

Entwicklung und Evaluation eines flexiblen Programmsystems zur Kalibrierung von und Messung in Modenverwirbelungskammern nach IEC 61000-4-21

H.G. Krauthäuser, D. Kürschner, T. Winzerling, J. Nitsch

O-v-Guericke Universität Magdeburg, IGET, Postfach 4120, 39106 Magdeburg, hgk@ieee.org

Zusammenfassung – Diese Arbeit beschreibt ein Programmsystem zur Kalibrierung von Modenverwirbelungskammern und zur Durchführung von Messungen in diesen nach dem Normenentwurf zur IEC61000-4-21. Neben dem Programmsystem selbst wird dabei auch der Normenentwurf kurz beleuchtet.

1 Einleitung

Modenverwirbelungskammern sind gleichermassen interessante wie viel diskutierte Messumgebungen für Untersuchungen zur strahlungsgebundenen elektromagnetischen Verträglichkeit von Geräten und Systemen [1]. Bedingt durch den statistischen Charakter von E- und H-Feld[2] und die komplexe Wechselwirkung der Testumgebung mit dem zu testenden System ist die Bewertung von Testergebnissen in Modenverwirbelungskammern nach wie vor Gegenstand intensiver Forschung. Trotzdem, oder gerade deswegen, ist es wichtig, einen normativen Rahmen zu haben, der die Kalibrierung von und die Messung in Modenverwirbelungskammern standardisiert. Dies ist die Zielsetzung des Entwurfs zur IEC61000-4-21 mit dem Titel „Reverberation Chamber Test Methods“.

Eine Modenverwirbelungskammer ist ein Hohlraumresonator, der deutlich oberhalb der ersten Eigenfrequenz betrieben wird, und in dem es eine Vorrichtung gibt, mit deren Hilfe entweder die elektrodynamischen Randbedingungen (mechanischer Modenrührer, moving wall) oder die Anregungsbedingungen (elektronisches Modenrühren, d.h. zum eigentlichen Signal wird ein Rauschsignal geeigneter Bandbreite zugemischt) signifikant verändert werden können. Eine Änderung der Randbedingungen bedeutet eine Änderung der Eigenfrequenzen, d.h. die Resonanzlinien — deren Breite direkt mit der Resonatorgüte $Q(f)$ verknüpft ist, $Q(f) = f/\Delta f_{3dB}$ — verschieben sich relativ zur Anregungsfrequenz. Beim elektronischen Modenrühren ist die Anregungsfrequenz unscharf, und die Resonanzfrequenzen sind fest; der Effekt ist also im wesentlichen der gleiche. Der Unterschied zwischen beiden Verfahren besteht darin, dass beim elektronischen Modenrühren quasi instantan der Zustand vorliegt, der sich aus der Superposition der Lösungen ergibt, die vorlägen, wenn die Anregung scharf wäre und nacheinander die Frequenzen durchläufe, die durch die Rauschbandbreite bestimmt sind. Beim mechanischen Modenrühren — nur dieses ist Gegenstand des aktuellen Normenentwurfs, und nur dieses wird im folgenden betrachtet — hat man zu jedem Zeitpunkt einen Hohlraumresonator mit festen Randbedingungen und fester Anregung. Die sich ergebenden Feldverteilungen für E- und H-Feld sind somit die gewichtete Summe der Moden, die an die Anregungsfrequenz koppeln können. Durchläuft man nun die verschiedenen Randbedingungen, ändert sich diese gewichtete Summe. Man erhält somit unterschiedliche Feldverteilungen. Über den Zyklus der Veränderung der

Randbedingungen ergeben sich dann charakteristische statistische Verteilungsfunktionen der elektrodynamischen Größen, die nun als Zufallsvariablen aufgefasst werden müssen. Ziel der Veränderung der Randbedingungen ist es, statistisch homogene Feldverteilungen zu erhalten. Dies ist bei hohen Frequenzen relativ einfach zu erreichen, da dort die Eigenfrequenzen immer näher zusammenliegen und somit mehr Glieder in die gewichtete Summe eingehen (es tragen mehr Moden zur Feldverteilung bei). Bei tiefen Frequenzen sind die Eigenfrequenzen klar getrennt und zur Summe trägt im Extremfall nur noch ein Mode (oder gar keiner) bei, an den bei Verschiebung der Resonanzlage nur mehr oder weniger stark angekoppelt werden kann (keine Veränderung der normierten Feldverteilung). Die unterste nutzbare Frequenz einer Modenverwirbelungskammer ist ein wesentlicher Parameter.

