

Vereinfachung des Allgemeinen Verfahrens zur Bestimmung der unabhängigen Rührerstellungen in Modenverwirbelungskammern durch Reduktion der Anzahl der Messpunkte im Prüfvolumen

Dr.-Ing. Stephan Pfennig,
Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit,
Technische Universität Dresden

1 Einleitung

Ein Verfahren zur Abschätzung der Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen in Modenverwirbelungskammern (MVK'n) wird in DIN EN 61000-4-21 [1] beschrieben. Das Standardverfahren verwendet einen einzigen Messpunkt im Prüfvolumen der MVK und hat daher Nachteile, die z. B. bereits in [2] diskutiert wurden. Es erfordert jedoch nur einen geringen Aufwand und liefert eine erste Abschätzung für die Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen. Ein neues ‚Allgemeines Verfahren‘ zur Bestimmung der unabhängigen Rührerstellungen wurde bereits in [3, 4] vorgestellt und in [5, 6, 7] weiterführend bewertet. Für das Allgemeine Verfahren wird ein Prüfvolumen mit einer definierten Anzahl von Messpunkten verwendet, d. h. im Gegensatz zum Standardverfahren basiert das Allgemeine Verfahren auf einer echten Auswertung der Feldverteilungen im Prüfvolumen. Da die Aufnahme der Messdaten sehr zeitaufwendig ist, wird im vorliegenden Konferenzbeitrag eine Vereinfachung des Verfahrens untersucht werden, bei der die Anzahl der Messpunkte reduziert und die Auswertung der Messdaten entsprechend angepasst wird. Eine Reduktion der Anzahl der Messpunkte auf die 8 Eckpunkte des Prüfvolumens wird bereits in DIN EN 61000-4-21 zur Bewertung der Feldhomogenität im Prüfvolumen verwendet und ist prinzipiell kein neuer Ansatz, jedoch wurde - soweit dem Autor bekannt - bisher nicht nachgewiesen, dass dieser Ansatz zur Bewertung der Feldhomogenität überhaupt zulässig ist. Daher ist es das Ziel dieses Beitrages, den Ansatz durch eine entsprechende Auswertung von Messdaten zu bewerten.

2 Stand der Forschung

Zur Optimierung der Zeit, die für die Störfestigkeitsmessung in einer MVK benötigt wird, sollen die Anforderungen an die Homogenität des Prüffeldes im Prüfvolumen der MVK mit einer möglichst geringen Anzahl von Rührerstellungen realisiert werden. Der in diesem Zusammenhang eingeführte Begriff der unabhängigen Rührerstellungen bezeichnet Rührerstellungen, deren Feldverteilungen linear unkorreliert sind bzw. genauer gesagt nicht positiv linear korreliert sind. Die Ergebnisse in [7] zeigen, dass die mit dem Allgemeinen Verfahren bestimmten unabhängigen Rührerstellungen geeignet sind, um bereits mit einer geringen Anzahl von Rührerstellungen ein möglichst homogenes Prüffeld zu erzeugen.

Beim Allgemeinen Verfahren wird für jede Frequenz zunächst die Feldverteilung innerhalb eines definierten Prüfvolumens mit Hilfe einer bestimmten Anzahl von Messpunkten und in Abhängigkeit der Rührerstellung aufgenommen. Zur Auswertung der Daten wird für jede Kombination zweier Rührerstellungen der Pearson-Korrelationskoeffizient der entsprechenden Feldverteilungen berechnet und diese damit auf lineare Korrelation geprüft. Rührerstellungen, deren Feldverteilungen einen definierten Korrelationsschwellenwert unterschreiten,

gelten als unabhängig. Mit Hilfe geeigneter Algorithmen können anschließend sogenannte Cliques unabhängiger Rührerstellungen bestimmt werden, bei denen jede Kombination zweier Rührerstellungen unabhängig ist. Aktuell wird ein einfacher Algorithmus verwendet, der bereits in [3, 4, (Algorithmus 1)] vorgestellt und bewertet wurde.

