

**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 $A_{\text{off}}$ .....	98
J.5.2 Mindestanzahl von Messwertesätzen („Samples“) .....	99
J.6 Bezugsschriftstücke .....	99
Anhang K (informativ) Messunsicherheit der Kammvalidierung 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
<b>Bilder</b>	
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

	Seite
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

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 $\eta$ -%-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 $\eta$ -%-Vertrauensintervall für $ E_x _{\max}$ mit normalisierter Breite $\xi_{\eta}^{+} \% - \xi_{\eta}^{-} \% / \langle  E_x _{\max} \rangle$ .....	110
<b>Tabellen</b>	
Tabelle B.1 – Anforderungen an die Messwertaufnahme (Sampling) .....	50
Tabelle B.2 – Grenzabweichungs-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