

	DIN EN 61000-4-21 (VDE 0847-4-21)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE
ICS 33.100.01	<div>Entwurf</div>	Einsprüche bis 2010-09-30 Vorgesehen als Ersatz für DIN EN 61000-4-21 (VDE 0847-4-21):2004-08
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-21: Prüf- und Messverfahren – Verfahren für die Prüfung in der Modenverwirbelungskammer (IEC 77B/619/CDV:2009); Deutsche Fassung FprEN 61000-4-21:2009		
Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test methods (IEC 77B/619/CDV:2009); German version FprEN 61000-4-21:2009		
Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-21: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes d'essai en chambre réverbérante (CEI 77B/619/CDV:2009); Version allemande FprEN 61000-4-21:2009		
Anwendungswarnvermerk		
Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2010-07-12 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		
<ul style="list-style-type: none">– vorzugsweise als Datei per E-Mail an dke@vde.com in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden– oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.		
Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.		
Gesamtumfang 117 Seiten		
DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE		

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Nationales Vorwort

Die Deutsche Fassung des europäischen Dokuments FprEN 61000-4-21:2009 „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-21: Prüf- und Messverfahren – Verfahren für die Prüfung in der Modenverwirbelungskammer“ (Entwurf in der Umfrage) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dem entsprechend ist das internationale Dokument IEC 77B/619/CDV:2009 „Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test methods“ unverändert in den Entwurf FprEN 61000-4-21:2009 übernommen worden.

Das internationale Dokument wurde vom SC 77B „High frequency phenomena“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet. Das SC A „Radio interference measurements and statistical methods“ des Internationalen Sonderausschusses für Funkstörungen (CISPR) wurde in die Erarbeitung einbezogen.

Bei der Abstimmung zu dem Europäischen Schluss-Entwurf bei CENELEC und dem Internationalen Schluss-Entwurf bei IEC [Final Draft International Standard (FDIS)] sind jeweils nur „JA/NEIN“-Entscheidungen möglich, wobei „NEIN“-Entscheidungen fundiert begründet werden müssen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Änderungen gegenüber der vorhergehenden Norm DIN EN 61000-4-21 (VDE 0847-4-21):2004-08 sind am Rand mit einem senkrechten Strich gekennzeichnet.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium UK 767.3 „Hochfrequente Störgrößen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig. Das UK 767.4 „Geräte und Verfahren zum Messen von elektromagnetischen Aussendungen“ wurde in die nationale Behandlung dieses Projekts einbezogen.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 61000-4-21 (VDE 0847-4-21):2004-08 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Änderung von Begriffsdefinitionen und Ergänzung der Begriffe 3.1.12 bis 3.1.16 im Abschnitt 3 „Begriffe“;
- b) Änderung von Kalibrierung in Validierung;
- c) Straffung des Abschnitts 4 „Allgemeines“ einschließlich Änderung der Beispiele für gewollte als auch ungewollte Strahlungsquellen;
- d) Ergänzungen im Abschnitt 5 „Prüfumgebungen und Beschränkungen“;
- e) Streichung der Angabe zur Geschwindigkeit des automatischen Frequenzdurchlaufs von HF-Signalgeneratoren im Abschnitt 7 „Prüfeinrichtung“;
- f) Ergänzung der Anmerkungen 1 und 2 und des Warnhinweises im Abschnitt 8 „Validierung der Kammer“ sowie Streichung der Ausführungen im letzten Spiegelstrich für den Fall, dass die Zeitkonstante größer als das 0,4fache der Pulsweite ist;
- g) Ergänzung einer Anmerkung im Abschnitt 10 „Prüfergebnisse, Prüfbericht und Prüfbedingungen“;
- h) Ergänzung von A.1 und Einführung von weiteren Zwischenüberschriften; Streichung von Hinweisen, die sich auf Einzelheiten des Entwurfs von Modenverwirbelungskammern beziehen;

- i) Einführung von weiteren Zwischenüberschriften in Anhang B;
- j) Ergänzung der Anmerkung 4 in B.1.2 und einem Hinweis zur Einhaltung eines Mindestabstands zwischen Antenne und Sonde in der nun als Anmerkung 5 nummerierten der Anmerkung;
- k) Vereinheitlichung der in Tabelle B.1 angegebenen Anzahl der für die Validierung und Prüfung empfohlenen Messwerte auf 12 Werte;
- l) Einführung von weiteren Zwischenüberschriften in Anhang C und Ergänzung der Festlegungen;
- m) Übernahme des Inhalts der Anmerkung 4 zu Bild D.1 in einen normativen Absatz unter Abschnitt D.1;
- n) Ergänzung der Abschnitte E.7 bis E.9 und Änderung der Nummer des bisherigen Abschnitts E.7 in E.10;
- o) Ergänzung des Bilds E.2;
- p) Ergänzung der Anmerkung 3 in Abschnitt G.1;
- q) Ergänzung in I.1, dass die Antenneneffektivität mit Hilfe des Abstrahlungswiderstandes und des Verlustwiderstandes ausgedrückt werden kann, und der Anmerkung 1;
- r) Streichung des Bilds J.4;
- s) Ergänzung des Anhangs K zur Messunsicherheit.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnitsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
—	IEC 60050-121:1998	*)	—
—	IEC 60050-161:1990 + A1:1997 + A2:1998	*)	—
—	IEC 60050-712:1992	*)	—
ENV 13005:1999	ISO/IEC Guide to the expression of uncertainty in measurement:1995	DIN V ENV 13005:1999-06	—
EN 55016-1-1:2010	IEC/CISPR 16-1-1:2010	DIN EN 55016-1-1 (VDE 0876-16-1-1):2010-xx	VDE 0876-16-1-1

*) „Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Deutsche Ausgabe“, Online-Zugang: <http://www.dke.de/dke-iev>.

Tabelle NA.1 (fortgesetzt)

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 55016-2-3:2010	IEC/CISPR 16-2-3 (in Vorbereitung)	DIN EN 55016-2-3 (VDE 0877-16-2-3) (in Vorbereitung)	VDE 0877-16-2-3
EN 55016-2-4:2004	IEC/CISPR 16-2-4:2003	DIN EN 55016-2-4 (VDE 0877-16-2-4):2005-09	VDE 0877-16-2-4
EN 55016-4-2:2004	IEC/CISPR 16-4-2:2003	DIN EN 55016-4-2 (VDE 0876-16-4-2):2005-09	VDE 0876-16-4-2
EN 55022:2006 + A1:2007	IEC/CISPR 22:2005 + A1:2005	DIN EN 55022 (VDE 0878-22):2008-05	VDE 0878-22
EN 60068-1:1994	IEC 60068-1:1988 + Corrigendum 1988 + A1:1992	DIN EN 60068-1:1995-03	—
EN 61000-4-3:2006 + A1:2008	IEC 61000-4-3:2006 + A1:2007	DIN EN 61000-4-3 (VDE 0847-4-3):2008-06	VDE 0847-4-3
EN 61000-4-6:2009	IEC 61000-4-6:2008	DIN EN 61000-4-6 (VDE 0847-4-6):2009-12	VDE 0847-4-6
EN 61000-4-20:2003 + A1:2007	IEC 61000-4-20:2003 + A1:2006	DIN EN 61000-4-20 (VDE 0847-4-20):2008-03	VDE 0847-4-20
EN 61000-5-7:2001	IEC 61000-5-7:2001	DIN EN 61000-5-7 (VDE 0847-5-7):2001-12	VDE 0847-5-7
EN 61726:2000	IEC 61726:1999	DIN EN 61726:2000-08	—
—	IEC 60169-1-3:1988 + A1:1996	—	—
—	IEC/CISPR/TR 16-4-1:2009	—	—

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 55016-1-1 (VDE 0876-16-1-1), *Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Teil 1-1: Geräte und Einrichtungen zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Messgeräte*

DIN EN 55016-2-3 (VDE 0877-16-2-3), *Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Teil 2-3: Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Messung der gestrahlten Störaussendung*

DIN EN 55016-2-4 (VDE 0877-16-2-4), *Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Teil 2-4: Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Messungen der Störfestigkeit*

DIN EN 55016-4-2 (VDE 0877-16-4-2), *Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Teil 4-2: Unsicherheiten, Statistik und Modelle zur Ableitung von Grenzwerten (Störmodell) – Unsicherheit bei EMV-Messungen*

DIN EN 55022 (VDE 0878-22), *Einrichtungen der Informationstechnik – Funkstöreigenschaften – Grenzwerte und Messverfahren*

DIN EN 60068-1, *Umweltprüfungen – Teil 1: Allgemeines und Leitfaden*

DIN EN 61000-4-3 (VDE 0847-4-3), *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-3: Prüf- und Messverfahren – Prüfung der Störfestigkeit gegen hochfrequente elektromagnetische Felder*

DIN EN 61000-4-6 (VDE 0847-4-6), *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-6: Prüf- und Messverfahren – Störfestigkeit gegen leitungsgeführte Störgrößen, induziert durch hochfrequente Felder*

DIN EN 61000-4-20 (VDE 0847-4-20), *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-20: Prüf- und Messverfahren – Messung der Störaussendung und Störfestigkeit in transversal-elektromagnetischen (TEM-)Wellenleitern*

DIN EN 61000-5-7 (VDE 0847-5-7), *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 5-7: Installationsrichtlinien und Abhilfemaßnahmen – Schutzarten durch Gehäuse gegen elektromagnetische Störgrößen*

DIN EN 61726, *Konfektionierte Kabel, Kabel, Steckverbinder und passive Mikrowellenbauteile – Messung der Schirmdämpfung mit dem Strahlungskammervorgang*

DIN V ENV 13005:1999-06, *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen; Deutsche Fassung ENV 13005:1999*

— **Entwurf** —

E DIN EN 61000-4-21 (VDE 0847-4-21):2010-07

– Leerseite –

**Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) –
Teil 4-21: Prüf- und Messverfahren –
Verfahren für die Prüfung in der Modenverwirbelungskammer**

Inhalt

	Seite
Einleitung.....	8
1 Anwendungsbereich	9
2 Normative Verweisungen.....	9
3 Begriffe und Abkürzungen	10
3.1 Begriffe.....	10
3.2 Abkürzungen.....	13
4 Allgemeines.....	14
5 Prüfumgebungen und Einschränkungen	15
6 Anwendungen	15
6.1 Störfestigkeit gegen gestrahlte Störgrößen	15
6.2 Gestrahlte Störaussendungen	15
6.3 Messungen der Schirmdämpfung.....	15
7 Prüfeinrichtung.....	16
8 Validierung der Kammer	17
9 Prüfungen.....	18
10 Prüfergebnisse, Prüfbericht und Prüfbedingungen.....	18
Anhang A (informativ) Übersicht über Modenverwirbelungskammern	19
A.1 Einleitende Bemerkungen.....	19
A.1.1 Allgemeines.....	19
A.1.2 Größe, Form, Aufbau und Betrieb von Modenverwirbelungskammern	19
A.1.3 Kleinste nutzbare Frequenz	20
A.1.4 Gütefaktor (Q -Faktor) der Kammer.....	20
A.1.5 Betrachtungen zu Tunern/Rührern	20
A.1.6 Allgemeine Bemerkungen zur Kammervalidierung.....	21
A.1.7 Kabelverlegung	21
A.2 Theorie von Hohlraumresonatoren	22
A.2.1 Modenverteilung in einem Hohlraumresonator, Modendichte und Q -Bandbreite.....	22
A.2.2 Ideale gegen unperfekte Kammereigenschaften: Auswirkung auf die Feldunsicherheit.....	23
A.3 Bewertung der Tunereffektivität	23
A.4 Statistik von Modenverwirbelungskammern	25
A.4.1 Feldschwankungen	25
A.4.2 Anzahl der erforderlichen Messwerte	26

	Seite
A.4.3 Einfluss des Tuners auf das mittlere Feld in der Kammer	26
A.4.4 Einfluss des Tuners auf das maximale Feld in der Kammer	27
A.5 Validierung der Kammer	27
A.5.1 Allgemeines	27
A.5.2 Validierungsverfahren	27
A.5.3 Gleichförmigkeit des Feldes	28
A.5.4 <i>E</i> -Feld in der Kammer	29
A.5.5 Belastungseffekte	30
A.5.6 Erzeugung eines Prüffeldes – Störfestigkeit	31
A.5.7 Bestimmung der abgestrahlten Leistung – Aussendungen	31
A.5.8 Gütefaktor der Kammer für die Prüfung mit kontinuierlichen und gepulsten Signalen	32
A.6 Bezugsschriftstücke	32
Anhang B (normativ) Validierung der Kammer für das Verfahren der Modenänderung durch schrittweise bewegten Rührer/Tuner (Schrittbetrieb des Tuners/Rührers)	43
B.1 Validierung: Gleichförmigkeit des Feldes in der Kammer und Validierung der Belastung	43
B.1.1 Allgemeines	43
B.1.2 Validierung der Gleichförmigkeit des Feldes	43
B.1.3 Kalibrierung der Empfangsantenne	46
B.1.4 Einfügungsdämpfung der Kammer	47
B.1.5 Abschätzung des <i>E</i> -Feldes in der Kammer unter Verwendung von Antennen	47
B.1.6 Nachweis der maximalen Belastung der Kammer	47
B.2 Validierung: Nachweis des Leistungsvermögens der Kammer mit Prüfling	48
B.3 Validierung des <i>Q</i> und der Zeitkonstante	49
Anhang C (normativ) Validierung der Kammer und Prüfung für das Verfahren der Modenänderung durch kontinuierlich bewegten Rührer/Tuner (kontinuierlicher Betrieb des Tuners/Rührers)	52
C.1 Validierung der Kammer für das Verfahren der Modenänderung durch kontinuierlich bewegten Tuner/Rührer	52
C.1.1 Allgemeines	52
C.1.2 Feldsondenbetrachtungen für die Verwendung beim Verfahren der Modenänderung durch kontinuierlich bewegten Tuner/Rührer	53
C.2 Prüfung der Störfestigkeit mit Hilfe des Verfahrens der Modenänderung durch kontinuierlich bewegten Tuner/Rührer	54
C.3 Andere Betrachtungen zum Verfahren der Modenänderung durch kontinuierlich bewegten Rührer/Tuner	56
C.3.1 Zeitliches Antwortverhalten/Betriebszyklus des Prüflings	56
C.3.2 Umdrehungsgeschwindigkeit des Rührers/Tuners	56
C.3.3 Wirkung des Rührers/Tuners auf das erwartete <i>E</i> -Feld	57
C.4 Punkte, die bei der Modenänderung durch kontinuierlich bewegten Rührer/Tuner behandelt werden müssen	57
C.5 Bezugsschriftstücke	57

