

Analyse und Vergleich der Feldeigenschaften in elektrisch großen Prüflingen nach DIN EN 61000-4-21 bei HIRF- und DCI-Anregung

M. Sc. Jan Ückerseifer, Xinyu Wei, Prof. Dr. Frank Gronwald

Universität Siegen, Lehrstuhl für Zuverlässigkeit Technischer Systeme und Elektrische Messtechnik, jan.ueckerseifer@uni-siegen.de

1 Einleitung

Neben der Bestrahlung von Prüflingen mit Feldern hoher Amplitude (engl. *HIRF = High Intensity Radiated Field*) eignet sich speziell zur Störfestigkeitsprüfung großer Prüflinge das im Luftfahrtbereich verwendete Verfahren der direkten Stromeinspeisung (engl. *DCI = Direct Current Injection*) [1]. Bei diesem werden Störgrößen mithilfe von Stromquellen galvanisch auf die Prüflingsoberfläche eingeprägt. Sind die generierten Störfelder im Inneren des Prüflings bei HIRF und DCI identisch, kann die Wirkung beider Verfahren als äquivalent angesehen werden. Speziell in elektrisch großen, aperturbefahenen Prüflingen gehorcht das erregte Feld denselben Feldverteilungen wie in Modenverwirbelungskammern (MVK) [2]. Diese Tatsache lässt sich zur Untersuchung der Äquivalenz von HIRF und DCI ausnutzen, indem bei externer Anregung mit beiden Verfahren die statistischen Feldeigenschaften gemäß DIN EN 61000-4-21 [3] eines als MVK aufgefassten Prüflings miteinander verglichen werden.

Während bisherige Veröffentlichungen die Äquivalenz von HIRF und DCI beispielsweise mit Hilfe Charakteristischer Moden [4] oder kombinierter Testverfahren aus DCI und MVK [5] untersuchen, verknüpft dieser Beitrag alle drei Testverfahren zur statistischen Analyse der Äquivalenz von HIRF- und DCI-Tests. Als Testobjekt dient ein als aperturbefahener Rechteckresonator modelliertes Automodell [2] (1580 x 1530 x 3540 mm) mit acht Feldsonden, welches aus drei verschiedenen Richtungen (1: Front, 2: Seite, 3: diagonal) via HIRF mit einer ebenen Welle sowie per DCI mittels Stromquellen angeregt wird, siehe Abbildung 1. Auf Grundlage von DIN EN 61000-4-21 werden aus dem im Prüflingsinneren gemessenen elektrischen Feld $\mathbf{E} = [E_x, E_y, E_z]^T$ statistische Kenngrößen einer MVK [6], wie Feldhomogenität und Feldanisotropie, bestimmt und miteinander verglichen. Zusätzlich zu Simulationsergebnissen unter Verwendung der Finiten Integrationstechnik (FIT) in CST Microwave Studio [7] werden Vergleichsmessungen an geometrisch skalierten HIRF- und DCI-Prüfaufbauten in einem angepassten Frequenzbereich vorgenommen.

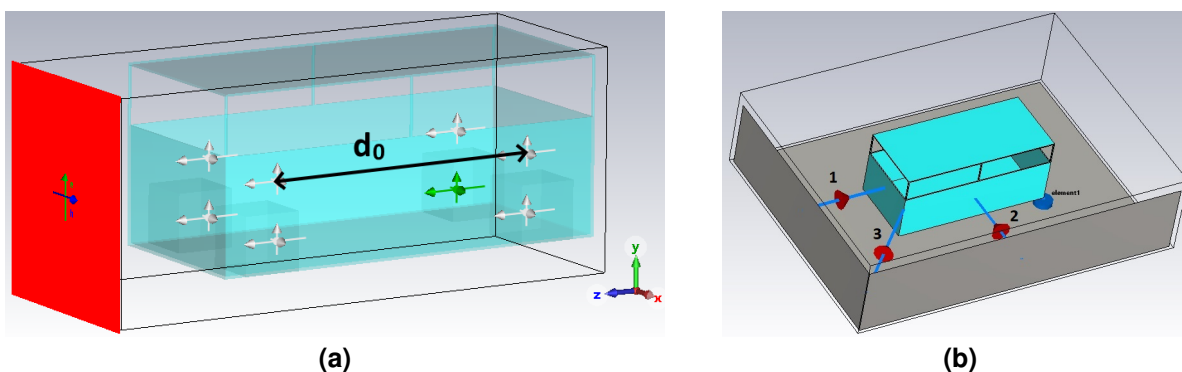


Abbildung 1: (a) Automodell bei HIRF-Test in CST. (b) Automodell bei DCI-Test in CST.