Das Allgemeine Verfahren wurde bereits in [3, 4] vorgestellt. Dabei konnte gezeigt werden, dass das Verfahren detaillierte Informationen zur Anzahl und Verteilung der unabhängigen Rührerstellungen liefert. Darauf aufbauend erfolgte in [5] eine erste Bewertung des Standardverfahrens sowie ausgewählter alternativer Ansätze basierend auf den Ergebnissen des Allgemeinen Verfahrens. Weiterführend wurde in [6] die Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte im Prüfvolumen untersucht und ein neuer Ansatz zur Anpassung des Korrelationsschwellenwertes an die Anzahl der Messpunkte vorgeschlagen. Zuletzt konnte in [7] eine ausführliche Bewertung des Allgemeinen Verfahrens basierend auf der Homogenität des Feldes im Prüfvolumen präsentiert werden.

Die Anwendung des Allgemeinen Verfahrens hat jedoch den Nachteil, dass die Messung bei Verwendung einer entsprechend hohen Anzahl von Messpunkten, Rührerstellungen und Frequenzen sehr zeitaufwendig ist, speziell bei Verwendung einer einzigen Feldsonde. In diesem Zusammenhang geht der Autor in [7] auch auf mögliche Vereinfachungen des Allgemeinen Verfahrens ein, wie z. B. die Reduktion der Anzahl der Messpunkte und eine entsprechende Anpassung des Korrelationsschwellenwertes.

Die in [7] vorgestellten Ergebnisse zur Feldhomogenität im Prüfvolumen der MVK zeigen, dass sich bei der Berechnung für die 8 Eckpunkte des Prüfvolumens ein näherungsweise identischer Verlauf der Feldhomogenität im Vergleich zum Prüfvolumen mit 27 Messpunkten ergibt. Dabei wurde jedoch angenommen, dass sich bei der Reduktion auf die 8 Eckpunkte des Prüfvolumens auch die gleiche Anzahl von unabhängigen Rührerstellungen ergibt. Dies wurde in [7] als noch zu untersuchende Fragestellung festgehalten. Das Ziel der anschließenden Untersuchungen war es deshalb, den bereits in [6] beschriebenen Ansatz zur Anpassungen des Korrelationsschwellenwertes an die Anzahl der Messpunkte in Hinblick auf eine deutliche Reduktion der Anzahl der Messpunkte zu untersuchen. Dazu stand der Datensatz des in Abbildung 1 dargestellten würfelförmigen Prüfvolumens der Seitenlänge 1 m und 27 Messpunkten zur Verfügung. Der Abstand benachbarter Messpunkte beträgt in den Koordinatenrichtungen jeweils 0.5 m. Zu den Wänden, den Antennen und dem Modenrührer wurde ein Mindestabstand von 0.5 m eingehalten.

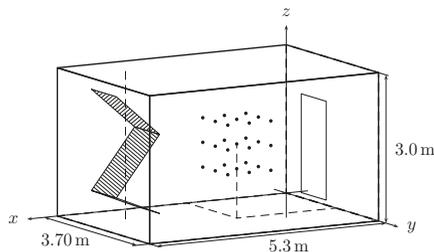


Abbildung 1: Dresdener Modenverwirbelungskammer mit einem vertikalen Modenrührer und einem würfelförmigen Prüfvolumen der Seitenlänge 1 m und 27 ($3 \times 3 \times 3$) Messpunkten

3 Vereinfachung des Allgemeinen Verfahrens durch Reduktion der Anzahl der Messpunkte im Prüfvolumen und Anpassung des Korrelationsschwellenwertes

Zur Bestimmung der Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen N_β basierend auf der für die Messung verwendeten Anzahl von Rührerstellungen $N_\alpha = 360$ wurde in [6] bereits ein neuer Ansatz zur Anpassung des Korrelationsschwellenwertes r_s an die Anzahl der Messpunkte N_o vorgeschlagen. Als Korrelationsschwellenwert wird dabei der kritische Wert r_{krit} genutzt. Dieser kritische Wert wird allgemein in der Statistik dazu verwendet, um Korrelationskoeffizienten auf Signifikanz zu prüfen und hängt vom Freiheitsgrad N_{df} und dem Signifikanzniveau α (der Irrtumswahrscheinlichkeit) ab. Prinzipiell wird dabei zwischen der zweiseitigen und einseitigen Prüfung auf Signifikanz unterschieden. In Tabelle 1 sind die kritischen Werte r_{krit2} für die zweiseitige Prüfung und r_{krit1} für die einseitige Prüfung in Abhängigkeit des Freiheitsgrades $N_{df} = N_o - 2$ und einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ für ausgewählte Werte angegeben.