	Seite
Anhang D (normativ) Prüfung der Störfestigkeit gegen gestrahlte Felder	59
D.1 Prüfaufbau.....	59
D.2 Validierung	59
D.3 Verfahren der Prüfung der Störfestigkeit gegen gestrahlte Felder	59
D.3.1 Bestimmung der Anforderungen an die Eingangsleistung der Kammer	59
D.3.2 Auswahl von Frequenzdurchlaufraten/Schrittweiten/Intervallen.....	60
D.4 Durchführung der Prüfung	61
D.5 Prüfbericht.....	61
Bezugsschriftstücke	62
Anhang E (normativ) Messungen von gestrahlten Aussendungen.....	64
E.1 Einleitung	64
E.2 Messaufbau.....	64
E.3 Validierung	64
E.4 Verfahren der Messung der Aussendung von gestrahlten Feldern (en: RE)	65
E.5 Bestimmung der abgestrahlten Leistung	65
E.6 Abschätzung des durch einen Prüfling erzeugten Freiraum-(Fern-)Feldes	66
E.7 Abschätzung des durch einen Prüfling erzeugten Halbraum-(Fern-)Feldes	67
E.8 Maximale Richtwirkung.....	67
E.9 Messunsicherheit	68
E.10 Prüfbericht.....	68
E.11 Bezugsschriftstücke	68
Anhang F (informativ) Messungen der Schirmdämpfung von konfektionierten Leitungen, Leitungen, Steckverbindern, Hohlleitern und passiven Mikrowellenbauteilen.....	71
F.1 Messungen der Schirmdämpfung des Prüflings.....	71
F.2 Beschreibung des Messaufbaus.....	71
F.2.1 Die Modenverwirbelungskammer	71
F.2.2 Antennen.....	71
F.2.3 Messaufbau.....	71
F.2.4 Prüfling	71
F.2.5 Verbindungsgeräte.....	72
F.3 Messverfahren	72
F.3.1 Allgemeines.....	72
F.3.2 Messung des Prüflings.....	72
F.3.3 Alternatives Verfahren zur Messung des Prüflings.....	73
F.4 Überprüfung des Messaufbaus.....	73
F.5 Bezugsschriftstücke	73
Anhang G (informativ) Messungen der Schirmdämpfung von Dichtungen und Materialien.....	75
G.1 Übersicht.....	75
G.2 Messung der Schirmdämpfung	76

	Seite
G.3 Beschreibung des Messaufbaus	76
G.3.1 Allgemeines	76
G.3.2 Messaufbau für Dichtungen	76
G.3.3 Messaufbau für Materialien	76
G.3.4 Modenverwirbelungskammer	77
G.3.5 Antennen	77
G.3.6 Messaufbau	77
G.3.7 Verbindungsgeräte	77
G.3.8 Validierung der Prüfvorrichtung	77
G.3.9 Bestimmung des Dynamikbereichs der Messung	78
G.4 Messverfahren	79
G.4.1 Allgemeines	79
G.4.2 Messung des Prüflings	80
G.4.3 Alternatives Verfahren für die Messung eines Prüflings	80
G.5 Übertragungsquerschnitt	81
G.5.1 Allgemeines	81
G.5.2 Abschätzung der Schirmdämpfung eines Gehäuses	81
G.6 Überwachung des Messaufbaus	82
G.7 Bezugsschriftstücke	82
Anhang H (informativ) Messungen der Schirmdämpfung von Gehäusen	85
H.1 Übersicht	85
H.2 Messung der Schirmdämpfung	85
H.3 Beschreibung des Messaufbaus	86
H.3.1 Allgemeines	86
H.3.2 Messaufbau für Gehäuse	86
H.3.3 Die Modenverwirbelungskammer	86
H.3.4 Antennen	86
H.3.5 Messaufbau	86
H.3.6 Verbindungsgeräte	86
H.3.7 Vorbereitung des Gehäuses	87
H.3.8 Bestimmung des Dynamikbereichs der Messung	87
H.4 Messverfahren	88
H.4.1 Allgemeines	88
H.4.2 Messung des Prüflings	88
H.4.3 Alternatives Verfahren für die Messung eines Prüflings	89
H.5 Überwachung des Messaufbaus	89
H.6 Bezugsschriftstücke	90

	Seite
Anhang I (informativ) Messungen der Antenneneffektivität	92
I.1 Antenneneffektivität	92
I.2 Effizienz der Messantenne	93
I.3 Bezugsschriftstücke	93
Anhang J (informativ) Direkte Ermittlung der Leistungsmerkmale einer Modenverwirbelungskammer mit Hilfe von Koeffizienten der Anisotropie des Feldes und der Inhomogenität des Feldes	94
J.1 Einleitung	94
J.2 Feldanisotropiekoeffizienten	94
J.2.1 Definitionen	94
J.2.2 Ermittlungsverfahren	95
J.2.3 Verteilungen	96
J.2.4 Abhängigkeit von der Größe des Messwertesatzes („Samples“)	96
J.3 Feldinhomogenitätskoeffizienten	97
J.3.1 Definitionen	97
J.3.2 Ermittlungsverfahren	98
J.3.3 Verteilungen	98
J.3.4 Abhängigkeit von der Größe des Messwertes („Sample“)	98
J.4 Feldanisotropie oder Feldinhomogenität	98
J.5 Erweiterungen	98
J.5.1 Verteilung von A_{eff}	98
J.5.2 Mindestanzahl von Messwertesätzen („Samples“)	99
J.6 Bezugsschriftstücke	99
Anhang K (informativ) Messunsicherheit der Kammervalidierung sowie der Messung der Störaussendung und der Prüfung der Störfestigkeit	103
K.1 Allgemeine Bemerkungen	103
K.1.1 Messunsicherheit in der Normung	103
K.1.2 Messunsicherheit in Modenverwirbelungskammern im Vergleich zur Messunsicherheit bei anderen alternativen EMV-Prüfverfahren	103
K.1.3 Dem Feld innewohnende Unsicherheit im Vergleich zur Messgeräteunsicherheit	103
K.2 Aussendungen	104
K.3 Störfestigkeit	106
K.4 Bezugsschriftstücke	107
Literaturhinweise	111
Bilder	
Bild A.1 – Typische Feldhomogenität für 200 Tunerschritte	34
Bild A.2 – Theoretische Modenverteilung für eine 10,8 m × 5,2 m × 3,9 m große Kammer	35
Bild A.3 – Theoretische Modenverteilung bei kleiner Gütefaktor-Bandbreite, die der Hohlraumresonanz (Mode) 60. Ordnung überlagert ist	35

Bild A.4 – Theoretische Modenverteilung bei größerer Gütefaktor-Bandbreite (kleineres Q), die der Hohlraumresonanz (Mode) 60. Ordnung überlagert ist	36
Bild A.5 – Typische Modenverwirbelungskammer	36
Bild A.6 – Theoretische Anforderungen an die Messwertaufnahme (Sampling) für ein Vertrauensintervall von 95 % [siehe Gleichung (A.3) zur Berechnung von M]	37
Bild A.7 – Normierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für eine elektrische Feldkomponente an einem festen Ort für die Messung mit einem einzelnen Messwert („Sample“)	37
Bild A.8 – Normierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für den Mittelwert einer elektrischen Feldkomponente an einem festen Ort für eine Messung mit N unabhängigen Messwerten	38
Bild A.9 – Normierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für das Maximum einer elektrischen Feldkomponente an einem festen Ort für eine Messung mit N unabhängigen Messwerten	38
Bild A.10 – Arbeitsvolumen einer Kammer.....	39
Bild A.11 – Typische Sondendaten	39
Bild A.12 – Auf den Mittelwert normalisierte Daten für die x -Komponente des E -Felds von acht Sonden	40
Bild A.13 – Standardabweichung der Daten für die E -Feldkomponenten von acht Sonden.....	40
Bild A.14 – Verteilung der Absorber für die Prüfung in Bezug auf Belastungseffekte	41
Bild A.15 – Höhe der Kammerbelastung aus der Prüfung in Bezug auf Belastungseffekte	41
Bild A.16 – Standardabweichung der Daten für die elektrischen Feldkomponenten von acht Sonden in der belasteten Kammer	42
Bild B.1 – Sondenpositionen für die Validierung der Kammer	51
Bild C.1 – Empfangsleistung (in dBm) als Funktion der Tunerumdrehung (in s) bei 500 MHz.....	58
Bild C.2 – Empfangsleistung (in dBm) als Funktion der Tunerumdrehung (in s) bei 1 000 MHz.....	58
Bild D.1 – Beispiel einer geeigneten Prüfeinrichtung	63
Bild E.1 – Beispiel einer geeigneten Prüfeinrichtung	69
Bild E.2 – Bezogen auf die Berechnung des Geometriefaktors für gestrahlte Aussendungen.....	70
Bild F.1 – Typischer Messaufbau	74
Bild G.1 – Typischer Messaufbau	83
Bild G.2 – Aufbau einer typischen Prüfvorrichtung für die Prüfung von Dichtungen und/oder Materialien	84
Bild G.3 – Für die Kalibrierung angeordnete Prüfvorrichtung	84
Bild H.1 – Typischer Prüfgehäuseaufbau für die Prüfung von Gehäusen für Standgeräte	91
Bild H.2 – Typischer Prüfgehäuseaufbau für die Prüfung von Gehäusen für Tischgeräte	91
Bild J.1 – Theoretische und typische gemessene Verteilungen der Feldanisotropiekoeffizienten in einer Modenverwirbelungskammer mit guter Qualität der Modenänderung bei kontinuierlichem Betrieb des Rührers/Tuners	100
Bild J.2 – Theoretische und typische gemessene Verteilungen der Feldanisotropiekoeffizienten in einer Modenverwirbelungskammer mit schlechter Qualität der Modenänderung bei kontinuierlichem Betrieb des Rührers/Tuners	101
Bild J.3 – Typische gemessene Werte der Feldanisotropiekoeffizienten als Funktion von N in einer Modenverwirbelungskammer mit guter Qualität der Modenänderung bei kontinuierlichem Betrieb des Rührers/Tuners	102

	Seite
Bild K.1 – Mittlere ausgesendete Leistung als Funktion der Frequenz für einen typischen unabsichtlichen Strahler [4], [8]	108
Bild K.2 – Geschätzte Standardunsicherheit, auf den Mittelwert normalisiert, verglichen mit den theoretischen Standardunsicherheiten für ideale Kammereigenschaften $\sqrt{2}$ bzw. $\sqrt{(2/100)}$	109
Bild K.3 a) – Mittlere normalisierte Breite $\xi_{\eta}^{+} \% - \xi_{\eta}^{-} \% / \langle E_x _{\max} \rangle$ (in dB) für ein η -%-Vertrauensintervall für die maximale Feldstärke $ E_x _{\max}$ für eine festgelegte Anzahl an unabhängigen Rührerstellungen N	109
Bild K.3 b) – Wie a), jedoch für den Mittelwert $\langle P_{x, \max} \rangle$ der maximalen empfangenen Leistung	109
Bild K.4 – Mittlere normalisierte Intervallgrenzen und erforderliche Anzahl an unabhängigen Rührerstellungen N für ein η -%-Vertrauensintervall für $ E_x _{\max}$ mit normalisierter Breite $\xi_{\eta}^{+} \% - \xi_{\eta}^{-} \% / \langle E_x _{\max} \rangle$	110
Tabellen	
Tabelle B.1 – Anforderungen an die Messwertaufnahme (Sampling)	50
Tabelle B.2 – Grenzübergangs-Anforderungen für die Gleichförmigkeit des Feldes	50
Tabelle J.1 – Typische Werte für den gesamten Feldanisotropiekoeffizienten für eine „mittlere“ und „gute“ Qualität der Modenverwirbelung	99

Einleitung

Die Reihe IEC 61000-4 ist ein Teil der Reihe IEC 61000 entsprechend der folgenden Struktur:

Teil 1: Allgemeines

- Allgemeine Betrachtungen (Einleitung, Grundprinzipien)
- Definitionen, Begriffe

Teil 2: Umgebung

- Umgebungsbeschreibung
- Einteilung der Umgebung in Klassen
- Verträglichkeitspegel

Teil 3: Grenzwerte

- Grenzwerte der Störaussendung
- Grenzwerte der Störfestigkeit (soweit sie nicht in den Zuständigkeitsbereich der Produktkomitees fallen)

Teil 4: Prüf- und Messverfahren

- Messverfahren
- Prüfverfahren

Teil 5: Installationsrichtlinien und Abhilfemaßnahmen

- Installationsrichtlinien
- Abhilfemaßnahmen und Geräte

Teil 6: Fachgrundnormen

Teil 9: Verschiedenes

Jeder Teil ist darüber hinaus in mehrere Teile unterteilt, die entweder als Internationale Normen oder als Technische Spezifikationen oder als Technische Berichte veröffentlicht werden; einige von ihnen wurden bereits als Hauptabschnitte veröffentlicht. Andere werden veröffentlicht, wobei der Teilnummer ein Bindestrich folgt und eine zweite Nummer die Unterteilung kennzeichnet (z. B. IEC 61000-6-1).

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC 61000 gilt für die Prüfung der Störfestigkeit und die Messung der gewollten (Nutz-) und ungewollten (Stör-) Aussendung von elektrischen und/oder elektronischen Geräten (Einrichtungen) sowie für die Prüfung der Schirmdämpfung in Modenverwirbelungskammern. Er legt die Verfahren für die Durchführung dieser Messungen bzw. Prüfungen fest. Es werden nur gestrahlte Störaussendungen betrachtet.

Zweck dieses Teiles ist die Festlegung eines allgemeinen Bezugs für die Verwendung von Modenverwirbelungskammern zur Ermittlung des Betriebsverhaltens von elektrischen oder elektronischen Geräten (Einrichtungen), wenn sie hochfrequenten elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sind, und zur Bestimmung der Pegel der hochfrequenten Abstrahlung von elektrischen oder elektronischen Geräten (Einrichtungen).

ANMERKUNG Die in diesem Teil festgelegten Prüfverfahren dienen der Ermittlung der Auswirkungen, die elektromagnetische Felder auf das betreffende Gerät (die betreffende Einrichtung) haben, sowie der Ermittlung der elektromagnetischen Abstrahlung des betreffenden Geräts (der betreffenden Einrichtung). Die Nachbildung und Messung der elektromagnetischen Felder sind nicht ausreichend genau für die quantitative Bestimmung dieser Auswirkungen. Die festgelegten Prüfverfahren haben zum Ziel, eine angemessene Reproduzierbarkeit und Wiederholpräzision von Prüfergebnissen und eine qualitative Analyse der Auswirkungen zu ermöglichen.

Dieser Teil der IEC 61000 ist nicht dafür vorgesehen, die Prüfungen festzulegen, die auf ein bestimmtes Gerät oder ein bestimmtes System anzuwenden sind. Sein Hauptziel ist es, einen allgemeinen grundlegenden Bezug für alle betroffenen Produktkomitees der IEC zu geben. Die Produktkomitees sollten Grenzwerte und Verfahren für die Messung der Aussendungen in Absprache mit IEC/CISPR auswählen. Sie bleiben für die geeignete Auswahl der Prüfungen der Störfestigkeit und der für ihr Gerät (ihre Einrichtung) anzuwendenden Prüfschärfgrade (Prüfpegels) verantwortlich. Andere Verfahren, wie z. B. diejenigen, die in der IEC 61000-4-3 und in der IEC/CISPR 16-2-3 und IEC/CISPR 16-2-4 beschrieben sind, können in Absprache mit IEC/CISPR und IEC/TC 77 verwendet werden, falls sie durch die Produktkomitees festgelegt werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60050(161):1990, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 161: Electromagnetic compatibility*

IEC 60068-1, *Environmental testing – Part 1: General and guidance*

IEC 61000-4-3, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*

IEC 61000-4-6, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-6: Testing and measurement techniques – Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields*

IEC/CISPR 16-1, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus*

IEC/CISPR 16-2, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 2: Methods of measurement of disturbances and immunity*

3 Begriffe und Abkürzungen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050(161) und die folgenden Begriffe.

3.1.1

Antenne

Teil eines Funksende- oder -empfangssystems, der für die Kopplung zwischen einem Sender oder einem Empfänger und dem Ausbreitungsmedium der Funkwelle sorgt

[IEV 712-01-01]

ANMERKUNG Für den Zweck dieses Verfahrens wird angenommen, dass Antennen eine Effizienz von 75 % oder mehr haben.

