

	DIN EN 61000-4-21 (VDE 0847 Teil 4-21)	
	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.	
ICS 33.100.01 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-21: Prüf- und Messverfahren – Verfahren für die Prüfung in der Modenverwirbelungskammer (IEC 61000-4-21:2003); Deutsche Fassung EN 61000-4-21:2003 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test methods (IEC 61000-4-21:2003); German version EN 61000-4-21:2003 Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-21: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes d'essai en chambre réverbérante (CEI 61000-4-21:2003); Version allemande EN 61000-4-21:2003 Gesamtumfang 104 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE		

Beginn der Gültigkeit

Die von CENELEC am 2003-10-01 angenommene EN 61000-4-21 gilt als DIN-Norm ab 2004-08-01.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 61000-4-21 (VDE 0847 Teil 4-21):2004-04.

Für die vorliegende Norm ist das nationale Arbeitsgremium UK 767.4 „Geräte und Verfahren zum Messen von elektromagnetischen Aussendungen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE zuständig. Das UK 767.3 „Hochfrequente Störgrößen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE wurde in die nationale Behandlung dieses Normprojekts einbezogen.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom SC A „Radio interference measurements and statistical methods“ des Internationalen Sonderausschusses für Funkstörungen (CISPR) der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) in Zusammenarbeit mit dem IEC/SC 77B „High frequency phenomena“ des IEC/TC 77 „Electromagnetic compatibility“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zum Jahr 2005 unverändert bleiben soll. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Folgende Teile der EMV-Grundnorm IEC 61000-4 bzw. EN 61000-4 sind zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm verabschiedet:

- Teil 4-1:** Übersicht über die Störfestigkeitsprüfverfahren
- Teil 4-2:** Störfestigkeit gegen die Entladung statischer Elektrizität
- Teil 4-3:** Störfestigkeit gegen hochfrequente elektromagnetische Felder
- Teil 4-4:** Störfestigkeit gegen schnelle transiente Störgrößen (Burst)
- Teil 4-5:** Störfestigkeit gegen Stoßspannungen
- Teil 4-6:** Störfestigkeit gegen leitungsgeführte Störgrößen, induziert durch hochfrequente Felder über 9 kHz
- Teil 4-7:** Allgemeiner Leitfaden für Verfahren und Geräte zur Messung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen in Stromversorgungsnetzen und angeschlossenen Geräten
- Teil 4-8:** Störfestigkeit gegen Magnetfelder mit energietechnischen Frequenzen
- Teil 4-9:** Störfestigkeit gegen impulsförmige Magnetfelder
- Teil 4-10:** Störfestigkeit gegen gedämpft schwingende Magnetfelder
- Teil 4-11:** Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen
- Teil 4-12:** Störfestigkeit gegen gedämpfte Schwingungen
- Teil 4-13:** Störfestigkeit am Wechselstrom-Netzanschluss gegen Oberschwingungen und Zwischenharmonische einschließlich leitungsgeführter Störgrößen aus der Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen
- Teil 4-14:** Störfestigkeit gegen Spannungsschwankungen
- Teil 4-15:** Flickermeter – Funktionsbeschreibung und Auslegungsspezifikation
- Teil 4-16:** Störfestigkeit gegen leitungsgeführte, asymmetrische Störgrößen im Frequenzbereich von 0 kHz bis 150 kHz
- Teil 4-17:** Störfestigkeit gegen Wechselanteile der Spannung an Gleichstrom-Netzanschlüssen
- Teil 4-20:** Messung der Störaussendung und Störfestigkeit in transversal-elektromagnetischen (TEM-) Wellenleitern

- Teil 4-21: Prüfverfahren in Modenverwirbelungskammern
- Teil 4-23: Prüfverfahren für Komponenten zum Schutz gegen HEMP und andere gestrahlte Störgrößen
- Teil 4-24: Prüfverfahren für Einrichtungen zum Schutz gegen leitungsgeführte HEMP-Störgrößen
- Teil 4-25: Störfestigkeit von Einrichtungen und Systemen gegen HEMP-Störgrößen
- Teil 4-27: Störfestigkeit gegen Unsymmetrie (der Versorgungsspannung)
- Teil 4-28: Störfestigkeit gegen Schwankungen der energietechnischen Frequenz (Netzfrequenz)
- Teil 4-29: Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen an Gleichstrom-Netzeingängen
- Teil 4-30: Verfahren zur Messung der Qualität der Versorgungsspannung
- Teil 4-32: Kompendium über Simulatoren für den in großer Höhe erzeugten elektromagnetischen Puls (HEMP)

Die Veröffentlichungen der Deutschen Fassungen erfolgen im Rahmen der Klassifikation VDE 0847.

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 Abschnittsnummer, 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 nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60050 (161):1990 + A1:1997 + A2:1998	IEV Teil 161: 2000-08	–
EN 60068-1:1994	IEC 60068-1:1988 + Corrigendum:1988-10 + A1:1992	DIN EN 60068-1:1995-03	–
EN 61000-4-3:2002 + A1:2000 + A2:2002	IEC 61000-4-3:2002 + A1:2000 + A2:2002	DIN EN 61000-4-3 (VDE 0847 Teil 4-3):2003-11	VDE 0847 Teil 4-3
EN 61000-4-6:1996 + A1:2000	IEC 61000-4-6:2003	DIN EN 61000-4-6 (VDE 0847 Teil 4-6):2001-12	VDE 0847 Teil 4-6
EN 61726:2000	IEC 61726:1999	DIN EN 61726:2000-08	–
–	IEC/CISPR 16-1:1999	E DIN VDE 0876-16-1 (VDE 0876 Teil 16-1):1998-05 + E DIN VDE 0876-16-1/A1 (VDE 0876 Teil 16-1/A1):1999-04 + E DIN VDE 0876-16-1/A2 (VDE 0876 Teil 16-1/A2):2002-05	VDE 0876 Teil 16-1 VDE 0876 Teil 16-1/A1 VDE 0876 Teil 16-1/A2

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60050 (161):1990 + A1:1997 + A2:1998	IEV Teil 161: 2000-08	–
–	IEC/CISPR 16-2:1996 + A1:1999	E DIN VDE 0877-16-2 (VDE 0877 Teil 16-2):2000-06 + E DIN VDE 0877-16-2/A1 (VDE 0877 Teil 16-2/A1):2000-06	VDE 0877 Teil 16-2 VDE 0877 Teil 16-2/A1

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

IEV Teil 161: *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Kapitel 161: Elektromagnetische Verträglichkeit; Konsolidierte Fassung aus IEC 60050-161:1990-08, Änderung 1:1997-10 und Änderung 2:1998-04*

DIN EN 60068-1, *Umweltprüfungen – Teil 1: Allgemeines und Leitfaden (IEC 60068-1:1988 + Corrigendum:1988 + A1:1992); Deutsche Fassung EN 60068-1:1994*

DIN EN 61000-4-3 (VDE 0847 Teil 4-3), *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-3: Prüf- und Messverfahren – Prüfung der Störfestigkeit gegen hochfrequente elektromagnetische Felder (IEC 61000-4-3:2002 + A1:2002); Deutsche Fassung EN 61000-4-3:2002 + A1:2002*

DIN EN 61000-4-6 (VDE 0847 Teil 4-6), *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-6: Prüf- und Messverfahren – Störfestigkeit gegen leitungsgeführte Störgrößen, induziert durch hochfrequente Felder (IEC 61000-4-6:1996 + A1:2000); Deutsche Fassung EN 61000-4-6:1996 + A1:2000*

DIN EN 61726, *Konfektionierte Kabel, Kabel, Steckverbinder und passive Mikrowellenbauteile – Messung der Schirmdämpfung mit dem Strahlungskammerverfahren (IEC 61726:1999); Deutsche Fassung EN 61726:2000*

E DIN VDE 0876-16-1 (VDE 0876 Teil 16-1), *Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Teil 1: Geräte und Einrichtungen zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit (IEC-CISPR 16-1:1993)*

E DIN VDE 0876-16-1/A1 (VDE 0876 Teil 16-1/A1), *Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Teil 1: Geräte und Einrichtungen zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Änderung 1 (IEC/CISPR 16-1:1993/A1:1997)*

E DIN VDE 0876-16-1/A2 (VDE 0876 Teil 16-1/A2), *Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Teil 1: Geräte und Einrichtungen zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Änderung 1 (IEC/CISPR 16-1:1999:1999, modifiziert)*

E DIN VDE 0877-16-2 (VDE 0877 Teil 16-2), *Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Teil 2: Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit (IEC/CISPR 16-2:1996)*

E DIN VDE 0877-16-2/A1 (VDE 0877 Teil 16-2/A1), *Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Teil 2: Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Änderung 1 (IEC/CISPR 16-2:1996/A1:1999)*

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Teil 4-21: Prüf- und Messverfahren – Verfahren für die Prüfung in der
Modenverwirbelungskammer
(IEC 61000-4-21:2003)

Electromagnetic compatibility (EMC)
Part 4-21: Testing and measurement techniques
– Reverberation chamber test methods
(IEC 61000-4-21:2003)

Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 4-21: Techniques d'essai et de mesure –
Méthodes d'essai en chambre réverbérante
(CEI 61000-4-21:2003)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2003-10-01 angenommen. Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

Vorwort

Der Text des Schriftstücks IEC/CISPR/A/455/FDIS, zukünftige 1. Ausgabe von IEC 61000-4-21, ausgearbeitet von dem IEC/CISPR/SC A „Radio interference measurements and statistical methods“ in Zusammenarbeit mit IEC/SC 77B „High frequency phenomena“ des IEC/TC 77 „Electromagnetic compatibility“, wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2004-10-01 als EN 61000-4-20 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2004-07-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2006-10-01

Anhänge, die als „normativ“ bezeichnet sind, gehören zum Norminhalt.