Diese Arbeit gibt zunächst einen Überblick über Struktur und Inhalt des Normenentwurfs, kann und will aber nicht das Eigenstudium des Entwurfs ersetzen. Eine detaillierte Erörterung des Entwurfs würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Anschliessend wird ein Programmsystem vorgestellt, dass die Durchführung der Messungen und deren statistische Auswertung ermöglicht.

Abschliessend werden Ergebnisse von Kalibriermessungen der Magdeburger Modenverwirbelungskammer vorgestellt.

2 Der Normenentwurf IEC61000-4-21

Mit den Arbeiten zur IEC61000-4-21 Reverberation Chamber Test Methods existiert ein Normungsvorhaben mit dem Ziel, die Kalibrierung von und die Messung in Modenverwirbelungskammern zu standardisieren. Dies ist die notwendige Voraussetzung dafür, Modenverwirbelungskammern zukünftig als alternative Testeinrichtungen zu Freifeldern und Absorberhallen (Problem: Korrelierbarkeit) oder als eigenständige Testumgebung für strahlungsgebundene EMV-Untersuchungen (Problem: Produktnormen müssten auf diese Umgebung verweisen) einsetzen zu können.

Der Normenentwurf zur IEC61000-4-21 deckt folgende Bereiche ab:

Kalibrierung der Modenverwirbelungskammer: Hiermit ist die Bestimmung von Parametern des leeren Raumes gemeint. Zu diesen Parametern zählen die auf die Leistung normierten Feldstärken im Arbeitsvolumen, die Standardabweichung der Feldstärke und die kleinste nutzbare Frequenz. Zusätzlich wird die Homogenität der Feldstärke bei starker Beladung des Raumes überprüft.

Diese Kalibrierung erfolgt nur bei der Inbetriebnahme des Raumes und nach größeren Umbauten.

Immunitätsmessungen: Vor jeder Messung wird zunächst nochmals eine Kalibriermessung mit dem Prüfobjekt vorgenommen, in der überprüft wird, ob der Raum nicht unzulässig hoch beladen ist. Die eigentliche Immunitätsmessung kann sowohl im mode-tuned als auch im mode-stirred Modus durchgeführt werden.

Emissionsmessungen: Auch hier ist vor jedem Test wieder eine Kalibrierung durchzuführen, um sicherzustellen, dass der Raum durch den Prüfling nicht unzulässig beladen wurde.

Anders als auf dem Freifeld ist das primäre Messergebnis in Modenverwirbelungskammern die gesamt abgestrahlte Leistung. Der Normenentwurf schlägt aber auch eine Umrechnung in eine Feldstärke in einem bestimmten Abstand vor, in die aber die (unbekannte) Direktivität des Prüflings eingeht.

Schirmdämpfungsmessungen: Hier werden verschiedene Messverfahren zur Messung von Schirmeffektivitäten von z.B. Kabeln, Dichtungen und Gehäusen erläutert.

3 Das Programmsystem

Das hier vorgestellte Programmsystem wurde mit LabWindows/CVI von National Instruments unter MS Windows 2000 entwickelt. Eine spezielle Laufzeitumgebung ist nicht erforderlich. Die statistische Auswertung erfolgt durch ein Perl-Skript, so dass eine aktuelle Perl-Version (als freie Software verfügbar) installiert sein muss. An die Hardware des Rechners werden keine besonderen Anforderungen gestellt. Zur Geräteansteuerung muss natürlich geeignete Hardware, in der Regel eine GPIB-PCI Adapterkarte, vorhanden sein.

Bei der Entwicklung des hier vorgestellten Programmsystems standen verschiedene Aspekte im Vordergrund, die in der Folge kurz erläutert werden.

3.1 Normkonformität

Das entwickelte Programmsystem dient auch zur Evaluation des Normenentwurfs. Es wurde daher großer Wert darauf gelegt, den Normenentwurf wirklich hundertprozentig im Programmsystem abzubilden.