3.1.2

elektromagnetische Welle

Welle die durch die Ausbreitung eines zeitabhängigen elektromagnetischen Feldes gekennzeichnet ist und durch Beschleunigungen (Änderungen) elektrischer Ladungen erzeugt wird

[IEV 705-01-09, modifiziert]

3.1.3

Fernfeld

Fernfeldgebiet

Bereich des elektromagnetischen Feldes einer Antenne oder eines unbeabsichtigten Strahlers, in dem die vorherrschenden Bestandteile des elektromagnetischen Feldes jene sind, die für die Ausbreitung der Energie maßgebend sind, und in dem die winkelbezogene Feldverteilung im Wesentlichen vom Abstand von der Antenne unabhängig ist

ANMERKUNG 1 Im Fernfeld verringern sich alle Bestandteile des elektromagnetischen Feldes umgekehrt proportional zum Abstand von der Antenne.

ANMERKUNG 2 Bei einer querstrahlenden Antenne mit einer maximalen Gesamtabmessung D , die im Vergleich zur Wellenlänge λ groß ist, wird gemeinhin angenommen, dass das Fernfeld sich jenseits einer Entfernung von $2D^2/\lambda$ von der Antenne in Richtung der stärksten Strahlung befindet.

[IEV 712-02-02]

Bereich in größerer Entfernung von einer Strahlungsquelle oder strahlenden Apertur, in dem das Strahlungsmuster nicht von der Entfernung zur Quelle abhängig ist

[IEV 731-03-92]

3.1.4

Feldstärke

elektrische oder der magnetische Feldstärke, die an einem gegebenen Punkt von einer Funksendeanlage erzeugt wird, welche bei einer festgelegten charakteristischen Frequenz und unter festgelegten Installations- und Modulationsbedingungen arbeitet

[IEV 705-08-31]

ANMERKUNG 1 Die Begriffe „elektrische Feldstärke“ (in V/m) oder „magnetische Feldstärke“ (in A/m) werden verwendet, je nachdem, ob die Höhe des elektrischen bzw. magnetischen Felds gemessen wird. Im Nahfeldbereich hängt die Beziehung zwischen der elektrischen und magnetischen Feldstärke und dem Abstand (zur Quelle) von der jeweiligen Konfiguration ab. Die Leistungsflussdichte ist in ähnlicher Weise unbestimmbar.

ANMERKUNG 2 Im Fernfeldbereich wird statt der Feldstärke manchmal die Leistungsflussdichte P angegeben. Für eine linear polarisierte Welle im Freiraum ist $P = E^2 / n_v$.

Dabei ist

E die elektrische Feldstärke;

n_v die Freiraum-Impedanz, ungefähr $120\pi \Omega$.

3.1.5

Polarisation

Eigenschaft einer sinusförmigen elektromagnetischen Welle oder eines sinusförmigen Feldvektors, die für einen gegebenen Punkt im Raum durch die Richtung des elektrischen Feldstärkevektors Fernfeld oder eines anderen festgelegten Feldvektors gegeben ist; bei zeitlicher Änderung dieser Richtung kann diese Eigenschaft durch den geometrischen Ort, den die Spitze des betrachteten Feldvektors beschreibt, gekennzeichnet werden

[IEV 726-04-01]

3.1.6

Modenverwirbelungskammer^{N1)}

besonders gestalteter Raum mit sehr langer Verwirbelungszeit

[IEV 723-03-30]

Raum mit langer Verwirbelungszeit, der speziell dafür entwickelt wurde, das enthaltene Feld möglichst diffus zu machen. Der Raum besteht aus einer geschirmten Kabine, die allgemein mit einem mechanischen „Tuner“/Rührer ausgestattet ist, der die Randbedingungen innerhalb der Kammer und somit die Verteilung des elektromagnetischen Feldes innerhalb der Kammer verändert („verwirbelt“).

ANMERKUNG 1 Modenverwirbelungskammern werden insbesondere benutzt zur Messung des Absorptionsgrads von Materialien und der Leistung von gewollten als auch ungewollten Strahlungsquellen.

ANMERKUNG 2 Die Prüfung in einer Modenverwirbelungskammer kann als ein stochastischer Vorgang beschrieben werden, bei dem der mechanische „Tuner“/Rührer die einzelnen Hohlraumresonanzen (Moden) in der Kabine „verwirbelt“. Daher wird eine solche Kammer im englischen auch als „stirred-mode“- , „mode-stirred“- oder „mode-tuned“-Kammern bezeichnet.

[IEV 801-31-13, modifiziert]

3.1.7

Gütefaktor einer Modenverwirbelungskammer

Q

frequenzabhängiges Maß für die Schärfe der Resonanz. Der Gütefaktor ist gleich dem 2 π fachen des Verhältnisses der maximal gespeicherten Energie Kammer zu der Energie, die während einer Schwingungsperiode verteilt wird

[IEV 151-15-46, modifiziert]

Maß dafür, wie gut die Kammer (elektromagnetische) Energie speichern kann (siehe A.6[2]¹⁾). Für eine gegebene Kammer schwankt der Gütefaktor Q in Abhängigkeit von der Frequenz und kann mit nachfolgender Gleichung berechnet werden:

^{N1)} Nationale Fußnote: Die Definitionen IEV 723-03-30 und IEV 723-03-30 entstammen dem Bereich der Akustik. Die Begrifflichkeiten wurden in dieser Norm an den Bereich der elektromagnetischen Felder angepasst. So wurde die Bezeichnungen „Hallraum“ in „Modenverwirbelungskammer“ und „Nachhallzeit“ in „Verwirbelungszeit“ geändert.

¹⁾ Angaben in eckigen Klammern beziehen sich auf die Bezugsschriftstücke in den entsprechenden Anhängen.

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \left\langle \frac{P_{AveRec}}{P_{input}} \right\rangle \quad (1)$$

Dabei ist

V das Volumen der Kammer (in m^3);

λ die Wellenlänge (in m);

(P_{AveRec}/P_{input}) das Verhältnis der über eine Tuner-/Rührerumdrehung (und, soweit anwendbar, über sämtliche Antennenpositionen und -ausrichtungen) gemittelten Empfangsleistung zu der ebenso gemittelten Eingangsleistung;

η_{Tx} und η_{Rx} die Effizienzfaktoren (Wirkungsgrade) der Sende- (η_{Tx})- bzw. Empfangs- (η_{Rx})-Antenne. Wenn vom Antennenhersteller keine Angaben (zu den Effizienzfaktoren (Wirkungsgraden)) bereitgestellt wurden, dann kann die Effizienz (der Wirkungsgrad) zu 0,75 für logarithmisch-periodische Antennen und zu 0,9 für Hornantennen angenommen werden.

3.1.8

Q -Bandbreite der Modenverwirbelungskammer

BW_Q

Maß für den Frequenzbereich, innerhalb dem die einzelnen Hohlraumresonanzen (Moden) der Modenverwirbelungskammer korreliert sind (siehe A.2). Die BW_Q einer Modenverwirbelungskammer kann mit nachfolgender Gleichung berechnet werden:

$$BW_Q = f / Q \quad (2)$$

Dabei ist

f die Frequenz;

Q der in 3.1.7 definierte Gütefaktor

3.1.9

Fehlfunktion

Verlust der Fähigkeit einer Einrichtung, eine erforderliche Funktion auszulösen oder aufrecht zu erhalten, oder die Auslösung unerwünschter fehlerhafter Funktionen, die nachteilige Konsequenzen haben können

ANMERKUNG: Die Kriterien für die Funktionsfähigkeit müssen genau festgelegt werden.

[IEV 393-17-79]

3.1.10

Aussendung

Emission

Erscheinung, bei der Energie in Form von Wellen oder Teilchen aus einer Quelle austritt

[IEV 702-02-03]

3.1.11

Tuner/Rührer

aus elektrisch leitfähigem Material konstruiertes mechanisches Gerät, das die elektromagnetischen Randbedingungen innerhalb einer Modenverwirbelungskammer verändert („verwirbelt“)

ANMERKUNG Im Allgemeinen besteht eine Modenverwirbelungskammer aus einem geschirmten Raum, dessen kleinste Seitenlänge groß in Bezug zur Wellenlänge der kleinsten nutzbaren Frequenz ist. Die Kammer ist üblicherweise mit einem mechanischen Tuner/Rührer ausgestattet, dessen Abmessungen beträchtliche Teile der Kammerabmessungen bzw. der Wellenlänge der kleinsten nutzbaren Frequenz betragen. Wenn die Kammer mit HF-Energie angeregt wird, können die Randbedingungen der aus mehreren Hohlraumresonanzen (Moden) bestehenden elektromagnetischen Feldumgebung mit dem mechanischen Tuner/Rührer „verwirbelt“ werden. Die resultierende Feldumgebung ist statistisch homogen und isotrop (d. h., die Wellen scheinen an einem Ort aus allen möglichen Richtungen mit allen möglichen Polarisationsrichtungen einzufallen), wenn die Betrachtungen über eine genügend große Anzahl von Tunerstellungen erfolgen.

3.1.12

Mode

elektromagnetischer Wellentyp

Wellentyp

Lösung der Maxwell'schen Gleichungen, die ein elektromagnetisches Feld in einem bestimmten Bereich des Raums beschreibt und zu einem Satz voneinander unabhängiger Lösungen gehört, die durch festgelegte Randbedingungen definiert sind

[IEV 705-01-12]

3.1.13

Validierung

Prozess der Sicherstellung, dass ein fertiggestelltes Geräte- und Überwachungssystem (Hardware und Software) sowie eine fertiggestellte Prüfeinrichtung alle funktionalen, Leistungs- und Schnittstellen-Anforderungen erfüllt

[IEV 394-40-42, modifiziert]

3.1.14

Kammervalidierung

Prozess der Sicherstellung, dass eine (Mess-)Kammer alle funktionalen, Leistungs- und Schnittstellen-Anforderungen erfüllt

[IEV 394-40-42, modifiziert]

3.1.15

inhärente Feldunsicherheit

IFU

Beitrag zur Gesamtunsicherheitsbilanz, der durch die zufällige (statistische) Natur des Feldes in einer Modenverwirbelungskammer erzeugt wird

ANMERKUNG Beim typischen Betrieb einer Modenverwirbelungskammer wird die inhärente Feldunsicherheit typischerweise als größer als die Messgeräteunsicherheit angesehen, es sei denn, die Kammer besitzt einen außergewöhnlich hohen Gütefaktor. Als Folge stellt die inhärente Feldunsicherheit typischerweise der einzige oder hauptsächliche Beitrag dar, der bei Abschätzung der Gesamtunsicherheit während der Prüfung oder Messung in Betracht zu ziehen ist.

3.1.16

Arbeitsvolumen

durch acht Punkte definierter Bereich innerhalb einer Kammer in ausreichendem Abstand zu den Wänden, um Grenzeffekte zu vermeiden; bei rechteckförmigen Kammern wird das Arbeitsvolumen typischerweise durch die Ecken eines würfelförmigen oder parallelepiped-förmigen Bereichs, der einen Abstand von einem Viertel der Wellenlänge von den nächstgelegenen Wänden besitzt, definiert.

ANMERKUNG Für Frequenzen unterhalb 1 GHz sind die Abstände auf 0,75 m beschränkt.

3.2 Abkürzungen

AVF	Antenna Validation Factor	AVF	Antennennvalidierungsfaktor
CVF	Chamber Validation Factor		Kammervalidierungsfaktor
CDF	Cumulative Distribution Function	KVF	kumulative Verteilungsfunktion
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques		Internationaler Sonderausschuss für Funkstörungen
CLF	Chamber Loading Factor		Kammerbelastungsfaktor
CW	Continuous Wave		Dauerwelle
EM	Electromagnetic		elektromagnetisch

EMC	Electromagnetic Compatibility	EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EMI	Electromagnetic Interference	EMB	Elektromagnetische Beeinflussung
EUT	Equipment under test		Prüfling
IEC	International Electrotechnical Commission		Internationale Elektrotechnische Kommission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers		Institut der Elektrischen- und Elektronischen Ingenieure
IEV	International Electrotechnical Vocabulary		Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch
IF	Image Frequency		Spiegelfrequenz
IFU	Intrinsic Field Uncertainty		Inhärente Feldunsicherheit
IL	Insertion loss		Einfügungsdämpfung
ISO	International Standardisation Organization		Internationale Normungsorganisation
JTF	Joint Task Force		Gemeinsame Arbeitsgruppe
LUF	Lowest Usable Frequency		kleinste nutzbare Frequenz
OATS	Open Area Test Site		Freifeld
PDF	Probability Density function		Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
RE	Radiated Emissions		gestrahlte Aussendungen
RF	Radio Frequency	HF	Hochfrequenz; Funkfrequenz
RMS	Root Mean Square	eff	Effektivwert
RSS	Root Sum of the Squares		Summen-Effektivwert
Rx	Receive (antenna)		Empfang (Antenne)
SE	Shielding Effectiveness	SD	Schirmdämpfung
SW	Square Wave modulation		Rechteckmodulation
TFVF	Test Fixture Validation Factor		Validierfaktor der Prüfvorrichtung
Tx	Transmit (antenna)		Senden (Antenne)

4 Allgemeines

Die meisten elektronischen Geräte (Einrichtungen) können in irgendeiner Weise durch elektromagnetische Felder beeinflusst werden. Strahlungsquellen können natürliche oder künstliche Ursachen haben und können sowohl gewollt als auch ungewollt sein. Beispiele von absichtlichen Strahlern sind drahtlose und persönliche Kommunikationssysteme. Beispiele von ungewollten Strahlern sind Schweißeinrichtungen, Thyristoren, Hochgeschwindigkeits-Datenbusse, Leuchtstofflampen, Schalter, die induktive Lasten schalten, usw.

Realistische Umgebungen für die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen sind oft durch mehrfache Reflexionen und Mehrwegeeffekte gekennzeichnet. Modenverwirbelungskammern verfolgen bestimmte Konzepte, um solche komplexen Umgebungen in einer extremen Weise (ungünstigster Effekt) nachzubilden und können unter diesem Gesichtspunkt repräsentativer als andere EMV-Prüfverfahren sein. Ein Vorteil von Modenverwirbelungskammern besteht in der Fähigkeit, ein statistisch isotropes, homogenes, unpolarisiertes und unkorreliertes inneres Feld durch die Bewegung der Tuner bzw. Rührer zu erzeugen.

Sehr hohe elektromagnetische Felder können einfach und sicher mit Modenverwirbelungskammern (MVKn) erzeugt werden. Die hohe Güte (Q) der meisten Kammern erlaubt die Erzeugung von vergleichsweise hohen Feldstärken mit vergleichsweise moderaten Eingangsleistungen (Resonanzfelder). Das Nichtvorhandensein von Absorbern macht das Erzeugen von hohen Feldstärkepegeln sicherer, da die Brandgefahr durch das

Zünden von Absorbern beseitigt ist. Eine ausreichende Abschirmung der Kammer hält die hohen Felder im Inneren der Kammer.

5 Prüfungen und Einschränkungen

Das Prüfverfahren unter Verwendung einer Modenverwirbelungskammer ist sowohl für vergleichsweise geringe als auch für sehr hohe Feldstärkepegel anwendbar. Wegen der hohen Dämpfung der Kammer gegenüber der äußeren Umgebung (Schirmdämpfung) können sowohl Messungen der Störaussendung als auch Prüfungen der Störfestigkeit für die meisten kommerziellen Anwendungen ohne Einschränkung durchgeführt werden. Gegenwärtig legt die IEC zu 80 MHz als Grenzfrequenz zwischen der Prüfung der Störfestigkeit gegen gestrahlte und gegen leitungsgeführte Störgrößen fest.