Anhänge, die als „informativ“ bezeichnet sind, enthalten nur Informationen.

In dieser Norm sind die Anhänge B, C, D, E und ZA normativ und die Anhänge A, F, G, H, I und J sind informativ.

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 61000-4-21:2003 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm genehmigt.

Inhalt

	Seite
Vorwort.....	2
Einleitung	9
1 Anwendungsbereich	10
2 Normative Verweisungen	10
3 Begriffe und Abkürzungen	11
3.1 Begriffe	11
3.2 Abkürzungen.....	14
4 Allgemeines	15
5 Prüfumgebungen und Einschränkungen	15
6 Anwendungen.....	16
6.1 Störfestigkeit gegen gestrahlte Störgrößen	16
6.2 Gestrahlte Störaussendungen.....	16
6.3 Messungen der Schirmdämpfung	16
7 Prüfeinrichtung.....	16
8 Kalibrierung der Kammer.....	17
9 Prüfungen	18
10 Prüfergebnisse, Prüfbericht und Prüfbedingungen	18
Anhang A (informativ) Übersicht über Modenverwirbelungskammern	20
A.1 Einleitende Bemerkungen	20
A.2 Theorie von Hohlraumresonatoren.....	21
A.3 Tunereffektivität	22
A.4 Statistik von Modenverwirbelungskammern.....	24
A.4.1 Anzahl der erforderlichen Messwerte	24
A.4.2 Einfluss des Tuners auf das mittlere Feld in der Kammer	24
A.4.3 Einfluss des Tuners auf das maximale Feld in der Kammer	25
A.5 Kalibrierung der Kammer.....	25
A.5.1 Kalibrierungsverfahren	26
A.5.2 Gleichförmigkeit des Feldes	27
A.5.3 <i>E</i> -Feld in der Kammer.....	28
A.5.4 Belastungseffekte	28
A.5.5 Erzeugung einer Prüfumgebung – Störfestigkeit.....	29
A.5.6 Bestimmung der abgestrahlten Leistung – Aussendungen.....	29
A.5.7 Andere Gesichtspunkte	30
A.6 Bezugsschriftstücke.....	31
Anhang B (normativ) Kalibrierung für das Verfahren der Modenänderung durch schrittweise bewegten Rührer/Tuner (Schrittbetrieb des Tuners/Rührers).....	42
B.1 Kalibrierung: Gleichförmigkeit des Feldes in der Kammer und Validierung der Belastung.....	42
B.1.1 Validierung der Gleichförmigkeit des Feldes.....	42

	Seite
B.1.2 Kalibrierung der Empfangsantenne	45
B.1.3 Einfügdungsdämpfung der Kammer	45
B.1.4 Abschätzung des <i>E</i> -Feldes in der Kammer unter Verwendung von Antennen	46
B.1.5 Nachweis der maximalen Belastung der Kammer.....	46
B.2 Kalibrierung: Nachweis des Leistungsvermögens der Kammer mit Prüfling.....	46
B.3 Kalibrierung des <i>Q</i> und der Zeitkonstante	47
Anhang C (normativ) Kalibrierung der Kammer für das Verfahren der Modenänderung durch kontinuierlich bewegten Rührer/Tuner (kontinuierlicher Betrieb des Tuners/Rührers)	51
C.1 Kontinuierlicher Betrieb des Rührers/Tuners – Betrachtungen	51
C.2 Betrachtungen zum Verfahren der Modenänderung durch kontinuierlich bewegten Rührer/Tuner.....	52
C.2.1 Zeitliches Antwortverhalten/Betriebszyklus des Prüflings	52
C.2.2 Rotationsrate des Rührers/Tuners.....	53
C.2.3 Wirkung des Rührers/Tuners auf das erwartete <i>E</i> -Feld	53
C.3 Punkte, die beim kontinuierlichen Betrieb des Rührers/Tuners behandelt werden müssen	53
C.4 Bezugsschriftstücke	54
Anhang D (normativ) Prüfung der Störfestigkeit gegen gestrahlte Felder	56
D.1 Prüfaufbau	56
D.2 Kalibrierung.....	56
D.3 Verfahren der Prüfung der Störfestigkeit gegen gestrahlte Felder	56
D.3.1 Bestimmung der Anforderungen an die Eingangsleistung der Kammer	56
D.3.2 Auswahl von Frequenzdurchlaufraten/Schrittweiten/Intervallen.....	57
D.4 Durchführung der Prüfung	57
D.5 Prüfbericht.....	58
D.6 Bezugsschriftstücke	58
Anhang E (normativ) Messungen von gestrahlten Aussendungen.....	60
E.1 Einleitung	60
E.2 Messaufbau	60
E.3 Kalibrierung.....	60
E.4 Verfahren der Messung der Aussendung von gestrahlten Feldern (en: RE)	61
E.5 Bestimmung der abgestrahlten Leistung	61
E.6 Abschätzung des durch einen Prüfling erzeugten Freiraum-(Fern)Feldes.....	62
E.7 Prüfbericht.....	62
E.8 Bezugsschriftstücke	63
Anhang F (informativ) Messungen der Schirmdämpfung von konfektionierten Leitungen, Leitungen, Steckverbindern, Hohlleitern und passiven Mikrowellenbauteilen	65
F.1 Messungen der Schirmdämpfung des Prüflings.....	65
F.2 Beschreibung des Messaufbaus.....	65
F.2.1 Die Modenverwirbelungskammer	65
F.2.2 Antennen.....	65

	Seite
F.2.3 Messaufbau	65
F.2.4 Prüfling.....	65
F.2.5 Verbindungsgeräte	66
F.3 Messverfahren.....	66
F.3.1 Allgemeines	66
F.3.2 Messung des Prüflings	66
F.3.3 Alternatives Verfahren zur Messung des Prüflings	67
F.4 Überprüfung des Messaufbaus	67
F.5 Bezugsschriftstücke.....	67
Anhang G (informativ) Messungen der Schirmdämpfung von Dichtungen und Materialien	69
G.1 Übersicht.....	69
G.2 Messung der Schirmdämpfung.....	69
G.3 Beschreibung des Messaufbaus	70
G.3.1 Messaufbau für Dichtungen.....	70
G.3.2 Messaufbau für Materialien	70
G.3.3 Modenverwirbelungskammer	70
G.3.4 Antennen	70
G.3.5 Messaufbau	71
G.3.6 Verbindungsgeräte	71
G.3.7 Kalibrierung der Prüfvorrichtung.....	71
G.3.8 Bestimmung des Dynamikbereichs der Messung	72
G.4 Messverfahren.....	73
G.4.1 Allgemeines	73
G.4.2 Messung des Prüflings	73
G.4.3 Alternatives Verfahren für die Messung eines Prüflings	74
G.5 Übertragungsquerschnitt	74
G.5.1 Abschätzung der Schirmdämpfung eines Gehäuses	75
G.6 Überwachung des Messaufbaus	75
G.7 Bezugsschriftstücke.....	76
Anhang H (informativ) Messungen der Schirmdämpfung von Gehäusen	80
H.1 Übersicht.....	80
H.2 Messung der Schirmdämpfung.....	80
H.3 Beschreibung des Messaufbaus	80
H.3.1 Messaufbau für Gehäuse	81
H.3.2 Die Modenverwirbelungskammer.....	81
H.3.3 Antennen	81
H.3.4 Messaufbau	81
H.3.5 Verbindungsgeräte	81
H.3.6 Vorbereitung des Gehäuses.....	81