2 Eigenschaften des Prüflings

Die LUF (engl. *lowest usable frequency*) einer MVK ist häufig bei einer minimalen Modenanzahl $N = 60$ bzw. Modendichte $D = 1,39/\text{MHz}$ definiert [8] und liegt für das Automodell gemäß [9] bei ca. 291,6 MHz, siehe Abbildung 2. Seine Güte $Q = \omega W_{\text{el}}/P_V$ bei der Kreisfrequenz ω ist proportional zum Verhältnis aus im Resonatorvolumen V gespeicherter elektrischer Energie $W_{\text{el}} = \varepsilon/2 \int_V |\mathbf{E}|^2 dV$ zur dissipierten Leistung $P_V = \int_A \mathbf{S} d\mathbf{A}$, wobei letztere lediglich die dominierenden Strahlungsverluste durch Aufintegration der Leistungsflussdichte \mathbf{S} über die

Fläche A aller Aperturen berücksichtigt [10]. Gegenübergestellt ist die Güte des Automodells in Abbildung 2 der Güte eines aperturlosen Rechteckresonators gleicher Größe aus Kupfer [11], welche bei hohen Frequenzen ca. drei Größenordnungen überwiegt. Die geringe Güte des Automodells bedingen die Aperturen, durch welche erhebliche Teile einfallender Strahlung wieder auskoppeln.

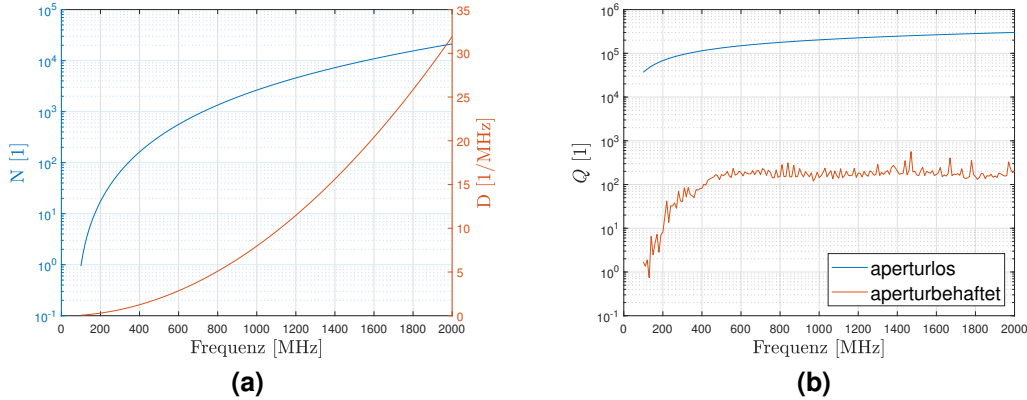


Abbildung 2: (a) Modenanzahl N und Modendichte D des Automodells. (b) Güte Q eines aperturlosen Rechteckresonators und des aperturbedafteten Automodells.

3 Statistische Kenngrößen

Statistische Kenngrößen einer MVK bezüglich des elektrischen Felds sind u. a. Standardabweichungen [3, Anhang B.1.2], Feldanisotropiekoeffizienten [3, Anhang J.2.1] sowie Verteilung der Feldanisotropiekoeffizienten [3, Anhang J.5.1]. Die Standardabweichungen

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{E}_{\alpha,i} - \langle \tilde{E}_\alpha \rangle)^2}{8 - 1}}, \quad \sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=x,y,z}^3 \sum_{i=1}^n (\tilde{E}_{\alpha,i} - \langle \tilde{E}_{\text{tot}} \rangle)^2}{24 - 1}} \quad (1)$$

der auf die Eingangsleistung P_{in} normierten Feldstärkekomponenten $\tilde{E}_\alpha = E_\alpha / \sqrt{P_{\text{in}}}$, $\alpha = x, y, z$ der i -ten Feldsonde sowie des Gesamtfelds $E_{\text{tot}} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ charakterisieren die Feldhomogenität bezüglich der mittleren Feldstärken $\langle \tilde{E}_\alpha \rangle$, $\langle \tilde{E}_{\text{tot}} \rangle$ im rechteckförmigen Arbeitsvolumen, aufgespannt durch $n = 8$ Feldsonden.