ANMERKUNG Die Norm IEC 61000-4-6 legt Prüfverfahren für die Prüfung der Störfestigkeit von elektrischen und elektronischen Geräten (Einrichtungen) gegen leitungsgeführte elektromagnetische Störgrößen fest. Sie deckt auch Frequenzen unterhalb 80 MHz ab.

Wie im Anhang A erläutert, wird der Frequenzbereich der Prüfungen, die in Modenverwirbelungskammern durchgeführt werden können, durch die Abmessungen und Bauart der Kammer sowie durch die Effektivität der (des) mechanischen Tuner(s)/Rührer(s) in Bezug auf die Änderung der räumlichen Feldverteilung bestimmt. Es gibt keine grundsätzlichen Beschränkungen in Bezug auf die Form und die Größe der Kammer, damit sie für die Verwendung als Modenverwirbelungskammer. Annehmbar ist Gute Verwirbelungseigenschaften bei einer festgelegten Betriebsfrequenz erfordern jedoch eine Mindestgröße der Kammer.

Kammern in der Größe eines (üblichen geschirmten) Raumes (z. B. Volumina zwischen 70 m³ und 100 m³) können typischerweise im Bereich von 200 MHz bis 18 GHz ohne Einschränkungen betrieben werden. Für niedrigere Frequenzgrenzen unterhalb 200 MHz sind Modenverwirbelungskammern notwendig, die größere Abmessungen als ein üblicher geschirmter Raum besitzen.

6 Anwendungen

6.1 Störfestigkeit gegen gestrahlte Störgrößen

Die Verwendung von Modenverwirbelungskammern für Prüfungen der Störfestigkeit gegen gestrahlte Störgrößen ist in Anhang D erfasst. Dieser Anhang deckt den Prüfaufbau, die Validierung der Kammer und Prüfverfahren ab. Das Einspeisen einer vorher bestimmten HF-Leistung erzeugt die gewünschten (Prüf-)Feldstärken in der Kammer. Der Pegel dieser vorher bestimmten HF-Leistung wird von den Validierungsdaten der Kammer, wie sie in den Anhängen B und C angegeben sind, abgeleitet.

6.2 Gestrahlte Störaussendungen

Die Verwendung von Modenverwirbelungskammern für Messungen von gestrahlten Störaussendungen ist durch Anhang E abgedeckt. Das hierfür beschriebene Verfahren misst den Betrag der vom Prüfling abgestrahlten HF-Leistung innerhalb der Messbandbreite. Wie bei der Prüfung der Störfestigkeit gegen gestrahlte Störgrößen werden die in den Anhängen B und C angegebenen Validierungsdaten der Kammer verwendet, um die Pegel der gestrahlten Störaussendungen zu bestimmen.

6.3 Messungen der Schirmdämpfung

Drei Anhänge behandeln die Durchführung von Schirmdämpfungsmessungen. Messungen der Schirmdämpfung von konfektionierten Leitungen, Leitungen, Steckverbindern, Wellenleitern und passiven Mikrowellenkomponenten werden in Anhang F beschrieben. Anhang G deckt die Schirmdämpfung von HF-Dichtungen und anderen Materialien ab. Der in Anhang G umrissene Ansatz beruht auf dem Verfahren der „verschachtelten Kammern“ (d. h. eine Modenverwirbelungskammer innerhalb einer größeren Modenverwirbelungskammer). Anhang G deckt auch die Validierung der Prüfvorrichtungen ab, die üblicherweise für die Durchführung von Schirmdämpfungsmessungen an HF-Dichtungen und anderen Materialien erforderlich sind. Kleinere Unterschiede im Entwurf/Aufbau von Prüfvorrichtungen können einen beträchtlichen Einfluss

auf die Messergebnisse haben. Befestigungsmaterialien, Abstände, Oberflächenbeschaffenheit, Anziehungsmomente von Befestigungen usw. müssen definiert angewendet werden, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Auf Grund der großen Anzahl von unterschiedlichen Messaufbauten, die erforderlich sind, um die vielen unterschiedlichen HF-Dichtungen und anderen Materialien im Hinblick auf ihre Prüfung aufnehmen zu können, beinhaltet dieser Anhang keine detaillierte Anleitung für die Ausführung von solchen Prüfvorrichtungen. Anhang H deckt die Messung der Schirmdämpfung von Gehäusen ab. Wie bereits im Anhang G beschrieben, nutzt die im Anhang H beschriebene Vorgehensweise ebenfalls das Verfahren der „verschachtelten Kammern“.

7 Prüfeinrichtung

Die nachfolgend genannten Prüfeinrichtungen werden empfohlen:

- *Modenverwirbelungskammer*, deren Abmessungen ausreichend sein müssen, um ein elektromagnetisches Feld mit mehreren Hohlraumresonanzen (Moden) im Hinblick auf die niedrigste Prüffrequenz aufzubauen. Dies bedeutet, dass die Kammerabmessungen in allen Richtungen groß im Vergleich zur Wellenlänge sind.
- *Mechanische(r) Tuner/Rührer* (siehe Anhang A), die eine Abmessung besitzen, die mindestens einem Viertel der Wellenlänge bei der niedrigsten Messfrequenz entspricht. Jeder Tuner/Rührer sollte darüber hinaus so groß wie möglich in Bezug auf die Gesamtabmessungen der Kammer sein, wobei die eine vorgenannte Abmessung mindestens drei Viertel der kleinsten Kammerabmessung betragen sollte. Weiterhin sollte jeder Tuner/Rührer asymmetrisch geformt sein, d. h., dass ein Feld erzeugt wird, das innerhalb einer kompletten Umdrehung keine identische Feldverteilung besitzt.
- *Felderzeugende Antennen* (siehe Anhang B): logarithmisch-periodisches oder jedes andere linear polarisierte Antennensystem, das in der Lage ist, die Frequenzanforderungen zu erfüllen und die direkte Bestrahlung des Prüfvolumens zu vermeiden.
- *Felderzeugende Bezugsantennen* (siehe Anhang B): logarithmisch-periodisches oder ein anderes linear polarisiertes, gut angepasstes Antennensystem, das in der Lage ist, die Frequenzanforderungen zu erfüllen.
- *Isotrope Feldsonde* (siehe Anhang B), die in der Lage ist, das elektrische Feld in allen drei (senkrecht aufeinander stehenden) Raumrichtungen getrennt zu erfassen. Alle Sensoren und optoelektronischen Elemente müssen eine angemessene Störfestigkeit gegen die zu messende Feldstärke und eine Lichtwellenleiterverbindung zu dem außerhalb der Kammer befindlichen Anzeigegerät besitzen. Eine geeignet gefilterte Leitung kann ebenfalls benutzt werden.

ANMERKUNG 1 Modenverwirbelungskammern benötigen eine Feldsonde, die es erlaubt, das elektrische Feld in allen drei senkrecht aufeinander stehenden Raumrichtungen einzeln zu erfassen. Wenn eine kleine einachsige, d. h. linear polarisierte Antenne benutzt wird, muss diese jeweils in einer neuen Position aufgestellt werden, um jede Feldkomponente in verschiedenen Richtungen getrennt messen zu können.

- *Eine Antenne zur Überwachung der Feldstärke*. Unter der Voraussetzung, dass es sich hierbei um einen kleinen (kalibrierten) Dipol handelt (d. h. kleiner als $0,1 \lambda$), kann dieser anstelle der Feldsonde verwendet werden. Die Antenne muss dann in drei koplanaren (vorzugsweise aufeinander senkrecht stehenden) Ausrichtungen an jedem Messort aufgestellt werden. Es sollte sorgfältig darauf geachtet werden, dass die Symmetrie der Antenne gegenüber dem Speisekabel aufrecht erhalten bleibt.
- *Entstörfilter*, bei denen sorgfältig darauf geachtet werden sollte, dass sichergestellt ist, dass die Filter keine zusätzlichen Resonanzeffekte auf den angeschlossenen Leitungen verursachen.
- *HF-Signalgenerator(en)*, der (die) in der Lage ist (sind), das interessierende Frequenzband abzudecken und der (die) für Prüfungen der Störfestigkeit eine mit einer 1-kHz-Sinuswelle mit 80 % Tiefe amplitudenmodulierte Prüfstörgröße erzeugen kann (können). Er muss (Sie müssen) entweder einen automatischen Frequenzdurchlauf haben oder im Fall von HF-Synthesizern mit frequenzabhängigen Schrittweiten und Verweilzeiten programmiert werden können. Außerdem muss er (müssen sie) manuell eingestellt werden können.

ANMERKUNG 2 Produktkomitees können eine alternative Modulationsart auswählen.

Die Verwendung von Tief- oder Bandpassfiltern kann erforderlich sein, um Probleme zu vermeiden, die durch Oberschwingungen bei der Einrichtung, die für den Signalempfang für Überwachungszwecke vorgesehen ist, verursacht werden können.

- *Leistungsverstärker*, zur Verstärkung des Signals (unmoduliert und moduliert) und um zu ermöglichen, dass der Antenne die zur Erzeugung der erforderlichen Feldstärke notwendige Leistung zugeführt wird. Die durch den Leistungsverstärker erzeugten Oberschwingungen und Verzerrungen müssen mindestens 15 dB oder mehr unterhalb des Trägerpegels liegen.

WARNHINWEIS Bei Prüfungen in Modenverwirbelungskammern treten hohe reflektierte Leistungen auf. Ein Schutz der Verstärker gegen Impedanz-Fehlanpassung kann erforderlich sein.

- *Hilfs-/Zusatzeinrichtungen*, um die Leistungspegel aufzuzeichnen, die für die Bestimmung der Ausstrahlungsgrenzwerte oder Feldstärken erforderlich sind, und um die Erzeugung dieser Pegel für die Prüfung zu steuern/regeln. Zur Überwachung der Vorwärtsleistung kann ein Richtkoppler verwendet werden.

ANMERKUNG 3 Jegliche Spezifizierung der zu verwendenden Art des Empfängers (z. B. der von CISPR spezifizierte Funkstörmessempfänger) muss vom in Frage kommenden Produktkomitee vorgenommen werden.

Es muss darauf geachtet werden, dass die Hilfs-/Zusatzeinrichtungen eine ausreichende Störfestigkeit haben.

8 Validierung der Kammer

Nach dem ursprünglichen Aufbau der Kammer oder nach jeder größeren Änderung einer bestehenden Modenverwirbelungskammer ist das sachgerechte Betriebsverhalten der Modenverwirbelungskammer mithilfe eines auf die Feldhomogenität gestützten Validierungsverfahrens in Übereinstimmung mit Anhang B nachzuweisen. Dieses Verfahren kann verwendet werden, um die kleinste nutzbare Betriebsfrequenz der benutzten Modenverwirbelungskammer zu bestimmen. Das beschriebene Validierungsverfahren für die Feldhomogenität in der Kammer wird in einem Prüf-/Arbeitsvolumen durchgeführt, das den Montagetisch und den Prüfling innerhalb der Modenverwirbelungskammer einschließt. Die Validierung der Kammer schließt nur das Verfahren der Modenänderung durch schrittweise bewegten Rührer/Tuner (d. h. schrittweise Drehung der Tuner/Rührer) der Modenverwirbelungskammer ein, während das Verfahren der Modenänderung durch kontinuierlich bewegten Rührer/Tuner (ständige Drehung der Tuner/Rührer) im Anhang C getrennt behandelt wird. Für die Ermittlung der Feldhomogenität sollten sämtliche unterstützenden Geräte (einschließlich Prüftisch) aus der Modenverwirbelungskammer entfernt werden. Die Validierung ist an 8 ausreichend voneinander entfernten Messorten für jeweils drei einzelne Achsen (x , y , z) durchzuführen, d. h. insgesamt ergeben sich 24 Messwerte je Frequenz (siehe B.1.1). Das Feld innerhalb der Kammer kann als homogen angesehen werden, wenn die maximale Standardabweichung der Messwerte oberhalb 400 MHz 3 dB beträgt, bei 400 MHz 4 dB beträgt, auf 3 dB bei 400 MHz linear abnimmt und unterhalb 100 MHz 4 dB beträgt.

Das Validierungsverfahren erfordert die Verwendung von linearen/passiven Antennen während der Prüfung des Prüflings. Die Antennen werden bei der Kalibrierung mit einem Dreiaachsen- E -Feld-Sensor (kalibriert in einer reflexionsfreien Umgebung, z. B. in Übereinstimmung mit Anhang I der IEC 61000-4-3, gültig für die Kammervalidierung) verglichen. Der Sinn dieses Aspektes der Kalibrierung ist, während der Prüfungen eine ständige Überwachung der Feldstärke mithilfe einer Antenne und den hieran angeschlossenen Beobachtungseinrichtungen mit kurzen Reaktionszeiten zu ermöglichen.

ANMERKUNG 1 Der Dynamikbereich, über den die Antwort einer Feldsonde linear sein sollte, ist in einer Modenverwirbelungskammer beträchtlich größer als in anderen Prüfeinrichtungen. Dies liegt an der resonanten Natur des Feldes im Inneren der Kammer, die große Schwankungen der Feldstärke an beliebigen Punkten innerhalb des Arbeitsvolumens in Abhängigkeit vom Rotationswinkel der Tuner/Rührer verursacht, wobei die Schwankungen typischerweise 30 dB und mehr betragen.

ANMERKUNG 2 Die Linearität der für die Kammervalidierung verwendeten Sonde muss innerhalb $\pm 0,5$ dB um eine ideale lineare Antwort in einem Bereich von $[-6$ dB, $+10$ dB], bezogen auf die mittlere Feldstärke, liegen. Die Asymmetrie dieses Intervalls begründet sich durch die korrespondierende Asymmetrie der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Feldstärke in einer Modenverwirbelungskammer, die höhere Feldstärken bevorzugt. Für die Überwachung des Feldes während Prüfungen der Störfestigkeit gilt dieser Bereich in Bezug auf den Mittelwert der maximalen Feldstärke.

WARNHINWEIS Ein besonderer Aspekt der Verwendung von Feldsonden ist die Empfindlichkeit der angeschlossenen Steuerelektronik der Sonde (Messeinheit) gegen örtliche Feldstärken innerhalb der Modenverwirbelungskammer. Hohe Werte der örtlichen Feldstärke können Fehlfunktionen oder ungenau gemessene Werte verursachen. Dies erfordert, dass

während der Kammervalidierung und/oder der Prüfung eine Kalibrierung der Sonde durchgeführt wird, bei der die gesamte Messeinheit (und nicht nur die Sensorelemente) der in der Kammer erwarteten maximalen Feldstärke ausgesetzt wird.

Zusätzlich muss eine Prüfung des Einflusses der Kammerbelastung auf die Feldhomogenität durchgeführt werden (B.1.5), um die höchstzulässige Belastung der Modenverwirbelungskammer für zukünftige Prüfungen zu bestimmen.