	Seite
H.3.7 Bestimmung des Dynamikbereichs der Messung	82
H.4 Messverfahren	83
H.4.1 Allgemeines	83
H.4.2 Messung des Prüflings	83
H.4.3 Alternatives Verfahren für die Messung eines Prüflings.....	84
H.5 Überwachung des Messaufbaus	84
H.6 Bezugsschriftstücke	84
Anhang I (informativ) Messungen der Antenneneffektivität	87
I.1 Antenneneffektivität	87
I.2 Effizienz der Messantenne	87
I.3 Bezugsschriftstücke	88
Anhang J (informativ) Direkte Ermittlung der Leistungsmerkmale einer Modenverwirbelungskammer mit Hilfe von Koeffizienten der Anisotropie des Feldes und der Inhomogenität des Feldes	89
J.1 Einleitung	89
J.2 Feldanisotropiekoeffizienten	89
J.2.1 Definitionen	89
J.2.2 Ermittlungsverfahren.....	90
J.2.3 Verteilungen	91
J.2.4 Abhängigkeit von der Größe des Messwertesatzes („Samples“)	91
J.3 Feldinhomogenitätskoeffizienten	92
J.3.1 Definitionen	92
J.3.2 Ermittlungsverfahren.....	92
J.3.3 Verteilungen	93
J.3.4 Abhängigkeit von der Größe des Messwertes („Sample“).....	93
J.4 Feldanisotropie oder Feldinhomogenität	93
J.5 Ergänzungen.....	93
J.5.1 Verteilung von A_{eff}	93
J.5.2 Mindestanzahl von Messwertesätzen (Samples)	93
J.6 Bezugsschriftstücke	94
Literaturhinweise	99
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen.....	100
Bilder:	
Bild A.1 – Typische Feldhomogenität für 200 Tunerschritte	32
Bild A.2 – Theoretische Modenverteilung für eine 10,8 m × 5,2 m × 3,9 m große Kammer.....	32
Bild A.3 – Theoretische Modenverteilung, wenn die Gütefaktor-Bandbreite der Hohlraumresonanz (Mode) 60. Ordnung überlagert ist.....	33
Bild A.4 – Theoretische Modenverteilung, wenn eine größere Gütefaktor-Bandbreite (kleineres Q) der Hohlraumresonanz (Mode) 60. Ordnung überlagert ist.....	33
Bild A.5 – Typische Modenverwirbelungskammer	34
Bild A.6 – Theoretische Anforderungen an die Messwertaufnahme (Sampling) für ein Vertrauensintervall von 95 % [siehe Gleichung (A.3) zur Berechnung der Modendichte]	35

Bild A.7 – Theoretische Anforderungen an die Messwertaufnahme (Sampling) für ein verringertes Vertrauensintervall.....	36
Bild A.8 – Normierte PDF für eine elektrische Feldkomponente an festen Orten für die Messung mit einem einzelnen Messwert (Sample)	36
Bild A.9 – Normierte PDF für den Mittelwert einer elektrischen Feldkomponente an einem festen Ort für eine Messung mit N Messwerten („Samples“)	37
Bild A.10 – Normierte PDF für das Maximum einer elektrischen Feldkomponente an einem festen Ort für eine Messung mit N Messwerten (Samples).....	37
Bild A.11 – Arbeitsvolumen der Kammer	38
Bild A.12 – Typische Sondendaten.....	39
Bild A.13 – Auf den Mittelwert normierte Daten für die x -Komponente des E -Felds der Sondendaten (acht Sonden)	39
Bild A.14 – Standardabweichung für die E -Feldkomponenten von acht Sonden	40
Bild A.15 – Verteilung der Absorber für die Prüfung in Bezug auf Belastungseffekte.....	40
Bild A.16 – Kammerbelastung am Beispiel einer mit Absorbern belasteten Kammer aus Bild A.15	41
Bild A.17 – Standardabweichung für die elektrischen Feldkomponenten von acht Sonden in der belasteten Kammer	41
Bild B.1 – Sondenpositionen für die Kalibrierung der Kammer	50
Bild C.1 – Empfangsleistung (in dBm) als Funktion der Tunerumdrehung (in s) bei 500 MHz	55
Bild C.2 – Empfangsleistung (in dBm) als Funktion der Tunerumdrehung (in s) bei 1 000 MHz	55
Bild D.1 – Beispiel einer geeigneten Prüfeinrichtung	59
Bild E.1 – Beispiel einer geeigneten Prüfeinrichtung.....	64
Bild F.1 – Typischer Messaufbau	68
Bild G.1 – Typischer Messaufbau	77
Bild G.2 – Aufbau einer typischen Prüfvorrichtung für die Prüfung von Dichtungen und/oder Materialien	78
Bild G.3 – Für die Kalibrierung angeordnete Prüfvorrichtung	79
Bild H.1 – Typischer Prüfgehäuseaufbau für die Prüfung von Gehäusen für Standgeräte	86
Bild H.2 – Typischer Prüfgehäuseaufbau für die Prüfung von Gehäusen für Tischgeräte.....	86
Bild J.1 – Theoretische und typische gemessene Verteilungen der Feldanisotropiekoeffizienten in einer Modenverwirbelungskammer mit guter Qualität der Modenänderung bei kontinuierlichem Betrieb des Rührers/Tuners	95
Bild J.2 – Theoretische und typische gemessene Verteilungen der Feldanisotropiekoeffizienten in einer Modenverwirbelungskammer mit schlechter Qualität der Modenänderung bei kontinuierlichem Betrieb des Rührers/Tuners	96
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	97
Bild J.4 – Typische gemessene Werte der Feldanisotropiekoeffizienten als Funktion von N in einer Modenverwirbelungskammer mit schlechter Qualität der Modenänderung bei kontinuierlichem Betrieb des Rührers/Tuners	98
Tabellen:	
Tabelle A.1 – Anforderungen an die Messwerte (Sampling)	27
Tabelle B.1 – Anforderungen an den Messwert (Sampling)	48

Tabelle B.2 – Grenzabweichungs-Anforderungen für die Gleichförmigkeit des Feldes 49

Tabelle J.1 – Typische Werte für den gesamten Feldanisotropiekoeffizienten für eine „mittlere“ und „gute“
Qualität der Modenverwirbelung 94

Einleitung

Die Reihe IEC 61000 wird in verschiedenen Teilen veröffentlicht 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 61000-4 gilt für die Prüfung der Störfestigkeit und der Messung der Nutz- und Störaussendung von elektrischen und/oder elektronischen Geräten (Einrichtungen) sowie für die Prüfung der Schirmdämpfung. Es werden nur gestrahlte Phänomene betrachtet. Er legt die Prüfverfahren fest, die für die Verwendung von Modenverwirbelungskammern zur Durchführung von Prüfungen der Störfestigkeit gegen gestrahlte Störgrößen, Messungen der von gestrahlten Aussendungen und Prüfungen der Schirmdämpfung erforderlich sind.

Zweck dieses Teiles ist die Festlegung eines allgemeinen Bezuges 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 Beurteilung dieser Auswirkungen. Die festgelegten Prüfverfahren haben in erster Linie zum Ziel, eine angemessene Wiederholpräzision von Prüfergebnissen verschiedener Prüflaboratorien bei der qualitativen Untersuchung der Auswirkungen zu ermöglichen.

Dieser Teil der IEC 61000-4 ist nicht dafür vorgesehen, die Prüfungen festzulegen, die auf bestimmte Geräte oder System(e) anzuwenden sind. Sein Hauptziel ist es, einen allgemeinen grundlegenden Bezug für alle betroffenen Produktkomitees der IEC zu geben. Die Produktkomitees haben die Grenzwerte und Verfahren für die Messung der Aussendungen in Absprache mit IEC/CISPR auszuwählen. Sie bleiben für die geeignete Auswahl der Prüfungen der Störfestigkeit und der für ihr Gerät (ihre Einrichtung) anzuwendenden Prüfschärfgrade (Prüfpegels) verantwortlich. Dieser Teil der IEC 61000-4 beschreibt andere Prüfverfahren als die IEC 61000-4-3 und die IEC/CISPR 16-2. Die anderen Prüfverfahren können in Absprache mit IEC/CISPR und IEC/TC 77 verwendet werden, falls dies durch die Produktkomitees festgelegt wird.

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 Teiles der IEC 61000 gelten die in IEC 60050(161) (IEV) angegebenen 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

Änderung des Zustands eines materiellen Mediums oder des Vakuums, gekennzeichnet durch ein elektromagnetisches Feld, das zeitlich variabel ist, wobei diese Änderung sich mit einer Geschwindigkeit ausbreitet, die an jedem Punkt und in jeder Richtung durch die Eigenschaften des Mediums bestimmt ist

[IEV 121-11-63]

ANMERKUNG Eine elektromagnetische Welle wird durch Änderungen elektrischer Ladungen oder elektrischer Ströme erzeugt.

3.1.3

Fernfeld

Bereich des elektromagnetischen Feldes einer Antenne, 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

[IEV 712-02-02]

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.

3.1.4

Feldstärke

bei Messungen entweder der elektrischen oder der magnetischen Komponente des Feldes im Fernfeld angewendete und in V/m oder A/m ausgedrückte Größe; jede dieser Maßeinheiten kann in die anderen umgewandelt werden

ANMERKUNG Für Messungen im Nahfeld werden die Begriffe „elektrische Feldstärke“ oder „magnetische Feldstärke“ verwendet, je nachdem, ob das elektrische oder magnetische Feld gemessen wird. In diesem Feldbereich ist die Beziehung zwischen der elektrischen und magnetischen Feldstärke und dem Abstand (zur Quelle) komplex und schwierig zu erfassen, da diese von den jeweiligen Konfigurationen abhängt. Da es im Allgemeinen nicht möglich ist, die zeitlichen und räumlichen Verhältnisse der verschiedenen Komponenten des komplexen Feldes zu bestimmen, ist auch die Leistungsflussdichte im Allgemeinen nicht bestimmbar.