Als Abweichung von idealer Feldisotropie sind die planaren Feldanisotropiekoeffizienten

$$A_{\alpha\beta} = \frac{|E_\alpha|^2 / P_{\text{in}} - |E_\beta|^2 / P_{\text{in}}}{|E_\alpha|^2 / P_{\text{in}} + |E_\beta|^2 / P_{\text{in}}}, \quad A_{\text{tot}} = \sqrt{\frac{A_{xy}^2 + A_{yz}^2 + A_{zx}^2}{3}} \quad (2)$$

mit $A_{\alpha\beta} \in [-1, 1]$, $\alpha \neq \beta$ und $\alpha, \beta = x, y, z$ definiert, wobei entweder Isotropie ($A_{\alpha\beta} = 0$), Dominanz der Feldkomponente E_α ($A_{\alpha\beta} > 0$) oder der Feldkomponente E_β ($A_{\alpha\beta} < 0$) vorliegt. Da die Feldanisotropiekoeffizienten Zufallsvariablen entsprechen, kann außerdem ihre kumulative Verteilungsfunktion $F_{A_{\alpha\beta}}(a_{\alpha\beta})$ bzw. $F_{A_{\text{tot}}}(a_{\text{tot}})$ gebildet und mit der Verteilungsfunktion bei idealer Isotropie [12],

$$F_{A_{\alpha\beta}}^*(a_{\alpha\beta}) = \frac{1 + a_{\alpha\beta}}{2}, \quad (3)$$

verglichen werden. Für die Verteilungsfunktion des totalen Anisotropiekoeffizienten bei idealer Isotropie, $F_{A_{\text{tot}}}^*(a_{\text{tot}})$, existiert keine geschlossene Darstellung zu Vergleichszwecken, vgl. [12].

4 Simulationsergebnisse

Abbildung 3 zeigt die Standardabweichungen $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{\text{tot}}$ für HIRF (vertikale Polarisation) und DCI bei drei verschiedenen Anregungsrichtungen, berechnet aus den Daten der acht Feldsonden in CST. Als Referenz dient die bis 1 GHz definierte Grenzwertkurve (schwarz) aus [3],

welche aufgrund kleinerer Problemabmessungen gegenüber üblichen MVKs über 1 GHz hinaus verlängert wurde. Neben Grenzwertüberschreitungen werden in einigen Frequenzbereichen, auch unterhalb der LUF, Grenzwerte eingehalten oder nur geringfügig überschritten, während die in gut verwirbelten Umgebungen übliche Abnahme der Standardabweichung [3] mit steigender Frequenz nicht erkennbar ist. Der mittlere Wert der Standardabweichungen von ca. 4 dB scheint weitgehend unabhängig von Anregungsrichtung und Testverfahren zu sein. Um diesen Mittelwert herum treten jedoch abhängig von der Frequenz stärkere Fluktuationen auf. Einander bezüglich Anregungsrichtung entsprechende HIRF- und DCI-Kurven liegen bei vielen Frequenzen betragsmäßig weniger als 1 dB auseinander.