3.2 Flexibilität

Aus den Erfahrungen mit einigen frühen Messprogrammen, die immer wieder angepasst werden mussten, wenn andere Geräte eingebunden wurden, ergab sich die Notwendigkeit zur Abstraktion von der Geräteebene. In der Folge wurden zunächst Gerätetreiber entwickelt, die über standardisierte Schnittstellenfunktionen angesprochen werden. Wegen der unterschiedlichen Funktionalitäten werden hierbei verschiedene Geräteklassen unterschieden. Zur Zeit sind dies (in den Klammern stehen die zur Zeit unterstützten Geräte):

- Signalgenerator (R&S: SMT, SMX, SMY, SMR; GigaTronics: 12000A)
- Leistungsmesser (R&S: NRVD, NRVS; Amplifier Research: PM2002)
- Richtkoppler (beliebige, da passiv)

- Spektrumanalysator (R&S: FSP, ESI)
- Störmessempfänger (R&S: ESCS, ESI)
- Feldsonde (EMCO: 7240; Amplifier Research: FP6001; Wandel&Goldermann: EMR; beliebige passive, wenn ein unterstützter Leistungsmesser, Spektrumanalysator oder Störmessempfänger verwendet wird)
- Umschalter (manuell; beliebige TTL-ansteuerbare über NI-DAC PCI-Karte)

Mit diesen Geräten lassen sich die Messaufbauten zur Durchführung der Messungen nach dem Normenentwurf durchführen. Allerdings wird in der Regel z.B. nicht ein Verstärker ausreichen, um den gesamten gewünschten Frequenzbereich abzudecken. In der Abbildung 1 ist daher ein Aufbau skizziert, der aus einzelnen sogenannten Instrumentensektionen besteht. Jede diese Sektionen beinhaltet einen kompletten Messaufbau, allerdings nicht für den gesamten Frequenzbereich. Zwischen diesen Aufbauten wird mit einem Umschalter gewechselt. Dieser Umschalter ist eher abstrakt als gegenständlich zu verstehen: die Realisierungsmöglichkeiten reichen vom völligen manuellen Umbau bis zur Verwendung eines Systems von automatischen Umschaltern. Beim Umschalten zwischen Instrumentensektionen kann, muss aber nicht, der gesamte Messaufbau ausgetauscht werden. Realistisch ist sicherlich, dass z.B. der Signalgenerator oder die Leistungsmesser nicht ausgetauscht werden.

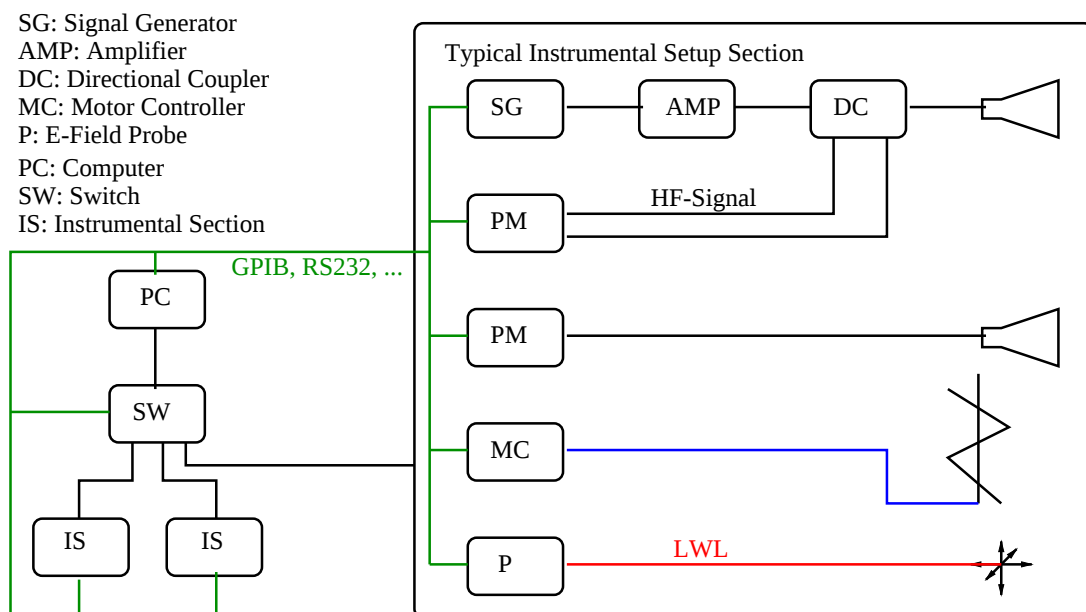


Abbildung 1: Das Konzept der Instrumentensektionen: Ein Umschalter schaltet zwischen den Sektionen um, die jeweils einen kompletten Messaufbau beinhalten.