Die Definition nach IEEE Std 100 ist wie folgt:

Feldstärke

(elektromagnetische Welle) allgemeiner Begriff, der üblicherweise die Größe des elektrischen Feldvektors bezeichnet und gewöhnlich in V/m ausgedrückt wird, der aber auch die Größe des magnetischen Feldvektors bezeichnet und dann gewöhnlich in A/m ausgedrückt wird

ANMERKUNG Bei Frequenzen oberhalb 100 MHz und insbesondere bei Frequenzen oberhalb 1 000 MHz wird statt der Feldstärke im Fernfeldbereich manchmal die Leistungsflussdichte P angegeben. Für eine linear polarisierte Welle im Freiraum ist $P = E^2 / (\sqrt{\mu_0} \epsilon_0)$.

Dabei sind

E die elektrische Feldstärke;

μ_0 und ϵ_0 die magnetische bzw. elektrische Freiraumkonstante.

Wenn in P in W/m^2 und E in V/m ausgedrückt wird, wird der Nenner oft auf 120π gerundet. Siehe auch elektrische Feldstärke, magnetische Feldstärke, Messsystem.

3.1.5

Polarisation

$\vec{P}$

an einem gegebenen Punkt innerhalb eines Raumbereichs mit quasi-infinitesimalem Volumen V eine vektorielle Größe gleich dem Quotient aus dem elektrischen Dipolmoment $\vec{p}$ der Substanz, die in diesem Bereich enthalten ist, und dem Volumen V

$$\vec{P} = \frac{\vec{p}}{V} \quad (1)$$

ANMERKUNG 1 Die elektrische Polarisation $\vec{P}$ genügt der Beziehung

$$D = \epsilon_0 E + \vec{P} \quad (2)$$

Dabei ist

D die elektrische Flussdichte;

E die elektrische Feldstärke;

ϵ_0 die elektrische Feldkonstante.

[IEV 121-11-37, modifiziert]

ANMERKUNG 2 Die magnetische Polarisation (Symbole B_i , J) ist die vektorielle Größe gleich dem Produkt aus der Magnetisierung M und der magnetischen Feldkonstante μ_0

$$J = \mu_0 M \quad (3)$$

[IEV 121-11-54]

3.1.6

Modenverwirbelungskammer

geschirmte 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 Die Prüfung in einer Modenverwirbelungskammer (en: reverberation chamber) kann als ein stochastischer Vorgang beschrieben werden, bei dem der mechanische „Tuner“/Rührer die einzelnen Hohlraumresonanzen (Moden) in der Kabine „verwirbelt“. Die Kammern werden im englischen auch als „stirred-mode“- „mode-stirred“- oder „mode-tuned“-Kammern bezeichnet.

3.1.7

Gütefaktor einer Modenverwirbelungskammer

Q

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:

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \left\langle \frac{P_{AveRec}}{P_{Input}} \right\rangle \quad (4)$$

Dabei ist

V das Volumen der Kammer in m³;

λ die Wellenlänge in m;

$\left\langle P_{AveRec}/P_{Input} \right\rangle$ das Verhältnis der über eine Tuner-/Rührerumdrehung 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 die Frequenzbandbreite, innerhalb der die einzelnen Hohlraumresonanzen (Moden) der Modenverwirbelungskammer korreliert sind (siehe A.2). Die BW_Q einer Modenverwirbelungskammer kann mit nachfolgender Gleichung berechnet werden:

$$BW_Q = f/Q \quad (5)$$

Dabei ist

f die Frequenz;

Q der in 3.1.7 definierte Gütefaktor.

3.1.9

Funktionsausfall bzw. Fehlfunktion

Beendigung der Fähigkeit eines Geräts (einer Einrichtung), seine (ihre) beabsichtigten Funktionen auszuführen, oder die Ausführung von unbeabsichtigten Funktionen durch das Gerät (die Einrichtung)

3.1.10

gestrahlte Aussendung

jegliche Nutz- oder Störaussendung eines elektrischen Geräts

3.1.11

Tuner/Rührer

aus elektrisch leitfähigem Material konstruiertes mechanisches Gerät, das die elektromagnetischen Randbedingungen innerhalb der Kammer 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 einen beträchtlichen Teil 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 und mit allen möglichen Polarisierungen einzufallen), wenn dieses über eine genügend große Anzahl von Tunerstellungen gemittelt wird.

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

3.2 Abkürzungen

ACF	Antenna Calibration Factor	AKF	Antennenkalibrierfaktor
CCF	Chamber Calibration Factor		Kammerkalibrierfaktor
CDF	Cumulative Distribution Function	KVF	kumulative Verteilungsfunktion
CISPR	Comité International Special des Perturbations Radioélectriques		Internationaler Sonderausschuss für Funkstörungen
CLF	Chamber Loading Factor		Kammerbelastungsfaktor
CW	Continuous Wave		Dauerwelle
EM	Electromagnetic		elektromagnetisch
EMV	Electromagnetic Compatibility		Elektromagnetische Verträglichkeit
EMI	Electromagnetic Interference		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
IL	Insertion loss		Einfügungsdämpfung
ISO	International Standardization Organization		Internationale Normungsorganisation
JTF	Joint Task Force		Gemeinsame Arbeitsgruppe
LUF	Lowest Usable Frequency		kleinste nutzbare Frequenz
NIST	National Institute of Standards and Technology		Nationales Institut für Standards und Technologien
OATS	Open-area test site		Freifeld
PDF	Probability Density function		Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
RE	Radiated Emissions		gestrahlte Aussendungen

RF	Radio Frequency	Hochfrequenz; Funkfrequenz
RMS	Root Mean Square	Effektivwert
RSS	Root Sum of the Squares	Summen-Effektivwert
Rx	Receive (antenna)	Empfang (Antenne)
SE	Shielding Effectiveness	Schirmdämpfung
SW	Square Wave modulation	Rechteckmodulation
TFCF	Test Fixture Calibration Factor	Kalibrierfaktor der Prüfvorrichtung
Tx	Transmit (antenna)	Senden (Antenne)

4 Allgemeines

Die meisten elektronischen Geräte (Einrichtungen) können in irgendeiner Weise durch elektromagnetische Felder beeinflusst werden. Diese Felder werden häufig durch Quellen wie zum Beispiel kleine Hand-sprechfunkgeräte, die vom Bedien-, Wartungs- oder Sicherheitspersonal verwendet werden, stationäre Funk-sender oder Fernseh-Rundfunksender, Funkanlagen in Fahrzeugen und verschiedene industrielle elektro-magnetische Quellen erzeugt.

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 moderaten Eingangsleistungen und das Nichtvorhandensein von Absorbern macht das Erzeugen von hohen Feldstärkepegeln sicherer, da die Brandgefahr durch das Zünden von Absorbern beseitigt ist.

Neben der absichtlich erzeugten elektromagnetischen Energie existieren auch ungewollt erzeugte Felder, die durch Geräte wie z. B. Schweißgeräte, Thyristoren und Leuchtstofflampen sowie beim Schalten von induktiven Lasten usw. verursacht werden. Diese Felder werden zum größten Teil als leitungsgeführte elektrische Störgrößen wirksam und als solche in anderen Teilen der IEC 61000 behandelt. Jedoch behandelt diese Norm auch die Messung der gestrahlten Störaussendung solcher Geräte. Maßnahmen, die zur Verhinderung von Störungen durch elektromagnetische Felder angewendet werden, verringern üblicherweise auch Auswirkungen, die von den vorgenannten Quellen stammen.

Die elektromagnetische Umgebung wird durch die Stärke des elektromagnetischen Feldes bestimmt (elektrische Feldstärke in V/m, magnetische Feldstärke in A/m). Die Feldstärke kann ohne hochentwickelte Messgeräte nur schwierig gemessen und durch klassische Gleichungen und Formeln auf Grund von Verzerrungen und/oder Reflexionen der elektromagnetischen Wellen durch umgebende Strukturen oder in der Nähe aufgestellte andere Einrichtungen nur schwierig berechnet werden.

5 Prüfungen und Einschränkungen

Das Prüfverfahren unter Verwendung einer Modenverwirbelungskammer ist sowohl für sehr 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.

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) bestimmt. 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. Zurzeit legt die IEC 80 MHz als Grenze zwischen Prüfungen der Störfestigkeit gegen gestrahlte und 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.

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 Kalibrierung der Kammer und Prüfverfahren ab. Das Einspeisen einer vorher bestimmten HF-Leistung erzeugt die gewünschten (Prüf-)Feldstärken in der Kammer. Der Pegel dieser HF-Leistung wird von den Kalibrierungsdaten der Kammer, wie sie in den [Anhängen B](#) und/oder [C](#) angegeben sind, abgeleitet.