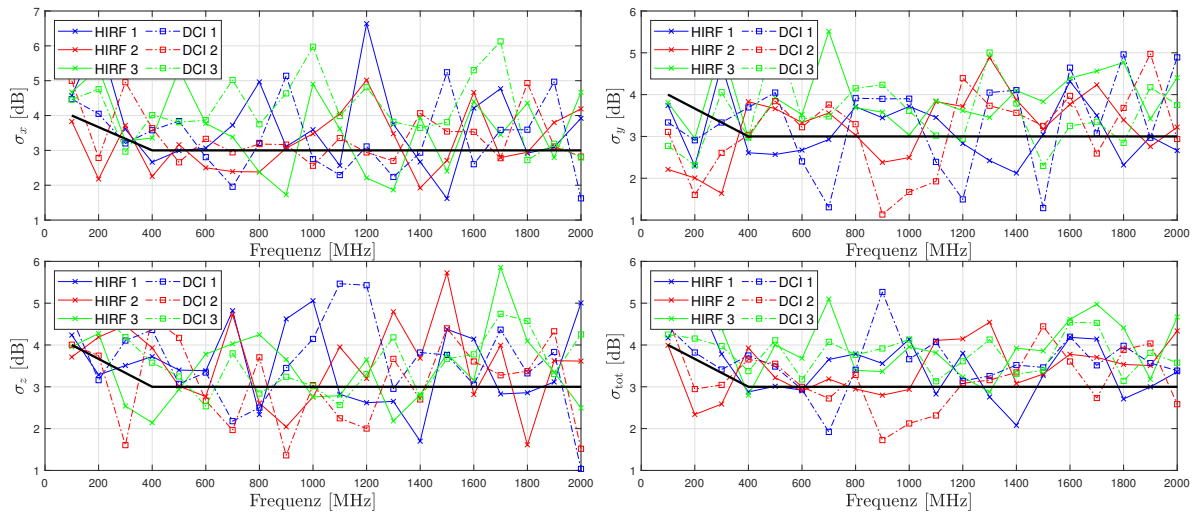


Abbildung 3: Standardabweichungen σ_x , σ_y , σ_z , σ_{tot} des elektrischen Felds.

Die Feldanisotropiekoeffizienten A_{xy} , A_{yz} , A_{zx} , A_{tot} in Abbildung 4 deuten ähnlich zur Standardabweichung eine mit der Frequenz mehr oder weniger stark schwankende Vorzugsrichtung der Feldkomponenten an. Im Mittel ist jedoch insbesondere bei HIRF eine dominante Vorzugsrichtung einzelner Feldkomponenten erkennbar, etwa im Fall A_{xy} , A_{yz} für die y -Komponente aufgrund vertikaler Polarisierung sowie im Fall A_{zx} für die x -Komponente. Eine Abnahme der Feldanisotropiekoeffizienten mit steigender Frequenz, wie in idealen MVKs üblich [13], ist ähnlich zur Standardabweichung nicht beobachtbar. Der mittlere Wert des totalen Anisotropiekoeffizienten von ca. 0,6 deckt sich mit [13].

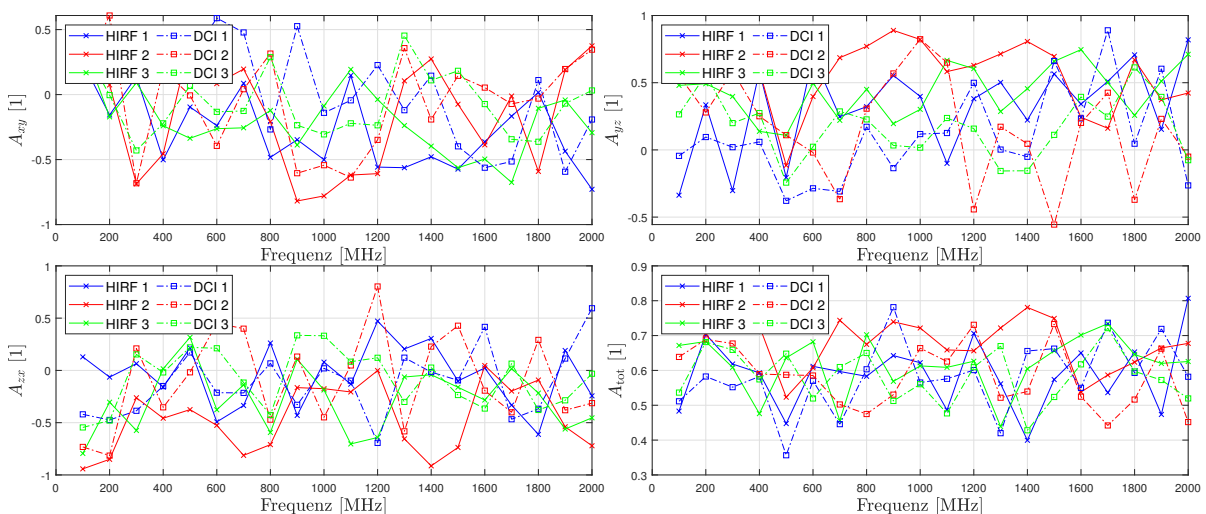


Abbildung 4: Feldanisotropiekoeffizienten A_{xy} , A_{yz} , A_{zx} , A_{tot} des elektrischen Felds.