$N_{df}(N_o - 2)$	25	16	13	7	6
$r_{krit2}(\alpha = 5\%)$	0.380	0.465	0.509	0.650	0.685
$r_{krit1}(\alpha = 5\%)$	0.322	0.398	0.437	0.570	0.605

Tabelle 1: Kritische Werte r_{krit2} und r_{krit1} für die zweiseitige und einseitige Prüfung von Korrelationskoeffizienten auf Signifikanz, Werte für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$

Ist bei zweiseitiger Betrachtung der Betrag des Korrelationskoeffizienten r kleiner als oder gleich dem kritischen Wert r_{krit2} , dann wird dieser als nicht signifikant verschieden von Null betrachtet. Entsprechend wird der Korrelationskoeffizient als signifikant verschieden von Null betrachtet, wenn dessen Betrag größer als der kritische Wert r_{krit2} ist.

Zur weiteren Bewertung des Ansatzes wurden die in Abbildung 2 dargestellten Prüfvolumen (PV) definiert, deren Datensätze sich einfach aus dem Datensatz des Prüfvolumens mit 27 Messpunkten erzeugen lassen. Anschließend wurde für jedes Prüfvolumen die Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen mit Hilfe des Allgemeinen Verfahrens bestimmt, wobei als Korrelationsschwellenwert der kritische Wert $r_{krit2}(\alpha = 5\%)$ verwendet wurde.

Der in Abbildung 3 gegebene Vergleich zu den Ergebnissen des Prüfvolumens mit 27 Messpunkten zeigt, dass für die Prüfvolumen PV18a, PV18b, PV15a und PV15b, d. h. bei einer Reduktion auf 18 bzw. 15 Messpunkte und Anpassung des Korrelationsschwellenwertes eine sehr gute Übereinstimmung der Verläufe zu erkennen ist. Für die Prüfvolumen PV9a, PV9b, PV9c und PV8 mit 9 bzw. 8 Messpunkten zeigen sich jedoch erste Abweichungen, wobei die Anpassungen des Korrelationsschwellenwertes im unteren Frequenzbereich bis ungefähr 1200 MHz eine höhere Anzahl von unabhängigen Rührerstellungen liefert und im oberen Frequenzbereich eine geringere Anzahl. Interessant dabei ist, dass dieser Übergang genau in den Frequenzbereich fällt, in dem der Verlauf der Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen abknickt und für höhere Frequenzen gegen einen oberen Grenzwert läuft.

Für das Allgemeine Verfahren wurde als Kriterium für die Unabhängigkeit der Rührerstellungen definiert, dass deren Feldverteilungen nicht positiv linear korreliert sind, d. h. der Pearson-Korrelationskoeffizienten r kleiner als der Korrelationsschwellenwert $-1 \leq r < r_s$ ist. Das bedeutet, dass auch die Rührerstellungen als unabhängig betrachtet werden, deren Feldverteilungen einen Korrelationskoeffizienten $-1 \leq r < -r_s$ liefern. Diese Definition

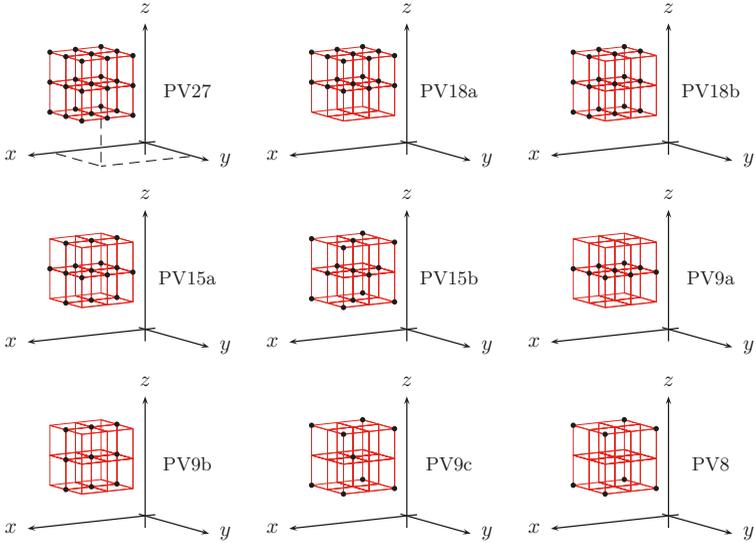


Abbildung 2: Prüfvolumen (PV) zur Untersuchung der Anpassungen des Korrelationsschwellenwertes an die Anzahl der Messpunkte