6.2 Gestrahlte Störaussendungen

Die Verwendung von Modenverwirbelungskammern für Messungen von (sowohl gewollten als auch ungewollten) gestrahlten Störaussendungen ist in [Anhang E](#) erfasst. Bei dem hierfür beschriebenen Verfahren wird der Betrag der vom Prüfling abgestrahlten HF-Leistung innerhalb der Messbandbreite gemessen. Wie bei der Prüfung der Störfestigkeit gegen gestrahlte Störgrößen werden die in den [Anhängen B](#) und/oder [C](#) angegebenen Kalibrierungsdaten 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“ (z. B. eine Modenverwirbelungskammer innerhalb einer anderen). Dieser Anhang deckt auch die Kalibrierung 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, Anziehmomente 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.
- *Mechanische(r) Tuner/Rührer*, dessen jeweilige Abmessung 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 seine Abmessung in einer Dimension mindestens drei Viertel der kleinsten Kammerabmessung betragen sollte. Weiterhin sollte

jeder Tuner/Rührer so geformt sein, 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 jedes andere linear polarisierte 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 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 von $1,5 \times 10^{-3}$ Dekaden/s oder langsamer 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,* um das Signal zu verstärken (unmoduliert und moduliert) und zu ermöglichen, dass die Antenne die erforderliche Feldstärke erzeugt. 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 kann erforderlich sein.

- *Hilfs-/Zusatzeinrichtungen,* um die für die geforderte Feldstärke notwendigen Leistungspegel aufzuzeichnen und die Erzeugung dieser Pegel für die Prüfung zu steuern/regeln.
- *Hilfs-/Zusatzeinrichtungen,* um die für die mit den geforderten Grenzwerten der Störaussendung verbundenen Leistungspegel aufzuzeichnen.

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

8 Kalibrierung der Kammer

Nach dem Neuaufbau oder nach jeder größeren Änderung einer bestehenden Modenverwirbelungskammer ist das sachgerechte Betriebsverhalten der Modenverwirbelungskammer mithilfe eines auf die Feldhomogenität gestützten Kalibrierungsverfahrens in Übereinstimmung mit [Anhang B](#) nachzuweisen. Dieses Verfahren wird angewendet, um die kleinste nutzbare Betriebsfrequenz der verwendeten Modenverwirbelungskammer zu bestimmen. Die beschriebene Kalibrierung der Feldhomogenität in der Kammer muss in einem Prüf-/Arbeitsvolumen, das den Montagetisch und den Prüfling innerhalb der Modenverwirbelungskammer einschließt, durchgeführt werden. Die Kalibrierung der Kammer betrifft nur das

Verfahren der Modenänderung durch schrittweise bewegten Rührer/Tuner (schrittweise Drehung der Tuner/Rührer) der Kammer, 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 Kammer entfernt werden. Die Kalibrierung ist an 8 Messorten für jeweils drei einzelne Achsen (x , y , z) durchzuführen, d. h., insgesamt an 24 Messpunkten (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 Kalibrierungsverfahren erfordert die Verwendung von linearen/passiven Antennen während der Prüfung des Prüflings. Die Antennen werden bei der Kalibrierung mit einem (im freien Raum kalibrierten) Dreiachsen- E -Feld-Sensor 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. Wiederum ist der Prüftisch für diese Prüfung zu entfernen und die Prüfung muss zur gleichen Zeit wie die Prüfung der Feldhomogenität durchgeführt werden.

Zusätzlich muss nach dem ursprünglichen Aufbau oder nach größeren Änderungen einer bestehenden Modenverwirbelungskammer eine Prüfung des Einflusses der Kammerbeladung auf die Feldhomogenität durchgeführt werden ([B.1.5](#)), um die höchstzulässige Belastung der Modenverwirbelungskammer bei zukünftigen 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 Kalibrierung 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 Kalibriermessungen berechnet werden. Wenn die Zeitkonstante der Kammer bei mehr als 10 % aller Messfrequenzen größer als das 0,4fache der erforderlichen Pulsdauer ist, müssen entweder Absorber in die Kammer eingebracht oder die Pulsdauer muss verlängert werden (Letztere darf aber 100 μ s nicht überschreiten).

ANMERKUNG Die in [B.1](#) im Einzelnen beschriebene Kalibrierung 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 aus ihnen Änderungen der Tuner-/Rührereffektivität, wie in [A.3](#) umrissen, resultieren.

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.

Anhang A (informativ)

Übersicht über Modenverwirbelungskammern

A.1 Einleitende Bemerkungen

Forschungen über Modenverwirbelungskammern werden seit mehr als 20 Jahren durchgeführt und erbrachten bedeutsame Fortschritte bezüglich des Verständnisses der Funktion solcher Kammern ([1]²⁾, [2], [3]). Obwohl die ursprüngliche Absicht hinter den Forschungen die Messung der Schirmdämpfung von Kabeln, Steckverbindern und Gehäusen war (siehe [17]), wurde der Aufgabenbereich der Arbeiten erweitert, um die Prüfung der Empfindlichkeit von elektronischen Geräten (Einrichtungen), der Störfestigkeit von Artillerie und Messungen der Störaussendung einzuschließen.

Eine Modenverwirbelungskammer ist ein(e) elektrisch große(r), gut leitende(r), geschlossene(r) Hohlraum oder Kammer, der (die) für EMV-Prüfungen (sowohl Störaussendung als auch Störfestigkeit) von elektronischen Geräten (Einrichtungen) verwendet werden kann. Jede Einrichtung, die dieser Beschreibung genügt, kann als Modenverwirbelungskammer bezeichnet werden. Die Erfüllung weiterer Bedingungen kann jedoch notwendig sein, um eine solche Einrichtung mit akzeptabler Messunsicherheit nutzen zu können [4].

Im Allgemeinen stellt eine Modenverwirbelungskammer einen geschirmten Raum dar, dessen kleinste Abmessung groß gegenüber der Wellenlänge der kleinsten nutzbaren Prüffrequenz (LUF) ist. Die Kammer ist üblicherweise mit einem mechanischen Tuner oder Rührer ausgestattet, dessen Abmessungen einem erheblichen Bruchteil der Kammerabmessungen bzw. der Wellenlänge der LUF 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 und isotrop (d. h. die Wellen (an einem Ort in der Kammer) fallen aus allen Richtungen und in jeder Polarisation ein), wenn über eine ausreichende Anzahl von Stellungen des mechanischen Tuners/Rührers gemittelt wird. „Ausreichend“ bedeutet hierbei eine Anzahl von Tuner-/Rührerschritten, die die festgelegte Feldhomogenität ergibt. Zur Erzielung einer statistisch gleichförmigen und statistisch isotropen Umgebung sind auch andere Mittel als mechanische Tuner akzeptabel.

Die Modendichte der Kammer und die Effektivität des mechanischen Tuners/Rührers bestimmen die LUF. Als LUF wird im Allgemeinen diejenige Frequenz akzeptiert, bei der die Kammer die betrieblichen Anforderungen erfüllt. Diese Frequenz tritt im Allgemeinen knapp oberhalb der dreifachen Frequenz der ersten Resonanzstelle der leeren Kammer auf. In der Praxis wird die kleinste nutzbare Frequenz durch die Geometrie der Kammer, die Effektivität des Tuners/Rührers und die Güte der Kammer bestimmt. Für das in dieser Norm beschriebene Verfahren der Prüfung in Modenverwirbelungskammern ist die LUF die kleinste Frequenz, bei der in einem Volumen, das durch einen Kalibrierdatensatz an acht Orten definiert ist, die festgelegte Feldhomogenität eingehalten wird.

Die Güte beschreibt die Fähigkeit der Kammer oder des Hohlraums, Energie zu speichern. Die Fähigkeit der Kammer, Energie zu speichern, wird durch die Verluste in der Kammer bestimmt. Die vorherrschenden Verluste in einer leeren Kammer werden durch die Wände verursacht. Je höher die Leitfähigkeit der zum Aufbau der Kammer verwendeten Wände ist, desto niedriger sind die Wandverluste. Materialien wie z. B. Kupfer- und Aluminiumbleche bieten die höchste Leitfähigkeit und haben daher die niedrigsten Verluste der Kammer zur Folge. Andere Materialien wie z. B. unbehandelter oder lackierter Stahl oder verzinkte Bleche sind ebenfalls gebräuchlich.

Kupfer- und Aluminiumschirme, die mit leitfähigen Lacken behandelt sind, haben u. U. große Oberflächen und führen zu keiner hohen Güte Q . Zusätzliche Verluste durch Antennen, unterstützende Strukturen oder Verluste des Prüflings beeinflussen ebenfalls die gesamte Güte Q der Kammer.

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

Als Eingangsleistung in die Kammer ($P_{\max}$) wird üblicherweise die Vorwärtsleistung am Fußpunkt der Antenne definiert. In einigen Fällen ist es nötig, die reflektierte Leistung auf Grund von Fehlanpassung der Antenne zu berücksichtigen. In diesem Fall ist die Eingangsleistung gleich der Netto-Eingangsleistung, die sich ergibt zu:

$$P_{\text{Net}} = P_{\text{Forward}} - P_{\text{reflected}} \quad (\text{A.1})$$

Die Leistung, die notwendig ist, um in der Kammer eine bestimmte Prüffeldstärke zu erzeugen, kann aus der in [Anhang B](#) umrissenen Kalibrierung der leeren Kammer bestimmt werden. Jedoch können der Prüfling (EUT), 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, falls erforderlich, die Eingangsleistung erhöht werden, um diese Beladung, wie in [B.2](#) (Schritt 7) beschrieben, zu kompensieren.

Die Tuner/Rührer sollten für die Erzeugung der gewünschten Feldhomogenität angemessen sein. 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 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. Ein Verfahren zur Ermittlung der Funktion des Tuners/Rührers ist in [A.3](#) gegeben.