Die empirischen Verteilungsfunktionen der Feldanisotropiekoeffizienten, siehe Abbildung 5, lassen Vorzugsrichtungen einzelner Feldkomponenten unter Berücksichtigung aller Frequenzan-

teile deutlicher erkennen. Als Referenz (schwarz) ist der isotrope Idealfall nach (3) aufgetragen. HIRF weist für praktisch alle Bestrahlungsrichtungen eine gegenüber DCI tendentiell größere Feldanisotropie auf. Abweichungen zum Idealfall sind sowohl für HIRF als auch DCI deutlich sichtbar und im Vergleich zu Ergebnissen in einschlägiger Literatur für MVKs höherer Güte relativ groß [13].

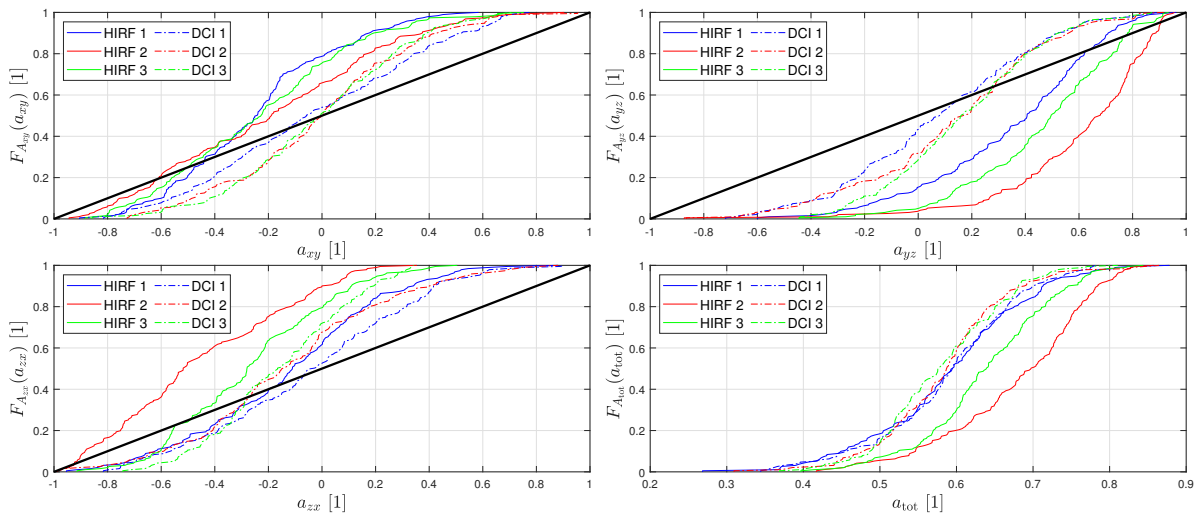


Abbildung 5: Verteilungsfunktionen $F_{A_{xy}}$, $F_{A_{yz}}$, $F_{A_{zx}}$, $F_{A_{tot}}$ der Feldanisotropiekoeffizienten.

5 Messergebnisse

Die Simulationsergebnisse werden anhand geometrisch skaliertes, mittels leitfähigem Klebeband metallisierter 3D-Druck-Modelle (290 x 155 x 155 mm) mit LUF $\approx 3,12$ GHz bei einem Eingangspegel von 25 dBm des HF-Generators *DSG 3060* (Rigol) und angepasstem Frequenzbereich messtechnisch nachvollzogen. Als HIRF-Umgebung dient der GTEM-Wellenleiter *GTEM 250* (Schaffner), der DCI-Aufbau ist eine Eigenkonstruktion aus Kupferblech mit eingeschraubten SMA-Steckverbindern zur Stromeinspeisung bzw. 50 Ω -Abschluss zur Stromentnahme, siehe Abbildung 6. Die Feldsonde *EP-601* (Narda) dient der Messung des elektrischen Felds. Aufgrund des ab 3 GHz geringeren maximalen Generatorpegels von 20 dBm sowie mangels HF-Verstärker ausreichender Bandbreite konnte in Hinblick auf die minimale Empfindlichkeit der Feldsonde (0,5 V/m) kein ausreichender Feldpegel für Frequenzen oberhalb 3 GHz erzeugt werden.