Vor Beginn jeder Prüfung mit Prüftisch und Prüfling in der Modenverwirbelungskammer muss Folgendes durchgeführt werden:

- Es wird ein „Schnelltest“ zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Kammer durchgeführt, wobei das zu prüfende Gerät (die zu prüfende Einrichtung) und die Messausrüstung in der Kammer aufgebaut sind (B.2). Der Zweck dieser Prüfung ist die Bestätigung, dass die Belastung der Kammer (durch den Prüfling) kleiner als diejenige ist, die während der ursprünglichen Validierung der Kammer absichtlich verwendet wurde.
- Die minimale Pulsweite (B.3), die in einer gegebenen Kammer bei pulsmodulierten Signalen nicht unterschritten werden darf, muss auf der Grundlage der Validierungsmessungen berechnet werden.

ANMERKUNG 3 Die in B.1 im Einzelnen beschriebene Validierung der Kammer muss nur nach dem ursprünglichen Aufbau und nach größeren Änderungen einer bestehenden Kammer durchgeführt werden. Der Nachweis der höchstzulässigen Belastung (A.5.4, B.1.5) muss nur nach dem ursprünglichen Aufbau oder größeren Änderungen einer bestehenden Modenverwirbelungskammer durchgeführt werden. Änderungen an den Tunern/Rührern sind als eine größere Änderung der Kammer anzusehen, wenn sie zu einer Verringerung der Effektivität der Tuner-/Rührer, wie in A.3 umrissen, führen.

9 Prüfungen

Messaufbau und -verfahren sind von der Art der durchzuführenden Prüfung abhängig. Zur Bestimmung der Prüfanforderungen für eine bestimmte Prüfung wird auf den entsprechenden Anhang, der die Art der Prüfung betrifft, verwiesen.

Es wird auf den entsprechenden Anhang, der die Art des Prüfverfahrens (d. h. Schrittbetrieb oder kontinuierlicher Betrieb des Rührers/Tuners) betrifft, verwiesen. Zur Anleitung hinsichtlich der Anwendbarkeit des Schrittbetriebs oder des kontinuierlichen Betriebs des Rührers/Tuners wird auf die Anhänge A und C verwiesen.

10 Prüfergebnisse, Prüfbericht und Prüfbedingungen

Die Prüfungen müssen entsprechend einem Prüfplan durchgeführt werden, der in den Prüfbericht aufgenommen werden muss.

Prüfergebnisse und Berichte über notwendige Maßnahmen sind von der Art der durchgeführten Prüfung abhängig. Zur Bestimmung, welche Angaben bei einer bestimmten Prüfung in den Prüfbericht aufgenommen werden müssen, wird auf den entsprechenden Anhang, der die Art der Prüfung betrifft, verwiesen.

Sofern nichts Anderes im Prüfplan angegeben ist, müssen die Prüfungen unter genormten klimatischen Bedingungen entsprechend IEC 60068-1 durchgeführt werden.

ANMERKUNG Die Erzeugung von hohen Feldstärken kann zu beträchtlichen örtlichen Erhitzungseffekten oder zur Bildung von Lichtbögen in extremen Fällen führen.

Anhang A (informativ)

Übersicht über Modenverwirbelungskammern

A.1 Einleitende Bemerkungen

A.1.1 Allgemeines

Forschungen zu elektromagnetischen Modenverwirbelungskammern werden seit mehr als 50 Jahren durchgeführt ([1]²⁾, [2], [3]) (siehe [6] bis [8] für Reviews) und erbrachten ein besseres Verständnis der Verfahren der Funktion und der Analyse ([8] bis [11]). Während der ursprüngliche Fokus dieser Forschungen auf die Messung elektromagnetischer Absorption von Materialien gerichtet war ([1] bis [3]), wurde der Aufgabenbereich der Arbeiten inzwischen erweitert, um Messungen der gestrahlten Störaussendung ([4], [30]), Prüfungen der Empfindlichkeit von elektronischen Geräten (Einrichtungen) ([5], [30]), Prüfungen der Störfestigkeit und Prüfungen der Schirmdämpfung von Kabeln, Steckverbindern und Gehäusen ([31]) einzuschließen. Modenverwirbelungskammern können auch zur Charakterisierung von bestimmten Antennen und Ausbreitungsparametern verwendet werden.

A.1.2 Größe, Form, Aufbau und Betrieb von Modenverwirbelungskammern

Eine Modenverwirbelungskammer ist ein(e) elektrisch große(r), gut leitende(r) Hohlraum oder Kammer, der (die) mit einem Mechanismus zur Änderung (Verwirbelung) seiner Moden ausgestattet ist, um elektromagnetische Messungen bzw. Prüfungen (sowohl der Störaussendung als auch der Störfestigkeit) von elektronischen Geräten (Einrichtungen) durchzuführen. Jede Einrichtung, die dieser Beschreibung genügt, kann als Modenverwirbelungskammer bezeichnet werden (im Englischen wird die Kammer auch als „Mode-stirred chamber“, als „Mode-tuned/Mode-stirred reverberation chamber“ oder als „Stirred-mode cavity“ bezeichnet). Die Erfüllung weiterer Bedingungen kann jedoch notwendig sein, bevor eine solche Einrichtung mit akzeptabler Messunsicherheit genutzt werden kann.

Im Allgemeinen stellt eine Modenverwirbelungskammer einen geschirmten Raum dar, dessen kleinste Abmessung groß gegenüber der Wellenlänge bei der kleinsten nutzbaren Frequenz (en: LUF, siehe A.1.3) ist. Sie muss außerdem ausreichend groß sein, um den Prüfling, die Tuner/Rührer und die Messantennen aufnehmen zu können. Die Kammer ist üblicherweise mit einem mechanischen Tuner oder Rührer ausgestattet, dessen Abmessungen erheblichen Bruchteilen der Kammerabmessungen bzw. der Wellenlänge bei der kleinsten nutzbaren Frequenz (en: LUF, siehe A.1.3) entsprechen. Wenn die Kammer mit HF-Energie angeregt wird, kann die dabei in der Kammer entstehende, mehrere Hohlraumresonanzen (Moden) besitzende, elektromagnetische Umgebung mit dem Tuner/Rührer „verwirbelt“ werden. Die resultierende Umgebung ist statistisch gleichförmig, isotrop (d. h. die Wellen (an einem Ort in der Kammer) fallen aus allen Richtungen ein) und die Polarisierung ist statistisch zufällig (d. h. alle möglichen Polarisierungen sind vorhanden), wenn über eine ausreichende Anzahl von Stellungen des Tuners/Rührers gemittelt wird. „Ausreichend“ bedeutet hierbei die Anzahl von Tuner-/Rührerschritten, die erforderlich sind, um die festgelegte Feldhomogenität zu erreichen.

Es ist nicht praktikabel, eine Mindestgröße der Kammer festzulegen und es liegt außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Norm, eine detaillierte Anleitung für den Entwurf (solcher Kammern) bereitzustellen. Der kritische Faktor ist, dass, wenn eine Kammer das Validierungsverfahren (siehe B.1.1) besteht, gezeigt ist, dass die Kammer die geforderte elektromagnetische Umgebung mit dem gewünschten statistischen Vertrauenspegel bereitstellt.

Sämtliche Leistungsmessungen werden üblicherweise auf die Antennenanschlüsse bezogen. Somit wird als Eingangsleistung der Kammer (P_{Eingang}) üblicherweise Vorwärtsleistung, die gegenüber den Antennenan-

²⁾ Angaben in eckigen Klammern beziehen sich auf A.6, Bezugsschriftstücke, am Ende dieses Anhangs.

schlüssen geliefert wird, genommen. In manchen Fällen ist es nötig, die reflektierte Leistung auf Grund von Fehlanpassung der Antenne/Anregung zu berücksichtigen. In solchen Fällen muss die Eingangsleistung gleich der Netto-Eingangsleistung sein, die sich ergibt zu:

$$P_{\text{Netto}} = P_{\text{Vorwärts}} - P_{\text{reflektiert}} \quad (\text{A.1})$$

A.1.3 Kleinste nutzbare Frequenz

Die Größe, Form, der Gütefaktor und die Effektivität des mechanischen Tuners/Rührers bestimmen die kleinste nutzbare Frequenz (en: LUF). Die kleinste nutzbare Frequenz (en: LUF) ist im Allgemeinen als diejenige Frequenz definiert, bei der die Kammer die betrieblichen Anforderungen erfüllt. In der Praxis, unter Berücksichtigung der in dieser Norm festgelegten Kriterien, tritt diese Frequenz typischerweise knapp oberhalb der dreifachen Frequenz der ersten Resonanzstelle der leeren Kammer auf. Für das in dieser Norm beschriebene Verfahren ist die kleinste nutzbare Frequenz (en: LUF) die kleinste Frequenz, bei der in einem Volumen, das durch acht Eckpunkte umschlossen wird, die festgelegte Feldhomogenität erreicht werden kann.

A.1.4 Gütefaktor (Q -Faktor) der Kammer

Der Gütefaktor ist ein Maß für die Fähigkeit einer Kammer oder eines Hohlraums, Energie nach Abzug von Verlusten zu speichern. Die Fähigkeit der Kammer, Energie zu speichern, wird durch die Frequenz, das Kammervolumen (und zu einem geringeren Maß durch die Form der Kammer) sowie durch die in der Kammer auftretenden elektromagnetischen Verluste bestimmt. Der vorherrschende Verlustmechanismus in einer leeren Kammer (d. h. ohne Prüfling) wird durch die Wände der Kammer und die Antennen gebildet. Andere (Weitere) Verluste können als Folge von Leckagen durch unbeabsichtigte Öffnungen oder beabsichtigte Beladungen entstehen. Je höher die Leitfähigkeit der zum Aufbau der Kammerwände verwendeten Materialien ist und je kleiner die Öffnungen sind, desto niedriger sind die Kammerverluste. Materialien wie z. B. Silber-, Kupfer- und Aluminiumbleche bieten die höchste Leitfähigkeit und haben daher die niedrigsten ohmschen Verluste der Kammer zur Folge. Andere Materialien wie z. B. unbehandelter oder lackierter Stahl oder verzinkte Bleche sind ebenfalls gebräuchlich. Für Miniatur-Hohlräume können Materialien, die bei niedrigen Temperaturen supraleitend sind, in Erwägung gezogen werden, wenn außerordentlich hohe Q -Werte gewünscht werden.

Kupfer- und Aluminiumschirme, die mit Hilfe von Flammenspray-Techniken beschichtet wurden, haben jedoch große Oberflächen und führen nicht zu Umgebungen mit hohen Q -Werten. Zusätzliche Verluste, z. B. durch Antennen, unterstützende Strukturen und den Prüfling, können den Gesamt- Q -Wert der Kammer ebenfalls beeinflussen.

Der Beitrag von ohmschen Verlusten in einer Antenne ist oft hinreichend klein, um vernachlässigt werden zu können, wie in A.1 (siehe Anhang I). Die Leistung, die benötigt wird, um in der Kammer eine bestimmte Prüffeldstärke zu erzeugen, kann aus der in Anhang B umrissenen Validierung der leeren Kammer bestimmt werden. Jedoch können der Prüfling, die erforderlichen unterstützenden Geräte und jegliches absorbierendes Material die Kammer bedämpfen, ihre Güte Q verringern und somit die Prüffeldstärken bei gleicher Eingangsleistung reduzieren. Daher müssen die Felder in einer beladenen Kammer überwacht und es muss, falls erforderlich, die Eingangsleistung erhöht werden, um diese Beladung, wie in B.2 (Schritt 7) beschrieben, zu kompensieren.

A.1.5 Betrachtungen zu Tunern/Rührern

Es gibt andere Techniken als die Verwendung von mechanischen Tunern/Rührern, mit denen ebenfalls eine statistisch gleichförmige und statistisch isotrope Umgebung erreicht werden kann. Beispiele schließen flexible Wände und bewegliche Grenzen, bewegliche Sende- und bewegliche Empfangsantennen sowie bewegliche Prüflinge und die Veränderung der Frequenz innerhalb einer gewissen Bandbreite (Einzelton-Frequenzänderung (Durchlauf) oder bandbegrenzte Geräuscherregung) oder eine Kombination hiervon ein. Obwohl diese Verfahren ein gültiges Prüfergebnis erzeugen können, geht dieses Dokument davon aus, dass die Kammer nur mit einem oder mehreren rotierenden Tuner(n) bzw. Rührer(n) ausgestattet ist. Es kann sein, dass manche der alternativen Verwirbelungsverfahren für bestimmte EMV-Prüfungen nicht anwendbar sind, z. B. kann die Frequenzverwirbelung nicht für Aussendungsmessungen verwendet werden. Die kombinierte

Verwendung von unterschiedlichen Verwirbelungstechniken (so genannte Hybridverwirbelung) kann bei der Erzielung von niedrigeren Unsicherheiten in einer gegebenen Kammer oder beim Bau einer kleineren Kammer, wenn der Unsicherheitswert vorgegeben ist, helfen.

Die Tuner/Rührer sollten für die Erzeugung der gewünschten Feldhomogenität angemessen sein. Beim Entwurf und der räumlichen Anordnung der Tuner/Rührer sollten Symmetrien vermieden werden, um die maximale Anzahl von unabhängigen Positionen, die erzeugt werden können, möglichst groß zu machen. Kammern kann es nötig sein, mehrere Tuner/Rührer zu verwenden, um die gewünschte Feldhomogenität bei den festgelegten Frequenzen zu erreichen. Ein Verfahren zur Ermittlung der Funktion der Tuner/Rührer ist in A.3 gegeben.

In manchen Kammern kann es nötig sein, mehrere Tuner/Rührer zu verwenden, um die gewünschte Feldhomogenität bei den festgelegten Frequenzen zu erreichen.

Es wird empfohlen, Schrittmotoren oder mit einem Kodierer ausgerüstete rechnergesteuerte Servomotoren zu verwenden. Drehzahlveränderliche, ständig laufende Motoren mit Keilriemen-Antrieb sind akzeptabel, jedoch muss in solchen Fällen die Reaktionszeit des Prüflings kurz im Vergleich zur Geschwindigkeit des Tuners/Rührers sein, damit diese Möglichkeit genutzt werden kann, und es kann sein, dass die Positionierung des Paddelrades weniger genau oder schlechter wiederholbar ist. Während der Zulassung (Validierung) der Kammer sollten mögliche durch den Motor verursachte elektromagnetische Beeinflussungen überprüft werden.

In der Vergangenheit wurden Prüfungen mit einer festen Anzahl von Stellungen oder Schritten (typischerweise 200) des Tuners/Rührers bei allen interessierenden Frequenzen durchgeführt [5]. Dies führt zu Unsicherheiten (d. h. statistische Inhomogenität und Anisotropie) bei den Feldeigenschaften, die als Funktion der Frequenz auf Grund der Erhöhung der Modendichte (siehe A.2.1) bei höheren Frequenzen schwanken. Wie in Bild A1 dargestellt, schwankt in diesem Fall die Unsicherheit in einer typischen Kammer in Abhängigkeit von der Frequenz beträchtlich.

Die für diese Norm entwickelte Vorgehensweise optimiert die Anzahl der Schritte oder Stellungen des Tuners/Rührers, um eine bestimmte Unsicherheit (d. h. Standardabweichung der Feldhomogenität, hier in Form des gemessenen maximalen Felds ausgedrückt) als Funktion der Frequenz zu erreichen. Dies erlaubt es, die Anzahl der Schritte mit zunehmender Frequenz zu verringern. Das Verfahren stellt ein hinreichend genaues und wirtschaftlich effizientes Verfahren zur Validierung der Kammer bereit. Es erlaubt der Bedienerperson, sowohl die Anzahl der Tuner-/Rührerschritte einzustellen, um eine gewünschte Unsicherheit zu erreichen, als auch die Fähigkeit der Kammer auf ein Maximum zu vergrößern, höhere Felder durch eine soweit als mögliche Erhöhung der Anzahl der Tuner-/Rührerschritte zu erzeugen.