Dieses Konzept der Instrumentensektionen wird im gesamten Programmsystem verwendet. Ein Gerät wird hierbei über eine Initialisierungsdatei ausgewählt (vergleiche Abbildung 2), in der

Angaben zu den Leistungsdaten des Geräts (z.B. der Frequenzbereich), Daten zur Ansteuerung des Geräts (z.B. GPIB-Adresse, Initialisierungs-Befehle) und weitere gerätespezifische Parameter abgelegt sind. Zu letzteren gehören beispielsweise Frequenzgänge der Koppelfaktoren von Richtkopplern.

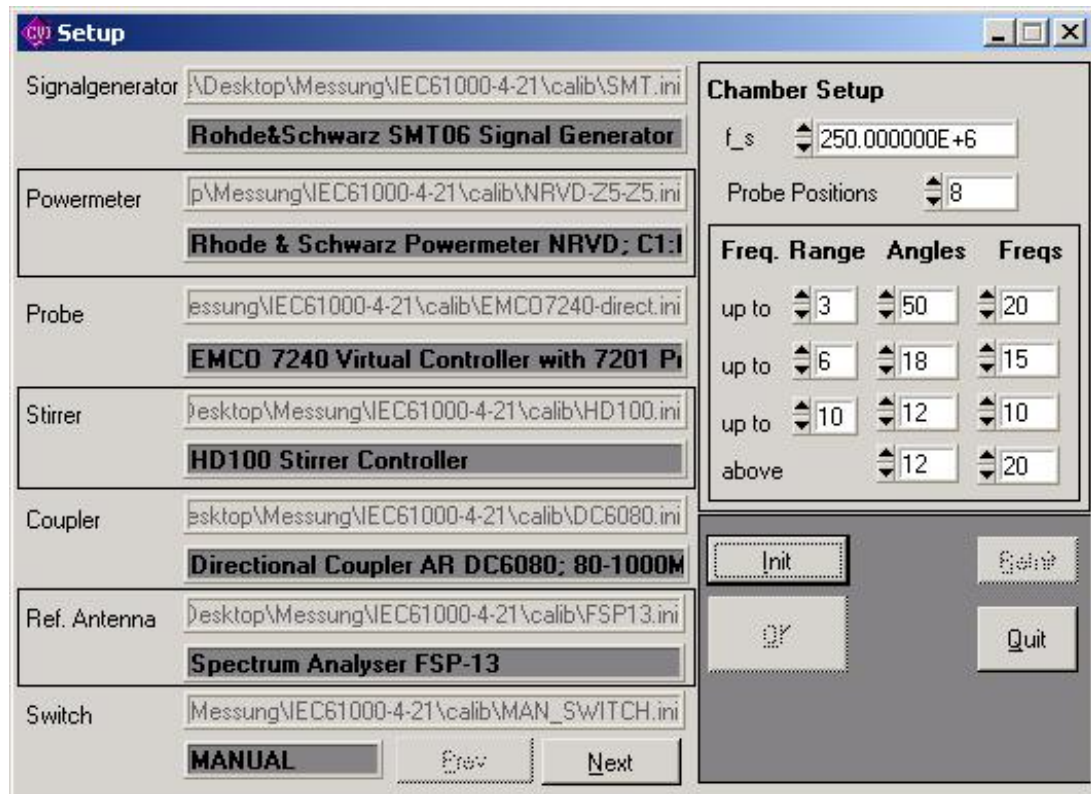


Abbildung 2: Das Setup-Fenster des Kalbrierprogramms. Neben grundlegenden Einstellungen zur Durchführung der Messungen werden hier die Instrumentensektionen definiert.