In der Vergangenheit wurden Prüfungen mit 200 Stellungen oder Schritten des mechanischen Tuners/Rührers durchgeführt [\[1\]](#). Dies führte zu Unsicherheiten (d. h. statistische Inhomogenität) bei den Feldeigenschaften, die als Funktion der Frequenz auf Grund der Erhöhung der Modendichte bei höheren Frequenzen schwankten. Wie in [Bild A1](#) dargestellt, schwankt die Unsicherheit in einer typischen Kammer in Abhängigkeit von der Frequenz beträchtlich, wenn die Anzahl der Tuner-/Rührerschritte konstant gehalten wird. Die für diese Norm entwickelte Vorgehensweise optimiert die Anzahl der Schritte oder Stellungen des Tuners/Rührers, um eine konstante Unsicherheit als Funktion der Frequenz zu erreichen.

Die beschriebene Vorgehensweise bietet ein hinreichend genaues und wirtschaftlich effizientes Verfahren zur Kalibrierung der Kammer. Sie ist insofern flexibel, dass sie der Bedienperson erlaubt, sowohl die Anzahl der Tuner-/Rührerschritte einzustellen, um eine gewünschte Unsicherheit zu erreichen, als auch die Fähigkeit der Kammer auszunutzen, höhere Felder durch Erhöhung der Anzahl der Tuner-/Rührerschritte zu erzeugen.

Das Kalibrierverfahren prüft die zu untersuchende Kammer mit hohen Anforderungen. Die dafür erforderlichen Ergebnisse sorgen dafür, dass die zeitlich gemittelten Felder, die im Prüfvolumen erzeugt werden, innerhalb einer vorgegebenen Unsicherheit gleichförmig sind. Um die Einhaltung der Anforderung sicherzustellen, müssen an jedem der acht Messorte drei Messungen mit aufeinander senkrechten Ausrichtungen der Feldsonde durchgeführt werden. Jede einzelne Messung ist unabhängig (von den anderen), was zu einer gesamten Anzahl von 24 Messungen führt. Wenn eine Kammer das Kalibrierverfahren bestanden hat, wurde damit nachgewiesen, dass sie die Fähigkeit besitzt, die erforderliche Feldhomogenität zu erzeugen.

A.2 Theorie von Hohlraumresonatoren

Die Modenverteilung in einem Hohlraumresonator wird durch die Randbedingungen bestimmt. Für einen idealen, verlustlosen, rechtwinkligen Hohlraumresonator mit den Abmessungen L (Länge), B (Breite) und H (Höhe) können die Resonanzfrequenzen $F_{l,m,n}$ in MHz berechnet werden durch (siehe [\[1\]](#)):

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

Dabei sind:

l , m und n die Modenindizes;

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 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.

Die Hohlraumresonator-Güte-Bandbreite, BW_Q , ist definiert als $F_{l,m,n}/Q$ an den 3-dB-Punkten einer Verteilung 2. Ordnung [5], [6]. Als 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 $F_{4,2,2}$ betrieben wird, werden in diesem Fall nur wenige Moden angeregt.

Bild A.4 zeigt den Einfluss einer sinkenden Güte Q des Hohlraumresonators. In diesem Fall können zusätzliche Moden angeregt werden, wenn die Kammer bei der Frequenz der 60. Mode betrieben wird. Das resultierende Feldbild (Modenverteilung) ergibt sich aus der Vektorsumme aller angeregten Moden mit unterschiedlichen Amplituden. Die räumliche Feldänderung unterscheidet sich von derjenigen bei einer Kammer mit höherer Güte Q . Somit kann mit einer Änderung der Güte Q das „wirksame“ Feldbild (Modenverteilung) geändert werden. Beachte, dass bei einer Erhöhung der Frequenz mehr Moden innerhalb einer gegebenen BW_Q verfügbar sind (d. h. es besteht eine Korrelation). Wiederum ergibt sich das „wirksame“ Feldbild (Modenverteilung) aus der Vektorsumme der Moden.

Die Bilder A.3 und A.4 zeigen, dass bei den niedrigeren Frequenzen die Modendichte einer Kammer gering ist. Die Bilder zeigen auch, dass mit steigender Frequenz die Anzahl und Dichte der Moden zunimmt. Das wirksame Feldbild (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. kreisförmige und zylindrische Formen, im Allgemeinen bei Modenverwirbelungskammern nicht verwendet, da die gekrümmten Oberflächen Brechungen (Bündelung von Strahlen) hervorrufen können, die die Erzeugung räumlicher Feldhomogenität erschweren [2].

Das wirksame Feldbild (Modenverteilung) hängt sowohl von der theoretischen Modendichte als auch von der Hohlraumresonator-Güte-Bandbreite bei der interessierenden Frequenz ab. Die Anzahl der Moden, M , die innerhalb einer BW_Q vorhanden sind, kann abgeschätzt werden durch

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

Dabei ist

f die Frequenz in Hz und
 V das Volumen des Hohlraumresonators in m^3
 M von der Kammergeometrie unabhängig [1].

Für vergleichsweise niedrige Frequenzen können Korrekturen 2. Ordnung für Gleichung (A.3) bei Kammern mit beliebigen Geometrien berechnet werden. Diese Korrekturen sind proportional zu f [7].

Derzeitige Theorien besagen, dass eine überhöhte Modendichte vorhanden ist, wenn eine ausreichende Anzahl von Moden angeregt wird. In diesem Fall wurde für die Verteilung der Energiedichte gezeigt, dass sie einer Chi-Quadrat-Verteilung (χ^2) entspricht [2]. Bei niedrigeren Modendichten erfüllen die Verteilungen der Empfangsleistung keine χ^2 -Verteilung, sondern eine komplizierter zusammengesetzte Exponentialverteilung.

Es ist nicht praktikabel, eine Mindestgröße für eine Modenverwirbelungskammer festzulegen, und es liegt außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Norm, detaillierte Konstruktionshinweise zu geben. Der ausschlaggebende Faktor ist: Wenn eine Kammer das Kalibrierverfahren besteht (siehe B.1.1), dann zeigt dies, dass sie die erforderliche elektromagnetische Umgebung mit der gewünschten statistischen Unsicherheit zur Verfügung stellen kann.

A.3 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 Feldbildes 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 gewonnen werden, aus denen die Anzahl

der statistisch unabhängigen Messwerte bestimmt werden kann, die ein gegebener Tuner (oder mehrere Tuner) erzeugen kann (können). Diese Daten (zur Bestimmung des Reflexionsvermögens eines Tuners) ergeben sich durch Beobachtung der Empfangsleistung über eine vollständige Umdrehung des Tuners unter Verwendung von Tunerschritten mit gleichen Abständen. Die Qualität eines Tuners (Tunereffektivität) kann durch Berechnung des Autokorrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Messwerten der Tunerschritte abgeschätzt werden [9]. Eine typische Berechnung des Autokorrelationskoeffizienten schließt die schrittweise Verschiebung der Messwerte um jeweils einen Messwert für jeden Tunerschritt, wie nachfolgend für eine gesamte Anzahl der Messwerte von 450 gezeigt wird, ein.

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:

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

$\uparrow$ $\uparrow$
 σ_x^2 σ_y^2

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

ANMERKUNG

- x_i und y_i sind Messwerte der Empfangsleistung;
- 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 (es existiert nur eine Datenreihe, die Verteilung der verschobenen Daten ist gleich der Verteilung des ursprünglichen Datensatzes), gilt:

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

Der Autokorrelationskoeffizient r kann unter Anwendung der in den meisten Tabellenkalkulationsprogrammen eingebauten Korrelationsfunktion berechnet werden, indem der ursprüngliche Datensatz mit den verschobenen Datensätzen verglichen wird. Die Daten werden als unkorreliert angesehen, wenn der Autokorrelationskoeffizient kleiner als 0,37 ist. Durch Division der Gesamtanzahl der Messwerte (z. B. 450 im vorstehenden Beispiel) durch die Anzahl der Tunerschritte, die zur Verringerung des Autokorrelationskoeffizienten auf einen kleineren Wert als 0,37 nötig ist, ergibt sich eine Abschätzung der Anzahl der unabhängigen Messwerte, die der Tuner bei einer Frequenz erzeugen kann.

ANMERKUNG Das beschriebene Messverfahren wird in einer Kammer über eine vollständige Umdrehung des mechanischen Tuners unter Zugrundelegung von 450 Tunerschritten mit gleichen Abständen bei 80 MHz, 100 MHz und 500 MHz durchgeführt. Wenn der Autokorrelationskoeffizient nach 25, 15 bzw. 5 Schritten des Tuners kleiner als 0,37 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.