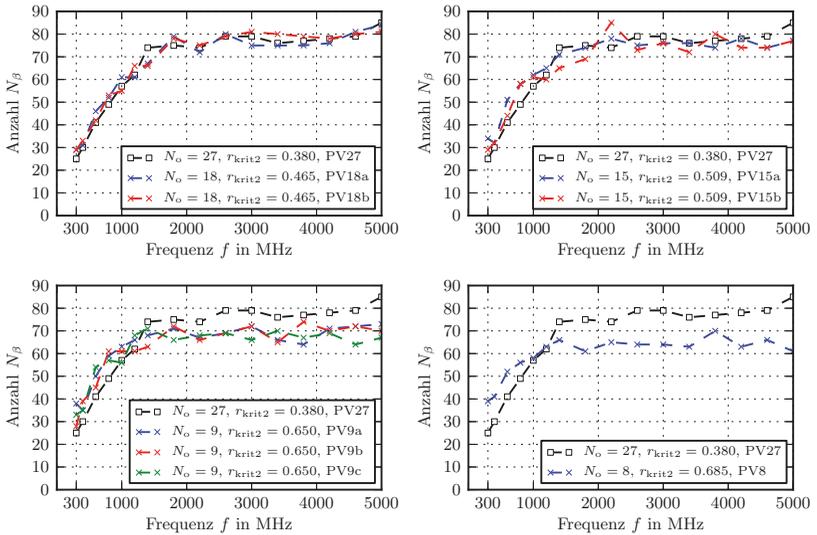


Abbildung 3: Anzahl der unabhängigen Rührerstellung N_β für verschiedene Prüfvolumen (PV) und Anpassung des Korrelationsschwellenwertes an die Anzahl der Messpunkte bei Verwendung des kritischen Wertes $r_{krit2}(\alpha = 5\%)$

macht für die Betrachtung der Feldhomogenität Sinn, da negativ linear korrelierte Feldverteilungen prinzipiell dazu beitragen, mit einer geringen Anzahl von Rührerstellungen im Prüfvolumen der MVK ein möglichst homogenes Feld zu erzeugen [8].

Basierend auf dem definierten Kriterium für die Unabhängigkeit von Rührerstellungen wäre eine einseitige Prüfung der Korrelationskoeffizienten auf Signifikanz naheliegender. Deshalb wurde im zweiten Schritt die Anpassung des Korrelationsschwellenwertes an die Anzahl der Messpunkte unter Verwendung des kritischen Wertes $r_{krit1}(\alpha = 5\%)$ für die einseitige Prüfung untersucht. Für ausgewählte Prüfvolumen sind die Ergebnisse für die Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen in Abbildung 4 zusammen mit den Ergebnissen der zweiseitigen Prüfung dargestellt. Zusätzlich zu den absoluten Werten wurden die relativen Abweichungen \tilde{N}_β berechnet und Abbildung 4 hinzugefügt.

$$\tilde{N}_\beta = \frac{N_\beta(N_o) - N_\beta(N_o = 27)}{N_\beta(N_o = 27)} \quad (1)$$