A.1.6 Allgemeine Bemerkungen zur Kammervalidierung

Das Validierverfahren stellt hohe Anforderungen an die Gleichförmigkeit der innerhalb des Prüfvolumens erzeugten zeitlich (d. h. Ensemble-)gemittelten Felder [9], [10], [16], d. h. es sorgt dafür, dass ihre Gleichförmigkeit innerhalb einer festgelegten Unsicherheit liegt. Um dies sicherzustellen, sind drei Messungen mit aufeinander senkrechten Ausrichtungen der Feldsonde an jedem von acht Messorten erforderlich. Jede einzelne Messung ist unabhängig (von den anderen), woraus eine gesamte Anzahl von 24 Messungen je Frequenz resultiert. Für eine Kammer, die das Validierverfahren bestanden hat, wurde damit nachgewiesen, dass sie die Fähigkeit besitzt, die erforderliche Feldhomogenität innerhalb einer akzeptierten Unsicherheit zu erzeugen.

A.1.7 Kabelverlegung

Für die mit dem Prüfling verbundenen Leitungen gilt als allgemeine Regel, dass die Prüfergebnisse aufgrund der statistischen Feldhomogenität gegenüber der Kabelverlegung unempfindlich sind. Soweit erforderlich sind spezifische Leitlinien in Bezug auf die Kabelverlegung in den entsprechenden Anhängen gegeben.

A.2 Theorie von Hohlraumresonatoren

A.2.1 Modenverteilung in einem Hohlraumresonator, Modendichte und Q -Bandbreite

Eine Mode in einem Hohlraumresonator (auch als Eigenmode oder natürliche Mode bekannt), wie sie in 3.1.12 definiert ist, stellt eine besondere Feldverteilung dar, die durch stehende Wellen erzeugt wird. Die Modenverteilung in einem Hohlraumresonator wird durch die Randbedingungen (Form und Größe des Hohlraumresonators und der Modenverwirbelungseinrichtung). Für einen idealen, verlustlosen, leeren, geschlossenen, rechtwinkligen Hohlraumresonator mit den Abmessungen L (Länge), B (Breite) und H (Höhe) können die Resonanzfrequenzen $F_{l,m,n}$ in MHz berechnet werden durch:

$$F_{l,m,n} = 150 ((l/L)^2 + (m/B)^2 + (n/H)^2)^{0,5} \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

l, m und n die Modenindizes (mindestens zwei sind null);

L, B und H die Abmessungen der Kammer (in m).

Bild A.2 zeigt die theoretische Modenverteilung als Funktion der Frequenz für eine rechtwinklige Kammer mit den Abmessungen $10,8 \text{ m} \times 5,2 \text{ m} \times 3,9 \text{ m}$ ($L \times B \times H$). Jede Mode repräsentiert eine individuelle räumliche Feldänderung (Struktur der Modenverteilung) als Funktion des räumlichen Ortes innerhalb des Hohlraumresonators. Für diese Kammer tritt die erste Resonanzfrequenz ($F_{1,1,0}$) bei 32,096 MHz auf. Jegliche Verluste neigen dazu, die Resonanzfrequenzen unwesentlich zu erhöhen. Jede Mode besitzt ihren eigenen Moden- Q -Faktor $Q_{l,m,n}$. Der Moden- Q -Faktor nimmt ungefähr mit der Quadratwurzel der Frequenz zu. Eine „effektive Güte“ eines Hohlraumresonators mit übermäßig vielen Moden kann als gewichteter Mittelwert über die angeregten Moden definiert werden [28]. Die Hohlraumresonator-Güte-Bandbreite BW_Q wird durch $F_{l,m,n}/Q$ an den 3-dB-Punkten einer Resonanz 2. Ordnung definiert. Ein repräsentativer Wert für BW_Q ist in Bild A.3 für die Frequenz $F_{4,2,2}$ (die 60. Mode) gezeigt. Wenn der Hohlraumresonator bei mit einer Dauerstrichsignal-Quelle bei $F_{4,2,2}$ betrieben wird, werden in diesem Fall nur wenige Moden angeregt.

Bild A.4 zeigt den Einfluss einer sinkenden Güte Q des Hohlraumresonators (siehe A.1.3 und A.5.7). In diesem Fall können zusätzliche Moden angeregt werden, wenn die Kammer bei der Frequenz der 60. Mode betrieben wird, da sich die Moden aufgrund der geringeren Güte Q und kleineren Frequenzabständen überlappen. Die effektive Modenverteilung ergibt sich aus der Vektorsumme aller angeregten Moden, die mit unterschiedlichen Amplituden gewichtet werden. Die räumliche Feldänderung unterscheidet sich nun von derjenigen in einer Kammer mit höherer Güte Q . Somit kann mit einer Änderung der Güte Q die „effektive“ Modenverteilung geändert werden. Beachte, dass bei einer Erhöhung der Frequenz mehr Moden innerhalb einer gegebenen BW_Q verfügbar sind, die zu einer feineren Struktur des Feldes führen. Wiederum ergibt sich die „effektive“ Modenverteilung aus der Vektorsumme der Moden.

Die Bilder A.3 und A.4 zeigen, dass bei den niedrigeren Frequenzen und bei Frequenzlücken unterschiedlicher Größe (inhomogenes Spektrum) die Modendichte einer Kammer gering ist. Die Bilder zeigen auch, dass mit steigender Frequenz die Anzahl und Dichte der Moden im Mittel (proportional zu f^3 bzw. f^2) zunimmt. Die effektive Modenverteilung in Kombination mit der Fähigkeit des Tuners/Rührers, die Randbedingungen der Kammer zu ändern, bestimmt, wie gut die Kammer anwendbar ist.

ANMERKUNG Eine Kammer kann jede beliebige Geometrie aufweisen. Jedoch werden manche Formen, wie z. B. kugelförmige und zylindrische Formen, im Allgemeinen bei Modenverwirbelungskammern nicht verwendet, da die gekrümmten Oberflächen Brechungen (Bündelung von Strahlen) hervorrufen können, die es erschweren, eine räumliche Feldhomogenität zu erreichen, es sei denn, die Oberflächen sind mit Diffraktoren, die im Vergleich zur Wellenlänge ausreichend groß sind, ausgekleidet [12], [13] oder der Bündelungsbereich wird vermieden.

Die effektive Modenverteilung hängt sowohl von der Modendichte als auch von der Hohlraumresonator-Güte-Bandbreite bei der interessierenden Frequenz ab. Bei der Frequenz f beträgt die Modendichte $m = 8\pi V f^2 / \lambda^3$. Bei der Frequenz erster Ordnung ist der Wert von m von der Form des Hohlraumresonators unabhängig [11]. Jedoch können Korrekturen zweiter Ordnung, die von der Krümmung der Oberflächen und der Länge von

Kanten und gemeinsamen Stellen [12] abhängen bei niedrigeren Frequenzen bedeutsam werden. Die Anzahl der Moden, M , die bei der Frequenz f innerhalb der Bandbreite BW_Q angeregt sind, kann abgeschätzt werden durch

$$M = m \times BW_Q \frac{8\pi V f^3}{c^3 Q} \quad (\text{A.3})$$

Dabei ist

- f die Frequenz (in Hz);
- c die Lichtgeschwindigkeit, ungefähr $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$;
- V das Volumen des Hohlraumresonators (in m^3);
- Q der Gütefaktor (dimensionslos) bei der Frequenz f .

Allgemeiner kann die Anzahl der Moden innerhalb einer Empfänger-Bandbreite Δf für eine breitbandige Nicht-Dauerstrichsignal-Anregung (z. B. gepulste Anregung) zu $m\Delta f$ abgeschätzt werden, wobei $\Delta f \geq BW_Q$.

A.2.2 Ideale gegen unperfekte Kammereigenschaften: Auswirkung auf die Feldunsicherheit

Derzeitige Theorien besagen, dass eine „überhöhte“ Modendichte vorhanden ist, wenn eine ausreichend große Anzahl von Moden angeregt wird. In einer idealen Bedingung mit „überhöhte“ Modendichte und bei einem ausreichend effizienten Verwirbelungsvorgang entspricht die Verteilung der Energiedichte einer Chi-Quadrat- (χ^2) -Verteilung und die Verteilung der Feldstärke einer Chi- (χ) -Verteilung [10], [11], [23]. Beide Verteilungen erstrecken sich asymmetrisch um ihren Mittelwert (sehr rechtslastig). Bei niedrigeren (endlichen) Modendichten, d. h. bei niedrigeren Frequenzen, genügt die Verteilung der Empfangsleistung nicht mehr länger eine χ^2 -Verteilung, sondern eine kompliziertere Verteilung [14], [15]. Für Felder in der Nähe einer leitenden Grenze gelten ebenfalls unterschiedliche (andere) Verteilungen und Statistiken, relevant für auf dem Boden stehende oder an der Wand befestigte Geräte [16] bis [18] oder für empirische Messwerte-Verteilungen, wenn die Anzahl n der erzeugten Positionen des Tuners/Rührers (siehe A.3) vergleichsweise klein, typischerweise $n < 30$ ist [27]. Diese Unterschiede in den Feldverteilungen erhöhen die Unsicherheit und die Breite des Vertrauensintervall für das gemessene Feld. Sie beeinflussen auch die mittlere maximale und minimale Feldstärke und ihr Vertrauensintervall.

A.3 Bewertung der Tunereffektivität

Um statistische Verfahren zur Auswertung der Daten aus einer Modenverwirbelungskammer anwenden zu können, muss die Anzahl der unabhängigen Messwerte bekannt sein. Bei einer gegebenen Frequenz muss ein Tuner (oder müssen mehrere Tuner) die Randbedingungen ausreichend ändern können, um eine statistisch relevante Änderung des Feldmusters innerhalb der Kammer zu erzeugen. Wenn eine solche Änderung der Feldstruktur erzeugt wurde, ist jeder Messwert, der aus dem resultierenden Feld der neuen Tunerstellung gewonnen wurde, statistisch unabhängig von denjenigen, die bei der vorangegangenen Tunerstellung aufgenommen wurden. Es müssen deshalb Daten zum Leistungsverhalten eines Tuners gewonnen werden, aus denen die Anzahl der statistisch unabhängigen Messwerte bestimmt werden kann, die ein gegebener Tuner (oder mehrere Tuner) bei einer gegebenen Frequenz erzeugen kann (können). Diese Daten (zur Bestimmung des Reflexionsvermögens eines Tuners) ergeben sich durch Aufzeichnung der Empfangsleistung bei n Winkelstellungen mit jeweils gleichen Abständen über eine vollständige Umdrehung des Tuners. Das Leistungsverhalten eines Tuners (Tunereffektivität) kann durch Berechnung des Autokorrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Messwerten der Tunerschritte abgeschätzt werden [20]. Eine typische Berechnung des Autokorrelationskoeffizienten schließt die schrittweise Verschiebung der Messwerte x um jeweils einen Messwert für jeden Tunersschritt ein, wie nachfolgend für eine gesamte Anzahl der Messwerte von 450 gezeigt wird.

D1, D2, D3, D4, D5, D6, D450

D450, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D449

D449, D450, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D448

D448, D449, D450, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D447

Der Autokorrelationskoeffizient r kann unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$r = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (x_i - u_x)(y_i - u_y)}{\sqrt{\left(\frac{\sum_i^n (x_i - u_x)^2}{n-1} \right) \left(\frac{\sum_i^n (y_i - u_y)^2}{n-1} \right)}} \quad (\text{A.4})$$

$\uparrow \quad \uparrow$
 $\sigma_x^2 \quad \sigma_y^2$

Dabei stellt y_i die gleiche Verteilung wie x_i dar, jedoch um einen Messwert („Sample“) für jeden Tunersschritt verschoben; und n ist die Anzahl der über eine vollständige Tunerumdrehung genommenen Messwerte („Samples“).

ANMERKUNG

- x_i und y_i sind Messwerte der Empfangsleistung. Die Verwendung von Feldstärken oder in-Phase- oder Quadratur-Feldwerten anstelle der Leistung ergibt typischerweise ähnliche, aber leicht unterschiedliche Werte für r .
- u_x und u_y sind die Mittelwerte der ursprünglichen Empfangsleistung in Abhängigkeit von dem Datensatz der Tunerstellung.

Da die y -Verteilung gleich der x -Verteilung ist, gilt:

$$u_y = u_x \text{ und } \sigma_x = \sigma_y$$

Der Autokorrelationskoeffizient r kann unter Verwendung der in den meisten Tabellenkalkulationsprogrammen eingebauten Korrelationsfunktion auf der Grundlage des ursprünglichen und des verschobenen Datensatzes berechnet werden. Als Konvention werden in dieser Norm die Daten als unkorreliert angesehen, wenn der Autokorrelationskoeffizient für zunehmende Verschiebungen unterhalb einen Wert von $1/e \approx 0,37$ fällt und so verbleibt. Manchmal werden in anderen Anwendungen andere Kriterien oder Schwellenwerte verwendet. Aufgrund der statistischen Beschaffenheit des Autokorrelationskoeffizienten gilt der vorstehende Schwellenwert nur für den Fall eines unendlichen n . Für ein beliebiges endliches n und Vertrauensintervall muss der Grenzwert verringert werden [21]. Zum Beispiel kann der Schwellenwert des Autokorrelationskoeffizienten für ein 95%-Vertrauensintervall und Werte von n , die nicht kleiner als 100 sind, durch folgende Gleichung angenähert werden:

$$r = 0,37 \times \left(1 - \frac{7,22}{n^{0,64}} \right) \quad (\text{A.5})$$

Durch Division der Gesamtanzahl der Messwerte über eine vollständige Umdrehung (z. B. 450 im vorstehenden Beispiel) durch die Anzahl der Tunersschritte, die zur Verringerung des Autokorrelationskoeffizienten auf einen kleineren Wert als 0,37 nötig ist (so genannte Dezimierung), ergibt sich eine Abschätzung der Anzahl der unabhängigen Messwerte, die der Tuner bei einer bestimmten Frequenz erzeugen kann.

BEISPIEL Das vorstehende Verfahren wird für eine Kammer durch Drehung des mechanischen Tuners um 360° in 450 Tunerschritten mit gleichen Abständen bei 80 MHz, 100 MHz und 500 MHz durchgeführt. Wenn r nach 25, 15 bzw. 5 Schritten des Tuners kleiner als $0,37 \times (1 - 7,22/450^{0,64}) = 0,32$ ist, dann kann vom Tuner erwartet werden, dass er 18 unabhängige Messwerte bei 80 MHz, 30 unabhängige Messwerte bei 100 MHz und 90 unabhängige Messwerte bei 500 MHz liefert. Wie im Abschnitt A.4 gezeigt wird, kann die Anzahl der erforderlichen Tunerschritte die Fähigkeit eines einzelnen Tuners, sie zu erzeugen, überschreiten. In solchen Fällen wird ein zweiter Tuner notwendig sein, aber er ist nicht notwendigerweise ausreichend.

