrwegeinterferenz (MPI) beobachtet wurden. Trotz der geringen Größe unserer Prüfkammer (etwa 3,5 m x 3,5 m x 5 m) und der Tatsache, daß unser Absorbermaterial nicht das beste war, das man bekommen kann, waren die MPI-Störungen geringer als $\pm 0,2$ dB für alle Frequenzen, wenn man die OEG-Strahler benutzte. Diese Messungen wurden mit einem Feldmeßgerät gemacht, dessen Empfangscharakteristik im wesentlichen isotrop war. Deshalb sollten diese MPI-Störungen das Maximum dessen sein, was in irgendeiner Kammer von hoher Qualität gemessen wird, deren Maße größer oder gleich 3,5 m x 3,5 m x 5 m sind, wenn nicht eine Sonde kalibriert wird, deren maximale Empfangscharakteristik nicht auf den Strahler zu gerichtet ist.

¹⁾ Um starke elektromagnetische Felder in einem kleinen Bereich für die Kalibrierung von EM-Meßsonden mit einem Minimum von Oszillatorenergie zu erzeugen, muß das Hauptaugenmerk der Apertur des Strahlers gelten. Es kann leicht gezeigt werden (siehe den Bericht von R. R. Bowman [9]), daß für die üblichen Antennenkonstruktionen und für einen Abstand, der ein Vielfaches von a^2 / λ ist, wobei a die größere Dimension der Apertur des Strahlers ist, die Feldintensität für eine gegebene Eingangsleistung ein Maximum ist, wenn die Aperturfläche ein Minimum ist.