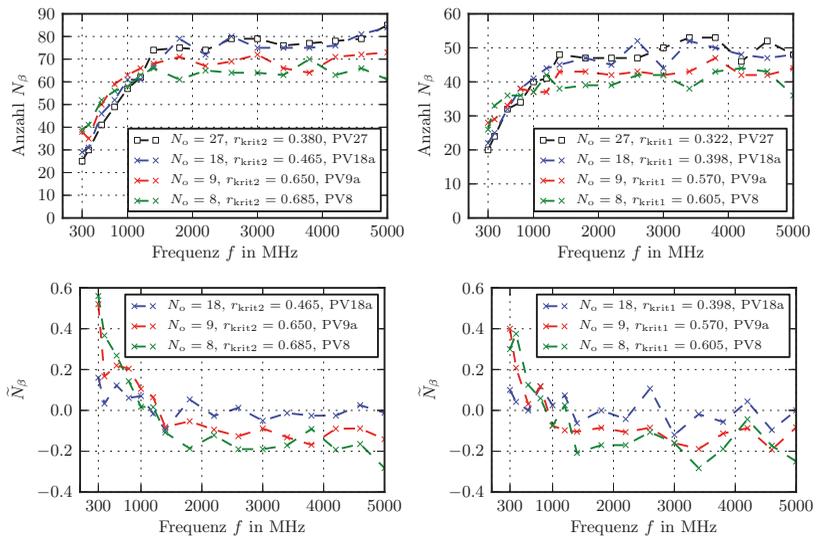


Abbildung 4: Absolute Anzahl der unabhängigen Rührerstellung N_β und die zugehörigen relativen Abweichungen \tilde{N}_β für verschiedene Prüfvolumen (PV) und Anpassung des Korrelationsschwellenwertes an die Anzahl der Messpunkte unter Verwendung der kritischen Werte $r_{krit2}(\alpha = 5\%)$ und $r_{krit1}(\alpha = 5\%)$

Da bei beiden Prüfung das gleiche Signifikanzniveau verwendet wurde, ändert sich die absolute Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen. Es ist jedoch zu erkennen, dass sich für den Verlauf der Kurven keine signifikanten Änderungen ergeben. In beiden Fällen sind bei einer Reduktion auf 18 Messpunkte keine signifikanten Abweichungen der Ergebnisse zu erkennen. Bei einer Reduktion auf 8 bzw. 9 Messpunkte sind hingegen in beiden Fällen die bereits beschriebenen Abweichungen zu erkennen. Dies macht jedoch auch Sinn, wenn man die Häufigkeitsverteilungen der berechneten Pearson-Korrelationskoeffizienten

betrachtet [8], die in Abbildung 5 dargestellt sind. Diese zeigen, dass die Häufigkeit der Korrelationskoeffizienten $-1 \leq r \leq -0.5$ sehr gering ist (< 0.003).

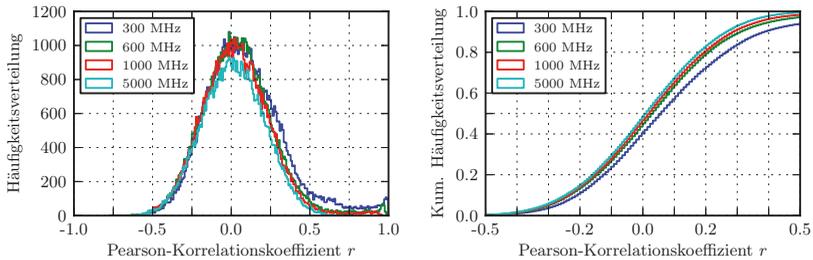


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilungen für den Pearson-Korrelationskoeffizienten der in Abhängigkeit der Rührerstellung aufgenommen räumlichen Feldverteilungen im Prüfvolumen

Basierend auf dem verwendeten Kriterium für die Unabhängigkeit der Rührerstellungen und den vorgestellten Ergebnissen schlägt der Autor vor, für das Allgemeine Verfahren den kritischen Wert $r_{\text{krit1}}(\alpha = 2.5\%)$ für die einseitige Prüfung auf Signifikanz zu verwenden. Bei Verwendung des Signifikanzniveaus $\alpha = 2.5\%$ entspricht dieser genau dem kritischen Wert $r_{\text{krit2}}(\alpha = 5\%)$. Das heißt, für das Prüfvolumen mit 27 Messpunkten ergibt sich der Korrelationsschwellenwert $r_s = r_{\text{krit1}}(\alpha = 2.5\%, N_{\text{df}} = 25) = 0.38$, welcher dem in DIN EN 61000-4-21 [1] verwendeten Wert von $r_s = 0.37$ sehr nahe kommt.