Neben den Frequenzgrenzen der Instrumentensektionen sind die im Normenentwurf definierten Frequenzintervalle, in denen mit unterschiedlichen Anzahlen von unabhängigen Randbedingungen und Frequenzpunkten je Intervall zu messen ist, von zentraler Bedeutung für den Messablauf. Diese Parameter können frei definiert werden (vergleiche Abbildung 2), wobei sich die Vorgaben des Normenentwurfs bisher als sinnvoll dargestellt haben.

Für den Messablauf ist nun noch wichtig, ob zwischen den Instrumentensektionen automatisch umgeschaltet werden kann. Wenn nicht, ist es praktischer, zunächst bis zur Maximalfrequenz der aktuellen Instrumentensektion die Messungen für alle Positionen der E-Feld-Sonde(n) und der Referenzantenne durchzumessen. Andernfalls kann die Messung ohne Neupositionierung der Sonde(n) und der Referenzantenne zu höheren Frequenzen fortgesetzt werden, solange man den nächsten Frequenzpunkt automatisch anfahren kann.

3.3 Geschwindigkeit

Die zuvor genannte Flexibilität im Messablauf leitet direkt über zum Thema Geschwindigkeit: Durch die Reduktion der Anzahl der nötigen Umbauten kann natürlich sehr viel Zeit bei der Durchführung z.B. einer Kalibriermessung gespart werden.

Neben der Messablaufsteuerung spielt die Gerätesteuerung eine wesentliche Rolle. Kurze Gesamtmesszeiten sind nur zu erreichen, wenn die Messgeräte nicht rein sequentiell, sondern quasi parallel angesprochen werden. Konkret bedeutet dies, dass zunächst an alle Geräte die Befehle zur Durchführung der gewünschten Aktion (typischerweise z.B. ein Trigger-Befehl zum Auslösen einer neuen Messung) gesendet werden. Danach wird — zeitereignisgesteuert — bei allen Messgeräten, die noch keinen Messwert geliefert haben, eine Statusabfrage durchgeführt, und gegebenenfalls werden die Ergebnisse vom Gerät gelesen. Hierdurch ist die Messzeit pro Frequenzpunkt nur durch die Messzeit des langsamsten Gerätes limitiert und nicht durch die Summe der Messzeiten aller Geräte.

3.4 Benutzerfreundlichkeit

Ziel war es, ein weitestgehend intuitiv zu benutzendes Programm zu entwickeln. Benutzerfreundlichkeit und Flexibilität sind aber teilweise konkurrierende Eigenschaften. Dadurch, dass viele Parameter einstellbar sind, muss der Benutzer natürlich auch ein gewisses Vorwissen mitbringen, damit nicht Messungen mit sinnlosen Kombinationen der Parameter durchgeführt werden. Das Abfangen solcher Fehleingaben kann nie vollständig erfolgen. Daher wurde im Programm komplett darauf verzichtet, eine Bewertung der vom Benutzer getroffenen Einstellungen vorzunehmen. Eine Ausnahme stellen hierbei die Instrumentensektionen dar: Hier werden die Eingaben darauf hin überprüft, ob der richtige Gerätetyp gewählt wurde und ob aufeinanderfolgende Instrumentensektionen über kompatible Frequenzgrenzen verfügen.

Selbstverständlich ist, dass die Programme über eine graphische Benutzerschnittstelle verfügen und aktuelle Messdaten permanent ausgeben. Einmal gemachte Einstellungen werden gesichert und sind beim nächsten Start wieder vorhanden.

Die statistische Analyse der Messdaten wird ebenfalls durch eine graphische Benutzerschnittstelle erleichtert (Abbildung 3).

3.5 Ausblick

In Zukunft sollen Profile für unterschiedliche Benutzer implementiert werden. Ebenso soll eine Funktion zur automatischen Generierung von Messprotokollen hinzugefügt werden, die als Ausgabe Dateien erzeugt, die mit Standardanwendungen (MS Word, MS Excel) einfach weiterverarbeitet werden können.