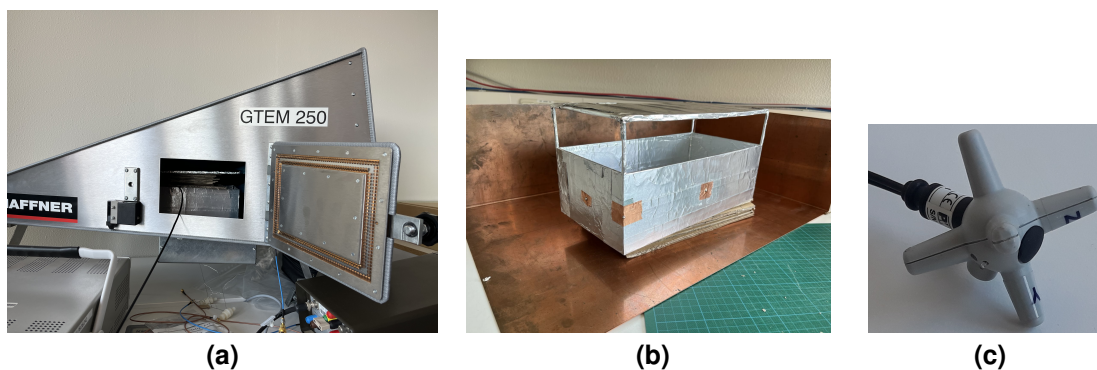


Abbildung 6: (a) Messaufbau HIRF-Test. (b) Messaufbau DCI-Test. (c) Feldsonde *EP-601*.

Die gemessenen Standardabweichungen in Abbildung 7 zeigen ähnliche quantitative Verläufe und Wertebereiche für HIRF und DCI mit mittleren Werten von 3 dB bis 4 dB. Somit sind die Messwerte geringfügig günstiger als in der Simulation, obwohl unterhalb der LUF gemessen wird. Erklärbar ist dies mit einem notwendigerweise größeren Abstand der Feldsonden-Dipole zu den leitfähigen Wänden des Automodells und somit einem kleineren effektiven Arbeitsvolumen gegenüber der CST-Simulation, in welcher punktförmige Feldsonden ein größeres Arbeits-

volumen implizieren. HIRF und DCI generieren vor allem im Bereich um 2 GHz und darüber eine gute Übereinstimmung. Aufgrund der nicht vollständig exakt reproduzierbaren acht Positionen der Feldsonde bei ihrer Umpositionierung entstehen in manchen Frequenzbereichen stärkere Abweichungen und Ausreißer von bis zu 10 dB verglichen zur Simulation.

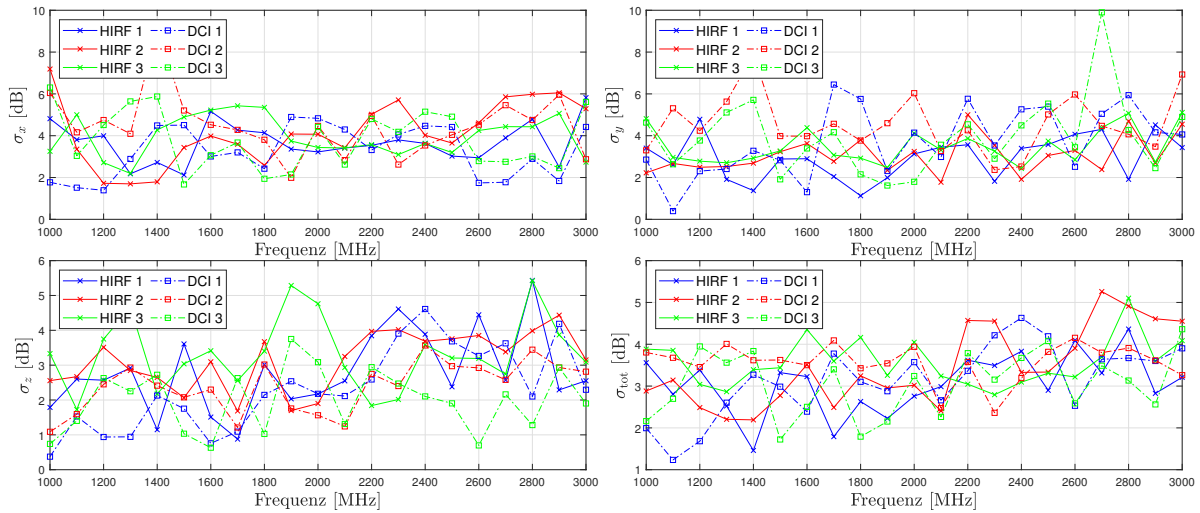


Abbildung 7: Standardabweichungen $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{\text{tot}}$ des elektrischen Feldes.