A.4 Statistik von Modenverwirbelungskammern

Der Kalibriervorgang nach dieser Norm beruht auf der statistischen Beschaffenheit von komplexen Hohlraumresonatoren [2]. Es wurde experimentell gezeigt, dass die Felder in einer Modenverwirbelungskammer unter Anwendung geeigneter statistischer Modelle theoretisch vorhergesagt werden können [5], [6], [10], [11]. Diese Modelle definieren Verteilungsfunktionen für 1) die Empfangsleistung an einer Antenne, die auf die skalare Leistungsdichte der Kammer und das quadrierte elektrische Feld bezogen ist, 2) die maximale Empfangsleistung oder den Höchstwert des quadrierten elektrischen Feldes, 3) eine Komponente des elektrischen Feldes in einer Raumrichtung und 4) den Höchstwert der elektrischen Feldkomponente in einer Raumrichtung. Diese vier Verteilungen unterscheiden sich voneinander, stehen jedoch miteinander in Verbindung. In diesem Anhang wird die Statistik von Modenverwirbelungskammern nicht im Einzelnen erklärt, aber es werden einige spezielle Eigenschaften von einigen Verteilungsfunktionen nachfolgend erörtert. Der Zweck einer Modenverwirbelungskammer ist, eine statistisch homogene (d. h. statistisch isotrope) Prüfumgebung mit einer akzeptablen Unsicherheit und akzeptablen Vertrauensbereichen bereitzustellen. Dies kann durch Einbau eines mechanischen Tuners oder Rührers in eine Schirmkabine erreicht werden, der zur Neuverteilung 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 nahezu alle Richtungen und Polarisationen abdecken. Weiterhin ist die Größe und Richtung der einzelnen Feldkomponenten an allen Punkten in der Kammer innerhalb bestimmter Unsicherheitsgrenzen gleich. Der Ausdruck „isotrop“ wird oft benutzt, wenn Bezug auf die durch eine Modenverwirbelungskammer erzeugte Umgebung genommen wird. Dabei ist dieser Ausdruck ziemlich irreführend, da die Felder in dieser Umgebung nicht gleichzeitig mit einer Größe aus allen Richtungen und Polarisationen einfallen. Aus diesem Grund sollte der Ausdruck „isotrop“ mit Vorsicht benutzt werden, wenn von Modenverwirbelungskammern gesprochen wird.

Für die nachfolgende Erörterung wird angenommen, dass die Abmessungen der Kammer im Vergleich zur Anregungswellenlänge der Kammer groß sind (die Kammer besitzt eine überhöhte Modendichte [5]) und dass die Kammer eine komplexe Anordnung besitzt. Die Einführung von Antennen und Tunern stellt die erforderliche Komplexität in einem ansonsten regulären Hohlraumresonator sicher. Zusätzlich wird die Betrachtung auf die Felder innerhalb des Arbeitsvolumens der Kammer beschränkt. Das Arbeitsvolumen ist definiert durch einen Abstand von $\lambda/4$ von den Kammerwänden und von jeglichen Antennen, Tunern oder anderen Gegenständen bei der niedrigsten Betriebsfrequenz. Für eine Kammer, die oberhalb 100 MHz arbeitet, würde dieser 0,75 m betragen. Eine typische Modenverwirbelungskammer ist in Bild A.5 gezeigt.

A.4.1 Anzahl der erforderlichen Messwerte

Bei gegebener Verteilung der Felder innerhalb eines Hohlraumresonators kann die Anzahl der Messwerte bestimmt werden, die aufgenommen werden müssen, um den Feldpegel innerhalb einer gegebenen Unsicherheit 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 gegebenen Hohlraumresonator 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, definiert durch Gleichung A.3, die Anzahl der erforderlichen Messwerte. Wenn das Vertrauensintervall verkleinert wird, dann wird die Anzahl der Messwerte, die zur Erzielung der gleichen Unsicherheit erforderlich ist, verringert. Bild A.7 zeigt, dass die Anzahl der Messwerte verringert werden kann, wenn die Unsicherheit des Feldes mäßig verringert wird. Wie vorstehend festgehalten wurde, beruht die Anzahl der in den Bildern A.6 und A.7 aufgenommenen Messwerte auf der Theorie der Statistik ([2], [10]). In der Praxis kann es sein, dass der mechanische Tuner nicht in der Lage ist, die erforderliche Anzahl von unabhängigen Messwerte zu erzeugen und somit die gewünschte Verteilungsfunktion zu ergeben. Aus diesem Grund sollte die Effektivität des Tuners, wie in Abschnitt A.3 im Einzelnen ausgeführt, ermittelt werden; dies liefert die Anzahl der Messwerte, die durch einen gegebenen Tuner bei einer gegebenen Frequenz erzeugt werden kann.

A.4.2 Einfluss des Tuners auf das mittlere Feld in der Kammer

Bei einer idealen Modenverwirbelungskammer sind der volumengemittelte (räumlich gemittelte) Wert des Feldes für eine feste Randbedingung und ein „Ensemble“-Mittelwert gleich [2]. Ein Ensemble-Mittelwert stellt den Mittelwert des Feldes an einem festen Ort für mehrere Randbedingungen dar. In Modenverwirbelungskammern werden Änderungen der Randbedingungen typischerweise durch Drehung eines mechanischen Tuners erreicht. Jedoch treten Änderungen der Randbedingungen auch bei jeder Änderung der Anordnung

von in Betrieb befindlichen Gegenständen wie z. B. Antennen, Prüfgeräten und unterstützenden Geräten und Einrichtungen auf.

Bild A.8 zeigt die auf den „wahren“ Volumen- oder Ensemble-Mittelwert normierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) des Feldes an einem Ort innerhalb einer idealen Modenverwirbelungskammer. Wie in **Bild A.8** gezeigt wird, kann das Feld in der Kammer an einem beliebigen Ort und unter einer einzelnen Randbedingung oder an einem einzelnen Ort und unter einer beliebigen Randbedingung um mehr als 30 dB schwanken. **Bild A.8** zeigt außerdem, dass etwa 98 % der Daten für einen einzelnen Messwert ($N = 1$) zwischen + 10 dB und – 20 dB liegen würden. **Bild A.9** zeigt, dass, da die Anzahl von Randbedingungen (Tunerschriften) erhöht wird, der gemessene Mittelwert des in der Kammer vorhandenen Felds an jedem gegebenen Ort in der Kammer gegen den „wahren“ Mittelwert konvergiert. Der gemessene Mittelwert ist der bei mehreren Messwerten „erwartete Wert“. Die Breite jeder Kurve ist ein Maß für die Unsicherheit, die im Mittel an einem beliebigen Ort im Arbeitsvolumen für N -Messwerte („Samples“) erwartet werden kann. Beachte, dass die Verbesserung der Unsicherheit des mittleren Feldwerts sehr schnell erreicht wird, da die Anzahl der Tunerschriften mit wachsendem N zuerst erhöht und dann verringert wird. **Bild A.9** zeigt auch, dass bei 12 Tunerschriften die Unsicherheit des mittleren Feldwerts etwa 5 dB (mit einem Vertrauenspegel von 95 %) und bei 100 Tunerschriften etwa 2,4 dB beträgt. Dies würde einer achtfachen Erhöhung der Prüfzeit bei einer Verringerung der Messunsicherheit des mittleren Feldpegels von 2,6 dB entsprechen.

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

Die in **Bild A.8** 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 PDF für das maximale Feld an einem beliebigen Ort innerhalb einer Kammer ist in **Bild A.10** gezeigt. Wenn N ansteigt, bewegt sich die Verteilung nach rechts und wird schmaler (verringerte Unsicherheit). Wie beim Mittelwert des Feldes wird auch beim maximalen Feld die Verringerung der Unsicherheit schon bei einer geringen Erhöhung von N erreicht.

Bild A.10 zeigt, dass die Unsicherheit des maximalen Feldes bei 12 Tunerschriften etwa 7,2 dB mit einem Vertrauensintervall von 95 % und bei 100 Tunerschriften etwa 2,4 dB beträgt. Dies würde einer achtfachen Erhöhung der Prüfzeit bei einer Verringerung der Messunsicherheit des maximalen Feldpegels von 2,4 dB entsprechen. Beachte auch, dass die Erhöhung der Anzahl der Tunerschriften von 12 auf 100 Schritte den Erwartungswert für das maximale Feld um etwa 3 dB erhöht.

Da die 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 -Messwerten („Samples“) des maximalen Feldes über das Arbeitsvolumen der Kammer dar.

A.5 Kalibrierung der Kammer

Die Kalibrierung dient dem Nachweis, dass die erzeugten Felder für alle Polarisierungen (d. h. für alle Einfallrichtungen in allen Orten innerhalb des Arbeitsvolumens) und für eine gegebene Anzahl von Tunerschriften innerhalb festgelegter Unsicherheitsgrenzen die gleiche Höhe haben. Für die Kalibrierung ist die Verwendung von isotropen Sonden erforderlich, die den Zugang zu jeder Sondenachse erlauben. Das Kalibrierungsverfahren sollte einmal nach dem Neuaufbau der Kammer sowie nach größeren Änderungen an dieser durchgeführt werden.

Das Verfahren der Kalibrierung 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.

Die Anzahl der für die Kalibrierung empfohlenen Messwerte („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 Messwerte („Samples“) wurde aufgerundet, um Abweichungen 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 an die Kalibrierung mit weniger als der empfohlenen Anzahl von Schritten erfüllt.