Viele Programmsysteme für EMV-Messungen beinhalten eine interne Datenbankstruktur zur Ablage der verschiedenen EMV-Messungen an einem Prüfling. Ein gutes Beispiel hierzu ist die Software Radimation aus dem Hause DARE. Es wird darüber nachgedacht, ob ein Implemen-

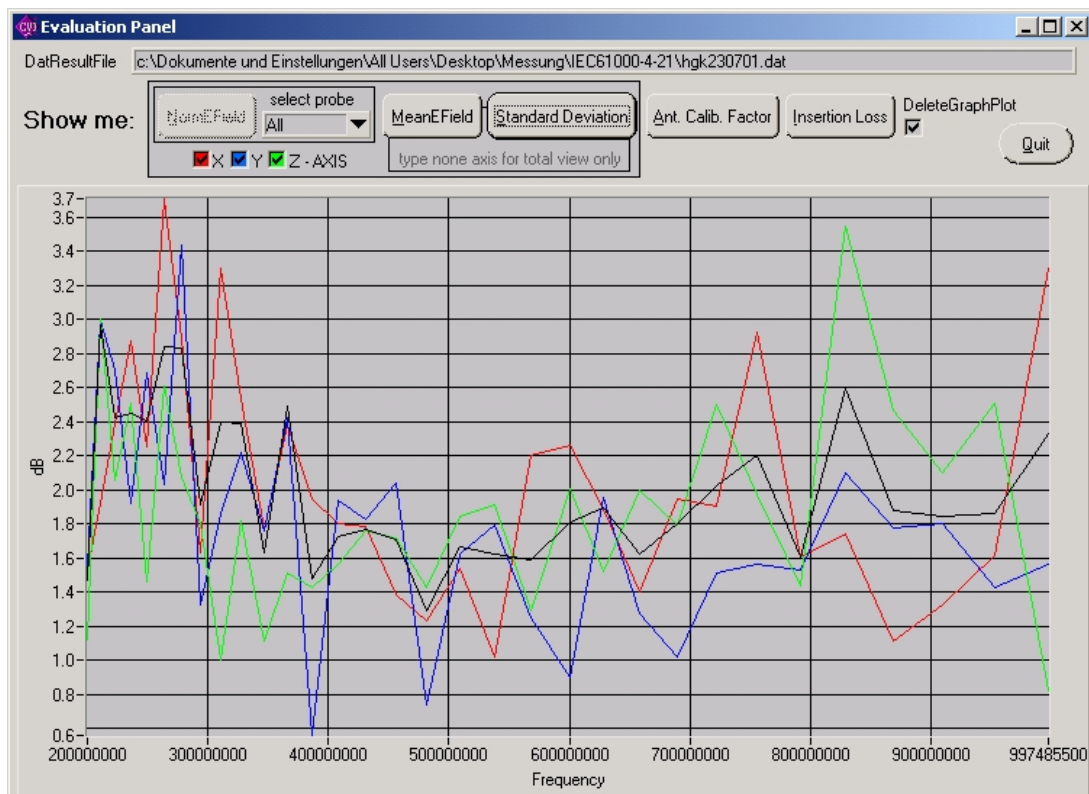


Abbildung 3: Ergebnisfenster zur Darstellung der statistischen Auswert der Kalibriermessungen.

tieren einer kompatiblen Datenstruktur möglich und sinnvoll ist.

4 Zusammenfassung

Das entwickelte Programmsystem zur Durchführung von Messungen nach dem Normenentwurf IEC61000-4-21 stellt einen Kompromiss zwischen Flexibilität und Benutzerfreundlichkeit dar. Hierbei wurde größerer Wert auf die Flexibilität gelegt. Diese beinhaltet neben der Möglichkeit zur einfachen Integration neuer Messgeräte vor allem auch die flexible Steuerung des Messablaufs durch Parameter wie z.B. die Anzahl der Rührerpositionen in einem bestimmten Frequenzbereich. Werden hier die Vorgaben des Normenentwurfs verwendet, so können Messungen konform zu diesem Entwurf durchgeführt werden.

Die Arbeiten an dem vorgestellten Programmsystem wurden teilweise mitfinanziert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG im Rahmen der Forschergruppe FOR417.

Literatur

- [1] CRAWFORD, M.L. und G.H. KOEPKE: *Design, evaluation, and use of a reverberation chamber for performing electromagnetic susceptibility/vulnerability measurements*. Technischer Bericht 1092, National Bureau of Standards, 1986.
- [2] HILL, D.A.: *Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers*. IEEE Transactions on EMC, 40(3):209–217, 8 1998.