ANMERKUNG Das vorstehend beschriebene Messverfahren setzt die Verwendung von Tunerschritten mit gleichen Abständen voraus. Es ist bekannt, dass dies bei hohen Frequenzen und bei einem Tuner gut funktioniert. Bei mehreren Tunern können Tunerschritte mit gleichen Abständen nicht definiert werden. In der Nähe der kleinsten nutzbaren Frequenz der Kammer können Symmetrien des Tuners relevant werden. In diesem Fall ist nicht sichergestellt, dass Tunerschritte mit gleichen Abständen unkorreliert sind und es muss ein Satz von Tunerpositionen ermittelt werden, bei dem jede Paar-Korrelation kleiner als der vorstehende Grenzwert ist. Dieses Verfahren ist auch für mehrere Tuner anwendbar. Einzelheiten des Verfahrens sind in Beratung. Bei Tunerschritten mit ungleichen Abständen und bei niedrigen Frequenzen können die tatsächlichen Positionen, die eine statistische Unabhängigkeit ergeben, vom Aufstellungsort und der Ausrichtung der Antennen und während der Prüfung zusätzlich von der Größe und dem Aufstellungsort des Prüflings abhängig sein.

A.4 Statistik von Modenverwirbelungskammern

A.4.1 Feldschwankungen

Für die nachfolgende Erörterung wird angenommen, dass die Abmessungen der Kammer groß sind im Vergleich zur Anregungswellenlänge (die Kammer besitzt eine überhöhte Modendichte) und dass die Kammer eine komplexe Geometrie besitzt. Die Einführung von Antennen und effizienten Tunern sorgt für die erforderliche Komplexität in einem ansonsten regelmäßigen Hohlraumresonator.

Der Validierungsvorgang nach dieser Norm beruht auf der statistischen Natur von Feldern in komplexen Hohlraumresonatoren [2]. Es wurde experimentell gezeigt, dass die schwankenden Felder in einer Modenverwirbelungskammer unter Anwendung geeigneter statistischer Verteilungen theoretisch modelliert werden können, z. B. [9], [10], [14] bis [15], [18] für die Verteilung von 1) der Empfangsleistung an einer Antenne, bezogen auf die skalare Leistungsdichte der Kammer und das quadrierte elektrische Feld (Feldintensität), 2) der maximalen Empfangsleistung oder den Höchstwert des quadrierten elektrischen Feldes, 3) einer Komponente des elektrischen Feldes in einer Raumrichtung und 4) des Höchstwertes einer elektrischen Feldkomponente in einer Raumrichtung. Diese vier Verteilungen unterscheiden sich voneinander, stehen jedoch miteinander in Verbindung. Verteilungen für ihre Messwert-Mittelwerte, Standardabweichungen und Höchstwerte [19] sowie für kleine Sätze von unabhängigen Messwertesätzen („Samples“) sind ebenfalls verfügbar. Ferner beeinflussen Impedanz-Fehlanpassung und andere auf die Messung bezogene Aspekte die Feldstatistiken [21]. Einige besondere Eigenschaften von einigen der Verteilungen werden nachfolgend erörtert.

Die Funktion einer Modenverwirbelungskammer besteht darin, eine innerhalb akzeptabler Unsicherheits- und Vertrauensintervall-Grenzwerte statistisch gleichförmige (d. h. statistisch isotrope, gleichförmige und statistisch gleichförmig polarisierte) Prüfumgebung zu erzeugen. Dies kann durch Einbau eines mechanischen Tuners oder Rührers bewerkstelligt werden, der zur Neuverteilung (Zerstreuung) der Feldenergie verwendet wird. Der Tuner ändert die Randbedingungen innerhalb der Kammer, wenn er sich bewegt oder dreht. Wenn der Tuner in eine genügend große Anzahl von unabhängigen Positionen gebracht worden ist, liefern die Feldänderungen, die aus den Drehungen des Tuners resultieren, einen Satz von Feldbildern, die viele Ausbreitungsrichtungen und Polarisationen abdecken. Während der Drehung (des Tuners/der Tuner) weist das Feld an beliebigen Punkten (innerhalb der Kammer) große und unregelmäßige Schwankungen aufgrund sich verändernder Werte von Überlagerungen und Auslöschungen von reflektierten Wellen (Phasen) aus verschiedenen räumlichen Einfallsrichtungen und Polarisationen im jeweiligen Punkt auf. Die Größe und Richtung der Felder in allen Punkten der Kammer ist im Mittel innerhalb bestimmter Unsicherheitsgrenzen gleich. Die Adjektive „isotrop“ und „gleichförmig“ werden oft benutzt, wenn Bezug auf die durch eine Modenverwirbelungskammer erzeugte Umgebung genommen wird. Dabei ist dieser Ausdruck ziemlich irreführend, da die Felder oder die Energie in dieser Umgebung zur gleichen Zeit weder gleiche

Höhe aus allen Richtungen und gleiche Polarisationen aufweisen, noch die Energiedichte an allen Stellen gleich ist.

Zusätzlich wird die Betrachtung auf die Felder innerhalb des Arbeitsvolumens der Kammer beschränkt. Das Arbeitsvolumen ist durch Punkte oder gedachte Oberflächen definiert, die der niedrigsten Betriebsfrequenz einen Abstand von $\lambda/4$ zu den Kammerwänden und zu jeglichen Antennen, Tunern oder anderen leitenden Gegenständen besitzen. Für eine Kammer, die oberhalb 100 MHz arbeitet, beträgt dieser Abstand 0,75 m. Eine typische Modenverwirbelungskammer ist in Bild A.5 gezeigt.

A.4.2 Anzahl der erforderlichen Messwerte

Bei gegebener Verteilung der Felder innerhalb eines Hohlraumresonators kann die Anzahl der Messwerte bestimmt werden, die aufgenommen werden müssen, um die Unsicherheit des Feldes zu bestimmen. Bild A.6 zeigt eine theoretische Vorhersage der Anzahl der unabhängigen Messwerte (Änderungen der Randbedingung oder Schritte der mechanischen Tuner), die erforderlich ist, um für einen spezifischen Hohlraumresonator mit Abmessungen, wie sie in diesem Bild gezeigt sind, eine Unsicherheit des Feldes von 6 dB mit einem Vertrauensintervall von 95 % zu erhalten. Wie in Bild A.6 gezeigt wird, erhöht sich bei niedrigeren Modendichten M , definiert durch Gleichung (A.3), die erforderliche Anzahl an unabhängigen Messwerten mit abnehmender Frequenz rasch. Die Modendichte des Feldes in dieser Rechnung ist ungenügend und entspricht nicht mehr länger einer idealen Chi-Verteilung, sondern einer komplexeren Verteilung [15], [27], die durch einen zusätzlichen Parameter bestimmt wird, der von der maximal erreichbaren Anzahl von unabhängigen Tunerstellungen bei der gewählten Betriebsfrequenz abhängt, wobei diese Anzahl wiederum von der Form und Größe der Kammer abhängt. Wenn das Vertrauensintervall verkleinert wird, dann wird die Anzahl der Messwerte, die zur Erzielung der gleichen Unsicherheit erforderlich ist, verringert. In der Praxis kann es sein, dass ein mechanischer Tuner nicht in der Lage ist, die Anzahl an unabhängigen Messwerten zu erzeugen, die erforderlich ist, um die gewünschten Eigenschaften in einem gegebenen Hohlraumresonator zu erhalten. Aus diesem Grund sollte das Leistungsverhalten des Tuners ermittelt werden, wie in Abschnitt A.3 im Einzelnen ausgeführt, um die Anzahl der Messwerte, die in einem gegebenen Hohlraumresonator bei einer gegebenen Frequenz erzeugt werden kann, zu bestimmen.

A.4.3 Einfluss des Tuners auf das mittlere Feld in der Kammer

Bei einer idealen Modenverwirbelungskammer sind der volumengemittelte (d. h. räumlich gemittelte) Wert des Feldes für eine feste Randbedingung und der „Ensemble“-Mittelwert gleich [9], [10], [16]. Ein Ensemble-Mittelwert stellt den Mittelwert des Feldes an einem festen Ort unter Berücksichtigung mehrerer Randbedingungen dar. Änderungen der Randbedingungen werden typischerweise durch Drehung eines mechanischen Tuners erreicht. Jedoch treten Änderungen der Randbedingungen auch bei jeder Änderung der Anordnung von Gegenständen wie z. B. Antennen, Prüfgeräten und unterstützenden Geräten und Einrichtungen auf.

Bild A.7 zeigt die auf den „wahren“ Volumen- oder Ensemble-Mittelwert normierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) des Feldes an einem Ort innerhalb einer idealen Modenverwirbelungskammer (Erwartungswert). Wie in diesem Bild gezeigt wird, kann das Feld in der Kammer an einem beliebigen Ort für eine feste einzelne Randbedingung oder an einem festen einzelnen Ort für eine beliebige Randbedingung (Tunerstellung) ($N = 1$) um mehr als 30 dB schwanken.

Bild A.8 zeigt, dass, da die Anzahl der unabhängigen Randbedingungen (Tunerschritten) erhöht wird, der gemessene Mittelwert des in der Kammer vorhandenen Felds an jedem gegebenen Ort in der Kammer gegen den „wahren“ Ensemble-Mittelwert konvergiert. Der gemessene Mittelwert ist der „erwartete Wert“ bei mehreren Messwerten. Die Breite jeder Kurve ist ein Maß für die Spreizung der Messwerte (Unsicherheitsintervall), die an einem beliebigen Ort im Arbeitsvolumen für N -Messwertesätze („Samples“) erwartet werden kann. Die Unsicherheit des mittleren Feldwerts nimmt mit $1/\sqrt{N}$ ab [19]. Bild A.8 zeigt außerdem, dass die Unsicherheit des mittleren Feldwerts bei 12 Tunerschritten etwa 5 dB mit einem Vertrauenspegel von 95 % beträgt und bei 100 Tunerschritten etwa 2,4 dB beträgt. Dies würde einer achtfachen Erhöhung der Prüfzeit für eine Verringerung der Unsicherheit des mittleren Feldpegels um 2,6 dB entsprechen.

A.4.4 Einfluss des Tuners auf das maximale Feld in der Kammer

Die in Bild A.7 gezeigte Verteilung für $N = 1$ gilt sowohl für mittlere als auch für maximale Feldwerte, weil die an einem Ort gemessenen Höchst-, Mindest- und Mittelwerte für eine feste Stellung der Tuner alle den gleichen Wert besitzen. Die normierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) für das maximale Feld an einem beliebigen Ort innerhalb einer Kammer ist in Bild A.9 gezeigt. Wenn N ansteigt, bewegt sich die Verteilung nach rechts und wird schmaler (verringerte Unsicherheit). Die Verringerung der Unsicherheit für den maximalen Feldwert erfolgt zunächst sehr schnell, da die Anzahl der Tunerschritte erhöht wird, und verlangsamt sich dann, wenn N ansteigt.

Bild A.9 zeigt, dass die Unsicherheit des maximalen Felds bei 12 Tunerschritten etwa 7,2 dB mit einem Vertrauensintervall von 95 % beträgt und bei 100 Tunerschritten etwa 4,8 dB beträgt. Dies würde einer achtfachen Erhöhung der Prüfzeit für eine Verringerung der Unsicherheit des maximalen Feldpegels von 2,4 dB entsprechen. Im Allgemeinen nimmt die Breite des Unsicherheitsintervalls für den auf den mittleren Wert normierten Höchst- oder Mindestwert des Felds langsamer als mit $1/\sqrt{N}$ ab [19]. Auch erhöht sich den Erwartungswert für das maximale Feld um etwa 3 dB, wenn die Anzahl der Tunerschritte von 12 auf 100 Schritte erhöht wird.

Da die normierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) für das maximale Feld wie beim mittleren Feld für jeden beliebigen Ort gilt, stellt die PDF auch ein Maß für die räumliche Gleichförmigkeit bei N -Messwertsätzen („Samples“) des maximalen Feldes über das Arbeitsvolumen der Kammer dar. Eine Messung der mittleren Feldstärke in einem Ort erlaubt mit Hilfe der Feldstatistik die Abschätzung der maximalen Feldstärke an jeder beliebigen Stelle im Arbeitsvolumen. Jedoch erlaubt sie nicht die Vorhersage, bei welcher besonderen Tunerstellung dieser maximale Wert erreicht wird. Diese Tunerstellung ist für jeden räumlichen Ort anders.

A.5 Validierung der Kammer

A.5.1 Allgemeines

Zweck der Validierung ist der Nachweis, dass die erzeugten Felder für alle Polarisierungen und für alle Einfallrichtungen in allen Orten innerhalb des Arbeitsvolumens und für eine gegebene Anzahl von Tunerschritten innerhalb festgelegter Unsicherheitsgrenzen die gleiche Höhe haben. Für die Validierung ist die Verwendung von isotropen Sonden erforderlich, die den Zugang zu jeder Sondenachse erlauben. Eine kalibrierte elektrisch kurze Dipolantenne darf ersetzt werden (siehe B.1). Das Validierungsverfahren sollte einmal nach der Erstzulassung der Kammer sowie nach größeren Änderungen an dieser durchgeführt werden.

Das Verfahren der Validierung der leeren Kammer beruht auf einem Vergleich der mit Hilfe von E -Feldsonden gemessenen Spitzenwerte der Felder mit der mittleren Empfangsleistung einer Bezugsantenne. Zur Erhöhung der Genauigkeit der Messwerte von der Bezugsantenne werden die Messwerte über acht Orte innerhalb des Arbeitsvolumens gemittelt. Auch dann kann die Auswirkung der begrenzten Anzahl von Orten auf die Unsicherheit für kleine N bedeutsam sein. Ein Schätzwert für die Unsicherheit des gleichförmigen Feldpegels in der Kammer wird (nur für rechteckige Feldkomponenten) in [19] berechnet.

Die Anzahl der für die Validierung empfohlenen Messwertsätze („Samples“) beruht auf der Annahme einer „theoretischen“ Kammer mit den ungefähren Maßen $3\text{ m} \times 7\text{ m} \times 15\text{ m}$ und dem für eine aus geschweißten Stahlblechen konstruierten Kammer typischen Q . Die Anzahl der erforderlichen Messwertsätze („Samples“) wurde aufgerundet, um Abweichungen gegenüber dieser „theoretischen“ Kammer zu berücksichtigen und damit einen konservativen Nachweis sicherzustellen. Es ist möglich, dass eine im Vergleich zu dieser „theoretischen“ Kammer größere Kammer oder eine mit niedrigerem Q die Anforderungen zur Validierung mit weniger als der empfohlenen Anzahl von Schritten erfüllt.

A.5.2 Validierungsverfahren

Durch das Validierungsverfahren werden Daten der E -Feldsonde (nur Höchstwerte) sowie die Eingangsleistung der Kammer und die maximale und mittlere Empfangsleistung an einer Bezugsantenne, die

innerhalb des Arbeitsvolumens aufgestellt ist, gesammelt. Die Sondendaten werden verwendet, um die Gleichförmigkeit des Feldes zu bestimmen. Aus den Sondendaten und der Eingangsleistung der Kammer wird der Kammervalidierungsfaktor (en: CVF) bestimmt. Die mittlere Empfangsleistung der Bezugsantenne und die Eingangsleistung der Kammer werden für die Berechnung des Antennenkalibrierungsfaktors (AKF) verwendet. Der AKF wird als Bezugswert verwendet, wenn geprüft wird, ob die Kammer durch einen Prüfling zu stark „belastet“ worden ist. Die maximale Empfangsleistung an der Bezugsantenne wird verwendet, um die Gültigkeit der Ablesewerte der Sonde nachzuweisen. Sondendaten werden an den acht Orten gesammelt, die die Ecken des „gleichförmigen Feldbereichs“ bzw. des „Arbeitsvolumens“ bilden, wie in Bild A.10 gezeigt wird. Immer wenn die Sonde zu einem neuen Ort bewegt wurde, wird die Bezugsantenne zu einem neuen Ort innerhalb des Arbeitsvolumens bewegt. Die Ausrichtung der Bezugsantenne relativ zu den Kammerachsen wird dabei um wenigstens 20° relativ zu jeder Achse bei jeder Position geändert. Dies stellt sicher, dass Vorzugsrichtungen der Polarisierung des Feldes entdeckt werden. Sowohl für die Sonde als auch für die Bezugsantenne ist die Mindestanzahl von acht Orten erforderlich.