Die Reduktion der Anzahl der Messpunkte entsprechend der in Abbildung 2 definierten Prüfvolumen und die Anpassung des Korrelationsschwellenwertes lieferte die in Abbildung 3 gegebenen Verläufe für die Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen. Zur weiterführenden Untersuchung wurden im nächsten Schritt die zugehörigen Standardabweichungen σ_{xyz} zur Bewertung der Feldhomogenität entsprechend DIN EN 61000-4-21 [1, 7] berechnet und in Abbildung 6 dargestellt. Die Ergebnisse für die Prüfvolumen mit 8 bzw. 9 Messpunkten zeigen geringfügig erhöhte Schwankungen, es ist jedoch zu erkennen, dass sich der prinzipielle Verlauf nicht ändert und die Feldhomogenität des Prüfvolumens mit 27 Messpunkten sehr gut durch die Feldhomogenität an den 8 Eckpunkte abgebildet werden kann.

Die guten Übereinstimmungen bei den Verläufen der Standardabweichungen stehen dabei nicht im Widerspruch zu den beschriebenen Abweichungen, die sich für die Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen ergaben. In [7] konnte bereits gezeigt werden, dass sich die Feldhomogenität entsprechend der mit der Frequenz steigenden Anzahl von unabhängigen Rührerstellungen verbessert. Im unteren Frequenzbereich, in dem die Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen noch gering ist, kann die Feldhomogenität durch Hinzufügen von abhängigen Rührerstellungen nicht verbessert werden. Das bedeutet, dass der beschriebene Ansatz im unteren Frequenzbereich bis 1200 MHz eine Überschätzung für die Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen liefert, sich die Feldhomogenität aber nicht verbessert, da die tatsächliche Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen nicht größer wird. Für den oberen Frequenzbereich konnte in [7] gezeigt werden, dass sich bereits mit einem Teil der unabhängigen Rührerstellungen eine entsprechend gute Feldhomogenität erzielen lässt. Das bedeutet, dass die Unterschätzung für die Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen im Frequenzbereich oberhalb von 1200 MHz keinen signifikanten Einfluss auf die Feldhomogenität hat und daher einen akzeptablen Kompromiss darstellt.

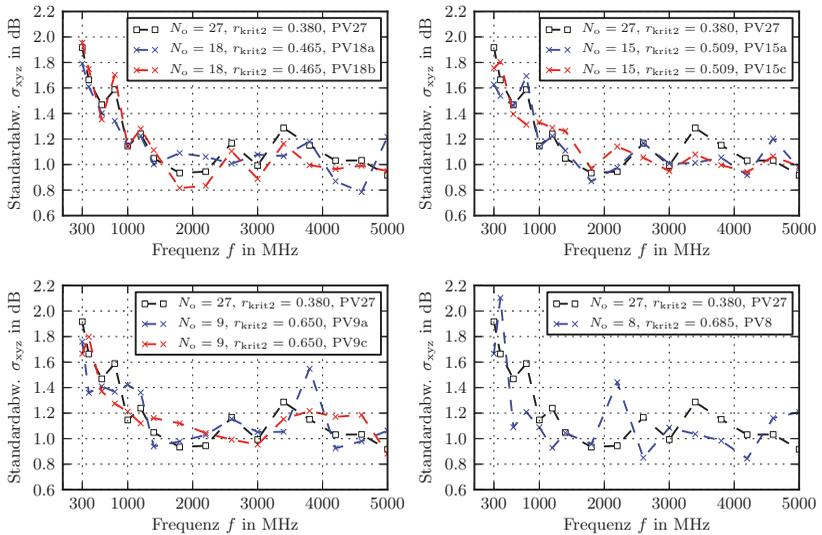


Abbildung 6: Standardabweichung σ_{xyz} für verschiedene Prüfvolumen (PV) und Anpassung des Korrelationsschwellenwertes an die Anzahl der Messpunkte bei Verwendung des kritischen Wertes $r_{\text{krit}1}(\alpha = 2.5\%) = r_{\text{krit}2}(\alpha = 5\%)$

4 Zusammenfassung

Mit dem Ziel, das Allgemeine Verfahren zur Bestimmung der unabhängigen Rührerstellungen hinsichtlich der zeitaufwendigen Messwertaufnahme zu optimieren, wurde eine Vereinfachung untersucht, bei der die Anzahl der Messpunkte im Prüfvolumen reduziert und bei der anschließenden Auswertung der Daten der Korrelationsschwellenwert an die Anzahl der Messpunkte angepasst wurde. Dazu wurde der kritische Werte r_{krit} verwendet. Prinzipiell wird dieser in der Statistik verwendet, um Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit vom Freiheitsgrad und Signifikanzniveau einseitig bzw. zweiseitig auf Signifikanz zu prüfen.