A.5.1 Kalibrierungsverfahren

Durch das Kalibrierungsverfahren werden Daten der *E*-Feldsonde (nur Höchstwerte) sowie die Eingangsleistung der Kammer und die maximale und mittlere Empfangsleistung einer Bezugsantenne, die innerhalb des Arbeitsvolumens aufgestellt ist, ermittelt. Die Sondendaten werden verwendet, um die Gleichförmigkeit des Feldes zu bestimmen. Aus den Sondendaten und der Eingangsleistung der Kammer wird der Kalibrierungsfaktor der Kammer bestimmt. Die mittlere Empfangsleistung der Bezugsantenne und die Eingangsleistung der Kammer werden für die Bestimmung 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 der Bezugsantenne wird verwendet, um die Gültigkeit der Ablesewerte der Sonde nachzuweisen. Sondendaten werden an den acht Orten aufgenommen, die die Ecken des „gleichförmigen Feldbereichs“ bzw. das „Arbeitsvolumen“ bilden, wie ebenfalls [Bild A.11](#) zeigt. 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 Polarisation des Feldes entdeckt werden (d. h., in der Kammer ist keine vorherrschende Polarisation vorhanden). Sowohl für die Sonde als auch für die Bezugsantenne ist die Mindestanzahl von acht Orten erforderlich.

ANMERKUNG 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 trat die Verringerung der Anzahl der Orte bei 1 000 MHz auf.

Wie vorstehend gezeigt wurde, hängt die Gleichförmigkeit des Feldes von der Anzahl der Tunerstellungen (*N*), die bei der Erfassung der Daten verwendet wurde, ab. Mit einer vergleichsweise geringen Anzahl von Tunerschritten (d. h. 12) kann ein ausreichend gleichförmiges Feld erzeugt werden. Wie vorstehend ausgeführt wurde, trifft dies für Hohlraumresonatoren mit hoher Modendichte zu. Jede Kammer hat eine Frequenz, unterhalb der sie keine ausreichende Modendichte mehr besitzt und unterhalb der sie dann nicht mehr weiter als Modenverwirbelungskammer benutzt werden kann. Diese Frequenz ist von den Abmessungen der Kammer abhängig. Mit abnehmender Frequenz erfolgt der Übergang, wo die Kammer nicht mehr verwendbar ist, eher allmählich als abrupt.

In manchen Fällen ist es möglich, eine abnehmende Modendichte zu niedrigeren Frequenzen hin auszugleichen. Eventuell kann die Kompensation durch Erhöhung der Anzahl der Tunerschritte erreicht werden, wobei dieses begrenzt ist. [Tabelle A.1](#) listet die Anzahl der Tunerschritte auf, die für die Durchführung der Kalibrierung „empfohlen“ wird. Es kann erforderlich sein, dass die Anzahl der Schritte verkleinert oder vergrößert werden muss, um die Funktion zu erreichen. Die Mindestanzahl der Tunerschritte darf nicht kleiner als 12 sein.

Tabelle A.1 – Anforderungen an die Messwerte (Sampling)

Frequenzbereich	Anzahl der für die Kalibrierung und Prüfung empfohlenen Messwerte („Samples“) ^a	Anzahl der für die Kalibrierung erforderlichen Frequenzen ^b
f_s bis $3 f_s^c$	50	20
$3 f_s$ bis $6 f_s$	18	15
$6 f_s$ bis $10 f_s$	12	10
oberhalb $10 f_s$	12	20/Dekade
^a D. h. unabhängige Tunerstellungen oder Schritte, mindestens 12 Stellungen. ^b Logarithmische Abstände. ^c f_s = Startfrequenz (siehe A.1 für die niedrigste verwendbare Frequenz).		

A.5.2 Gleichförmigkeit des Feldes

Zweck einer Modenverwirbelungskammer ist, für alle Orte innerhalb des festgelegten Arbeitsvolumens eine innerhalb gewisser Unsicherheitsgrenzen statistisch gleichförmige (elektromagnetische) Umgebung zu erzeugen. Das eben beschriebene Verfahren wurde zur Messung der erwarteten Höhe und Gleichförmigkeit der Feldstärke bei einer gegebenen Kammer unter Verwendung einer gegebenen Anzahl von Tunerschritten entworfen. Ein typischer Satz von Sondendaten, der durch Anwendung des Kalibrierungsverfahrens erzielt wird (nur x -Achse aus Gründen der Übersichtlichkeit) ist in Bild A.12 gezeigt. Bild A.13 zeigt die Daten von Bild A.12, 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 mit steigender Frequenz zunimmt. Beachte auch, wie die Daten bei den höheren Frequenzen eine gute Gleichförmigkeit zeigen, obwohl die Anzahl der Tunerschritte abnimmt.

ANMERKUNG 1 Durch die Anwendung der in der Tabelle A.1 angegebenen Anzahl der Tunerschritte ist bei den für eine Kammer beispielhaft dargestellten Werten in Bild A.13 nicht überall die erforderliche Gleichförmigkeit erreicht.

Zurzeit gibt es zwei Verfahren zur Bestimmung einer akzeptablen Gleichförmigkeit. Beim ersten Verfahren [12] 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 [13] wird eine akzeptable Gleichförmigkeit dadurch bestimmt, dass die Standardabweichung der Daten berechnet und von ihr gefordert wird, dass diese innerhalb eines gegebenen Intervalls liegt. Der Hauptnachteil des ersten Verfahrens besteht darin, dass es keine „Gewichtung“ für die Daten, die weggeworfen werden, gibt. Dies kann dazu führen, dass die Unsicherheiten im Wesentlichen unbekannt sind. Für diese Norm wurde vereinbart, dass das Verfahren der Standardabweichung verwendet wird. Der Grund für die Übernahme des Verfahrens der Standardabweichung besteht darin, dass alle Daten betrachtet und mit einer geeigneter Gewichtung versehen werden.

Die Standardabweichung für die in Bild A.13 gezeigten Daten ist in Bild A.14 dargestellt. Die Daten zeigen, dass die Standardabweichung 3 dB unterhalb von etwa 200 MHz überschreitet. Zum Vergleich ist die zulässige Abweichung entsprechend der Norm für kommerzielle Flugzeugnavigationsgeräte als stark gestrichelte Linie ebenfalls gezeigt [13].

ANMERKUNG 2 In dieser Norm ist der Grenzwert gleich dem in [13] vorgeschlagenen Grenzwert für Frequenzen, die beiden Normen gemeinsam sind. 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.

ANMERKUNG 3 Der gesamte Datensatz ist NICHT mit dem gewöhnlich verwendeten Summen-Effektivwert (RSS) von E_x , E_y , und E_z identisch. Auf Grund des vorgeschlagenen Grenzwerts kann die zur Erfassung dieser Daten benutzte Kammer nicht unterhalb 130 MHz verwendet werden, es sei denn, dass die Gleichförmigkeit des Feldes verbessert wird [15]. Der vorgeschlagene Grenzwert wurde von einem Technischen Komitee entwickelt, das aus Vertretern sowohl der Hersteller als auch der Behörden zusammengesetzt war.

A.5.3 E-Feld in der Kammer

Die während der Kalibrierung „erwartete“ Amplitude des E -Feldes in der Kammer ist einfach der Mittelwert der 24 maximalen Ablesewerte der Sonde (das Mittel des Höchstwerts). Der „erwartete Wert“ ist derjenige Wert, gegen den die Kammer kalibriert wurde (siehe Bild A.10).

Es ist auch möglich, das E -Feld in der Kammer ($E_{\text{schätz}}$) auf der Grundlage der Messungen mit der Bezugsantenne abzuschätzen. Gleichung (A.5), die unter Verwendung von ähnlichen Verfahren, wie sie zur Bestimmung der Ausdrücke für das mittlere Feld in [16] benutzt wurden, abgeleitet wurde, ergibt eine Abschätzung für das E -Feld in der Kammer ($E_{\text{schätz}}$) auf der Grundlage der maximalen Ablesewerte von der Bezugsantenne, gemittelt über die Anzahl (n) der Aufstellorte der Antenne.

$$E_{\text{Est}} = \left\langle \frac{8\pi}{\lambda} \sqrt{5 \frac{P_{\text{MaxRec}}}{\eta_{\text{rx}}}} \right\rangle_{n \text{ Antennenstandorte}} \quad (\text{A.5})$$

Dabei ist

P_{MaxRec} die an einem Antennenaufstellort vorhandene maximale Empfangsleistung bei gegebener 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 [4]. Diese Größe kann aus der im Anhang I gegebenen Information bestimmt werden.

Für alle Messungen wird angenommen, dass die Vorwärts-Eingangsleistung 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 die Eingangsleistung normiert werden, die 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 der 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. 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 der Bezugsantenne 10 dB oder kleiner ist.

A.5.4 Belastungseffekte

Wenn ein Prüfling in einer Modenverwirbelungskammer angeordnet wird, besteht die Möglichkeit, dass der Prüfling die Kammer „belastet“. Wenn der Prüfling die Kammer belastet, steht die durch den Prüfling absorbierte Energie 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.

ANMERKUNG 1 Dies ist einer der abstrakteren Gesichtspunkte für Prüfungen in der Modenverwirbelungskammer. 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 trägt diese Energie nicht mehr länger zur Erzeugung der gewünschten Umgebung bei. 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