Tabelle B.1 in Anhang B führt die Anzahl der für die Durchführung der Validierung empfohlenen Tunerschritte auf. Es kann sein, dass die Anzahl der Schritte verringert oder erhöht werden muss, um die Funktion so gut wie möglich zu machen. Die Mindestanzahl der Tunerschritte muss 12 betragen.

ANMERKUNG 1 Wenn für eine Kammer gezeigt wurde, dass sie über einen Frequenzbereich von 300 MHz bis 400 MHz mit der Mindestanzahl von Tunerschritten (d. h. 12) ordnungsgemäß arbeitet, darf die Anzahl der Orte auf drei verringert werden. Für die in diesem Anhang vorgestellte Kammer. Die zur Sammlung der Daten verwendet wurde, trat die Verringerung der Anzahl der Orte bei 1 000 MHz auf.

Jede Kammer hat eine Frequenz, unterhalb der sie keine überhöhte Modendichte mehr besitzt [5], [10], [14] und unterhalb der sie dann nicht mehr weiter als Modenverwirbelungskammer benutzt werden kann. Diese Frequenz hängt am meisten von den Abmessungen der Kammer ab. Mit abnehmender Frequenz erfolgt der Übergang, wo die Kammer nicht mehr verwendbar ist, eher allmählich als abrupt. Die Belastung einer Kammer durch einen Prüfling oder durch einen leitenden oder verlustbehafteten Gegenstand kann die kleinste nutzbare Frequenz ebenfalls verringern (siehe A.5.4).

ANMERKUNG 2 In manchen Fällen ist es möglich, eine abnehmende Modendichte auszugleichen, die auftritt, da die Betriebsfrequenz den Zustand ungenügender Modendichte erreicht. Im Allgemeinen und unter Beachtung von Sorgfaltsregeln kann die Kompensation durch Erhöhung der Anzahl der Tunerschritte erreicht werden, jedoch müssen die Auswirkungen begrenzt werden und für eine Konfiguration spezifisch sein.

A.5.3 Gleichförmigkeit des Feldes

Zweck einer Modenverwirbelungskammer ist, für alle Orte innerhalb des festgelegten Arbeitsvolumens eine statistisch gleichförmige (elektromagnetische) Umgebung zu erzeugen. Das eben beschriebene Verfahren wurde zur Messung der erwarteten Höhe und Gleichförmigkeit (des Feldes) für eine gegebene Kammer unter Verwendung einer gegebenen Anzahl von Tunerschritten entworfen. Ein typischer Satz von Sondendaten, der durch Anwendung des Validierungsverfahrens erzielt wird (nur x -Achse aus Gründen der Übersichtlichkeit) ist in Bild A.11 gezeigt. Bild A.12 zeigt die Daten aus Bild A.11, normiert auf den Mittelwert der acht maximalen Ablesewerte der Sonde auf der x -Achse für jede Frequenz [B.1.1 (Schritt 10) a)]. Die Daten zeigen, dass die gemessene Gleichförmigkeit des Feldes bei etwa ± 10 dB bei 100 MHz liegt und dass dieser Wert mit steigender Frequenz kleiner wird. Beachte auch, wie die Daten bei den höheren Frequenzen eine gute Gleichförmigkeit zeigen, obwohl die Anzahl der Tunerschritte abnimmt.

ANMERKUNG 1 Die zur Sammlung der in Bild A.12 gezeigten Daten verwendete Anzahl der Tunerschritte wurde eingestellt, bevor die Werte der Tabelle B.1 bestimmt wurden. Dies erklärt die Änderung der Tunerschritte von 20 auf 18 und von 16 auf 18.

Zurzeit gibt es zwei Denkschulen, welches das beste Verfahren zur Bestimmung einer akzeptablen Gleichförmigkeit ist. Beim ersten Verfahren [29] wird eine akzeptable Gleichförmigkeit dadurch festgelegt, dass diejenigen 25 % der Daten, die die größte (gegenseitige) Abweichung besitzen, weggeworfen werden und von den verbleibenden Daten gefordert wird, dass sie innerhalb eines gegebenen Grenzwerts liegen. Beim zweiten Verfahren [30], [31] wird eine akzeptable Gleichförmigkeit dadurch bestimmt, dass die Standardabweichung sämtlicher Daten berechnet und von ihr gefordert wird, dass sie innerhalb eines gegebenen Grenzwerts liegt. Der Hauptnachteil des ersten Verfahrens besteht darin, dass die Daten, die weggeworfen

werden, kein „Gewicht“ besitzen. Dies kann dazu führen, dass die Unsicherheiten im Wesentlichen unbekannt sind. Für diese Norm wurde vereinbart, dass das Verfahren der Standardabweichung verwendet wird, weil sämtliche Daten betrachtet und mit einem geeigneten Gewicht versehen werden.

Die Standardabweichung für die in Bild A.12 gezeigten Daten ist in Bild A.13 dargestellt. Die Daten zeigen, dass in diesem Beispiel die Standardabweichung 3 dB unterhalb von etwa 200 MHz überschreitet. Als Beispiel und zum Vergleich ist die zulässige Abweichung entsprechend der Norm für kommerzielle Flugzeugnavigationsgeräte ebenfalls gezeigt [30].

ANMERKUNG 2 Es wird davon ausgegangen, dass die Kammer die Anforderungen zur Gleichförmigkeit des Feldes erfüllt, wenn die Standardabweichung sowohl für die drei einzelnen Feldkomponenten (E_x , E_y und E_z) als auch für den gesamten Datensatz (E_{gesamt}) innerhalb der festgelegten Grenzwertabweichung liegt. Der gesamte Datensatz besteht aus den 24 Messungen, die sich durch die Kombination der drei einzelnen Feldkomponenten (E_x , E_y und E_z) an den acht Orten der E -Feldsonde ergeben. Auf Grund des vorgeschlagenen Grenzwerts [30] kann die zur Erfassung dieser Daten benutzte Kammer nicht unterhalb 130 MHz verwendet werden, es sei denn, dass die Gleichförmigkeit des Feldes verbessert wird [25]. Der vorgeschlagene Grenzwert wurde von einem Technischen Komitee entwickelt, das aus Vertretern sowohl der Hersteller als auch der Behörden zusammengesetzt war.

ANMERKUNG 3 Eine außergewöhnliche Erlaubnis wurde für eine erhöhte Inhomogenität des Feldes gewährt, d. h., bis zu 4 dB für den Bereich zwischen 100 MHz und 400 MHz, vergleichbar mit 3 dB für jede Frequenz oberhalb 400 MHz (Bild A.13). Diese Erlaubnis wurde sowohl durch den Wunsch, dass diese Internationale Norm mit anderen Normen harmonisiert ist [29], als auch durch wirtschaftliche Gründe beeinflusst. Die Abmessungen der Kammer bestimmen die kleinste nutzbare Frequenz. Oft führt die Deckenhöhe der meisten Einrichtungen zu verringerten Betriebseigenschaften. Die erleichterten Anforderungen zur (verschlechterten Werte der) Feldhomogenität unterhalb 400 MHz lassen die Prüfung von sehr großen Geräten und Einrichtungen (z. B. Flugzeugen) in einer Modenverwirbelungskammer zu, ohne dass eine übermäßig große Kammer benötigt wird.

ANMERKUNG 4 Der gesamte Datensatz ist NICHT mit dem gewöhnlich verwendeten Summen-Effektivwert (RSS) von E_x , E_y und E_z identisch [30].

A.5.4 E -Feld in der Kammer

Die während der Validierung „erwartete“ Amplitude des E -Feldes in der Kammer ist einfach der arithmetische Mittelwert der 24 maximalen Ablesewerte der Sonde (der Mittelwert des Höchstwerts). Der „erwartete Wert“ ist derjenige Wert, gegen den die Kammer kalibriert wurde (siehe Bild A.9).

Es ist auch möglich, das E -Feld in der Kammer auf der Grundlage der Messungen mit der Bezugsantenne abzuschätzen ($E_{\text{Schätz}}$). Die nachfolgende Gleichung (A.6) wurde unter Verwendung von ähnlichen Verfahren, wie sie zur Ableitung der Ausdrücke für das mittlere Feld in [26] benutzt wurden, abgeleitet und ergibt eine Abschätzung für das E -Feld in der Kammer (in V/m) auf der Grundlage der maximalen Ablesewerte von der Bezugsantenne, gemittelt über die Anzahl (n) der Aufstellungsorte der Antenne.

$$E_{\text{Schätz}} = \left\langle \frac{8\pi}{\lambda} \sqrt{5 \frac{P_{\text{MaxRec}}}{\eta_{\text{rx}}}} \right\rangle_n \quad (\text{A.6})$$

Dabei ist

P_{MaxRec} die an einem Antennenaufstellungsort vorhandene maximale Empfangsleistung für eine gegebene Anzahl von Tunerschritten;

η_{rx} der Antennenwirkungsgrad der Empfangsantenne, der (wenn er nicht bekannt ist) konservativ zu 0,75 für eine logarithmisch-periodische Antenne und zu 0,9 für eine Hornantenne angenommen werden kann. Diese Größe kann aus der im Anhang I gegebenen Information bestimmt werden.

n die Anzahl der Antennenaufstellungsorte.

Für alle Messungen wird angenommen, dass die Vorwärts-Eingangleistung für alle gesammelten Daten gleich ist. Wenn dies so ist, können die Daten normiert werden, nachdem der Mittelwert der Ablesewerte der

Sonde ermittelt wurde. Wenn dies nicht so ist, müssen die Ablesewerte der Sonde auf den Wert der Eingangsleistung normiert werden, der mit dem jeweiligen Ablesewert der Sonde korrespondiert. Die Normierung des E -Feldes auf die Eingangsleistung der Kammer wird durch Division des Ablesewertes der Sonde durch die Quadratwurzel der Eingangsleistung durchgeführt. Dies kann auch für das auf der Grundlage einer Bezugsantenne abgeschätzte E -Feld durchgeführt werden.

Es sollte eine Schnellprüfung („Cross check“) durchgeführt werden, indem das erwartete, durch die Sonden gemessene E -Feld und das erwartete, auf der Grundlage der acht Antennenmessungen abgeschätzte E -Feld verglichen werden. Jegliche Unterschiede zwischen den sonden- und den antennenbasierten Messungen, die größer als ± 3 dB sind, sollten bereinigt werden (siehe auch Abschnitt 8). Beachte, dass wesentliche Unterschiede bei den niedrigeren Frequenzen zu erwarten sind. Dies liegt in erster Linie an der Belastung, die durch die Sende- und Empfangsantennen verursacht wird. Aus diesem Grund wird keine Übereinstimmung zwischen den beiden Verfahren bei Frequenzen erwartet, bei denen der Unterschied zwischen der Eingangsleistung der Kammer und der gemessenen maximalen Empfangsleistung an der Bezugsantenne 10 dB oder kleiner ist.

A.5.5 Belastungseffekte

Wenn ein Prüfling in einer Modenverwirbelungskammer angeordnet wird, besteht die Möglichkeit, dass der Prüfling die Kammer „belastet“. Die durch den Prüfling oder andere Gegenstände absorbierte Energie steht dann nicht mehr länger für die Erzeugung der gewünschten Umgebung zur Verfügung. Aus diesem Grund muss die Eingangsleistung der Kammer erhöht werden, um diese Belastung auszugleichen. Jegliche „Belastung“, die durch eine Verringerung des Arbeitsvolumens erzeugt wird (auch wenn der Prüfling nicht absorbierend ist), wird durch die Anforderung begrenzt, dass der Prüfling und sämtliche unterstützenden Geräte nicht mehr als 8 % des gesamten Kammervolumens belegen dürfen (siehe Abschnitt D.1).

ANMERKUNG 1 Tatsächlich stellt die Reflexion von HF-Energie von den Wänden die Quelle der Felder dar. Obwohl eine Antenne zur Einspeisung der HF-Energie in die Kammer benutzt wird, wird diese Energie nicht auf den Prüfling gerichtet. Wenn der Prüfling die Energie absorbiert, dann steht diese Energie nicht mehr länger zur Erzeugung der gewünschten Umgebung zur Verfügung. Die nachfolgenden Daten werden das Konzept veranschaulichen.

Vor der Durchführung jeglicher Prüfungen muss eine Prüfung in Bezug auf Belastungseffekte durchgeführt werden. Dies wird durch die Messung der mittleren von der Bezugsantenne empfangenen Leistung bei gleicher Anzahl von Tunerschritten, wie sie bei der Durchführung der Validierung mit dem Prüfling verwendet wird, durchgeführt. Die Daten aus dieser Messung werden dann mit denen der acht Validierungsmessungen verglichen. Wenn die mit dem Prüfling gemessene mittlere Empfangsleistung nicht innerhalb des akzeptablen Bereichs des während der Validierung gemessenen mittleren Feldes liegt (d. h., wenn sie deutlich höher oder niedriger als die Validierungsdaten ist), dann wird davon ausgegangen, dass die Kammer durch den Prüfling belastet wird. Dann ist ein Korrekturfaktor erforderlich, wenn die zur Erzeugung des gewünschten Prüffeldes notwendige Eingangsleistung berechnet wird. Auf diesen Faktor wird als Kammerbelastungsfaktor (CLF) Bezug genommen. Der CLF ergibt sich als Verhältnis zwischen der mit dem Prüfling unternommenen Messung und dem mittleren oder „erwarteten Wert“ aus den acht während der Validierung durchgeführten Messungen, d. h. in der gleichen Anordnung jedoch ohne Prüfling durchgeführten Messungen [30].

Zur Bestimmung des Grenzwerts, bis zu dem eine Kammer belastet werden kann, muss eine Ermittlung durchgeführt werden, um die Gleichförmigkeit des Feldes bei starker Belastung zu ermitteln (B.1.5). Ein Beispiel einer solchen Ermittlung ist in Bild A.14 gezeigt. Das Arbeitsvolumen dieser Modenverwirbelungskammer wurde mit 27 Stücken von je 122 cm großen pyramidenförmigen Absorbern belastet. Bild A.15 zeigt den Betrag der durch die Absorber in die Kammer eingeführten Belastung. Die Belastung der Kammer, bzw. der Betrag der Belastung, über den Frequenzbereich von 100 MHz bis 18 GHz schwankt von einem Höchstwert von etwa 23 dB bis zu einem Mindestwert von 10 dB mit einer mittleren Belastung von etwa 14 dB. Bild A.16 zeigt die Standardabweichung der Felder in der belasteten Kammer. Die Standardabweichung der belasteten Kammer, während sie von der in den Bildern A.12 und A.13 gezeigten Validierung der Kammer leicht abweicht, weist keine bedeutsame Minderung auf.

ANMERKUNG 2 Eine Erhöhung (anstelle einer Absenkung) der Standardabweichung um ungefähr 0,5 dB, wegen der Nähe der Sonde zu Absorbern vorhanden, verursacht, dass die Höhe des Feldes eine andere Verteilung mit höherer Unsicherheit annimmt [14].