Zur Untersuchung des vorgestellten Ansatzes wurden verschiedene Prüfvolumen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Messpunkten definiert und für diese Prüfvolumen im Frequenzbereich von 300 MHz bis 5 GHz die unabhängigen Rührerstellungen bestimmt. Zur Bewertung der Feldhomogenität wurden anschließend die aus den unabhängigen Rührerstellungen resultierenden Standardabweichungen berechnet. Die Ergebnisse für eine Reduktion der Messpunkte von 27 auf 15 bzw. 12 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung für die Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen und der resultierenden Standardabweichungen. Für eine Reduktion auf 9 bzw. 8 Messpunkte ergaben sich Abweichungen bei der Anzahl der unabhängigen Rührerstellungen, diese haben jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Abschätzung der Feldhomogenität und stellen in Hinblick auf die Vereinfachung des Allgemeinen Verfahrens einen akzeptablen Kompromiss dar.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die vorgestellten Ergebnisse den Ansatz zur Vereinfachung des Allgemeinen Verfahrens durch Reduktion der Messpunkte und Anpassung der Korrelationsschwellenwerte unterstützen. Zur Validierung des Ansatzes wären jedoch weitere Vergleichsmessungen in anderen Modenverwirbelungskammern wünschenswert. Für das Allgemeine Verfahren empfiehlt der Autor die Verwendung des kritischen Wertes $r_{\text{krit1}}(\alpha = 2.5\%, N_0) = r_{\text{krit2}}(\alpha = 5\%, N_0)$.

Literatur

- [1] *DIN EN 61000-4-21:2011 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-21: Prüf- und Messverfahren - Verfahren für die Prüfung in der Modenverwirbelungskammer*. Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE.
- [2] Hans Georg Krauthäuser. *Grundlagen und Anwendungen von Modenverwirbelungskammern*. 1. Aufl. Res Electricae Magdeburgenses 17. Magdeburg: Nitsch, Jürgen und Styczynski, Z. A., 2007. ISBN: 978-3-929757-43-9.
- [3] Stephan Pfennig und Hans Georg Krauthäuser. „Übersicht und Vergleich von Methoden zur Bestimmung der unabhängigen Rührerpositionen in Modenverwirbelungskammern“. In: *Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*. 2012. ISBN: 978-3-8007-3405-4.
- [4] Stephan Pfennig und Hans Georg Krauthäuser. „A General Method for Determining the Number of Independent Stirrer Positions in Reverberation Chambers“. In: *Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2012 International Symposium on*. 2012. DOI: 10.1109/EMCEurope.2012.6396656.
- [5] Stephan Pfennig und Hans Georg Krauthäuser. „Comparison of Methods for Determining the Number of Independent Stirrer Positions in Reverberation Chambers“. In: *Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2013 International Symposium on*. 2013, S. 431–436.
- [6] Stephan Pfennig und Hans Georg Krauthäuser. „A Continued Evaluation of the General Method for Determining the Number of Independent Stirrer Positions in Reverberation Chambers“. In: *Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2014 International Symposium on*. 2014, S. 257–262. DOI: 10.1109/EMCEurope.2014.6930913.
- [7] Stephan Pfennig. „An Evaluation of the Independent Stirrer Positions in the Dresden Reverberation Chamber based on Field Homogeneity Within a Defined Test Volume“. In: *Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015 IEEE International Symposium on*. 2015, S. 396–401. DOI: 10.1109/ISEMC.2015.7256194.
- [8] Stephan Pfennig. *Charakterisierung der Modenverwirbelungskammer der TU Dresden und Untersuchung von Verfahren zur Bestimmung der unabhängigen Rührerstellungen*. TUDpress Verlag der Wissenschaften GmbH, 2015. ISBN: 978-3-944331-99-7. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-164647>.