Die gemessenen Feldanisotropiekoeffizienten A_{xy}, A_{yz}, A_{zx} nach Abbildung 8 schwanken wie in der Simulation um ca. $\pm 0,5$ um den Idealfall $A_{\alpha\beta} = 0$. Ein mittlerer Wert von $A_{\text{tot}} \approx 0,6$ für die totale Feldanisotropie ist deckungsgleich zur Simulation. Ebenfalls übereinstimmend zur Simulation kann eine Dominanz der y -Komponente bei Anregung mit HIRF abgelesen werden, welche aus der gewählten vertikalen Polarisation resultiert.

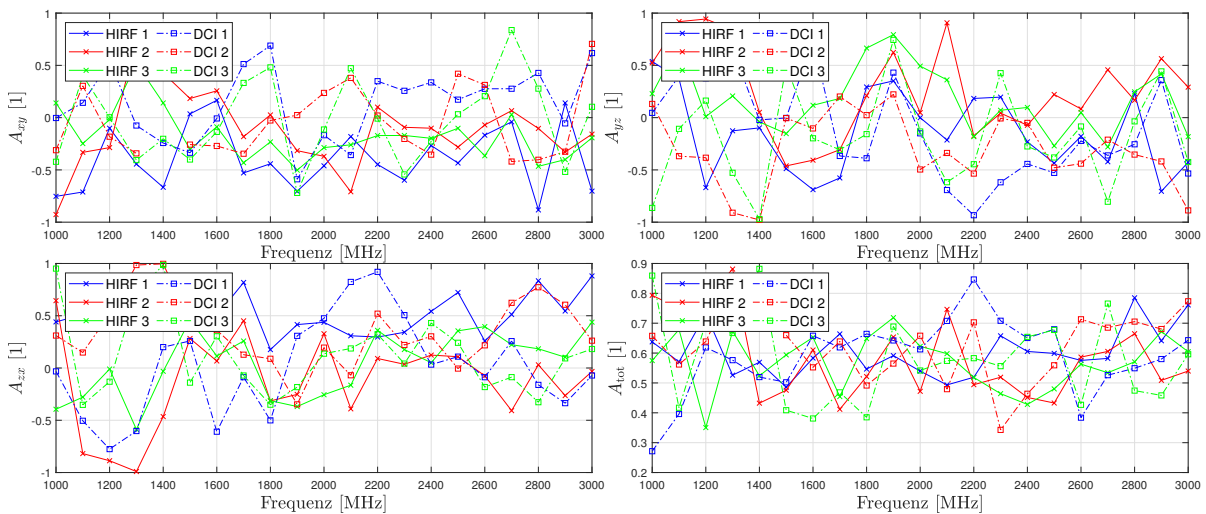


Abbildung 8: Feldanisotropiekoeffizienten $A_{xy}, A_{yz}, A_{zx}, A_{\text{tot}}$ des elektrischen Feldes.

Die Verteilungsfunktionen der Feldanisotropiekoeffizienten entsprechend Abbildung 9 zeigen ähnlich zu den Simulationsergebnissen tendentiell bessere Ergebnisse für DCI, während die größten Abweichungen für die HIRF-Konfigurationen auftreten. Hervorzuheben ist hier erneut die Dominanz der y -Komponente bei HIRF-Anregung aufgrund der vorliegenden vertikalen Polarisation.

6 Ansätze zur Verbesserung der Feldeigenschaften

Positive Einflüsse verschiedener Kammer- und Streukörpergeometrien auf die Modendichte und somit die statistischen Feldeigenschaften einer MVK wurden in [14] diskutiert. Der Einsatz zusätzlicher Streukörper soll nachfolgend im Rahmen einer detaillierteren Fahrzeugmodellie-

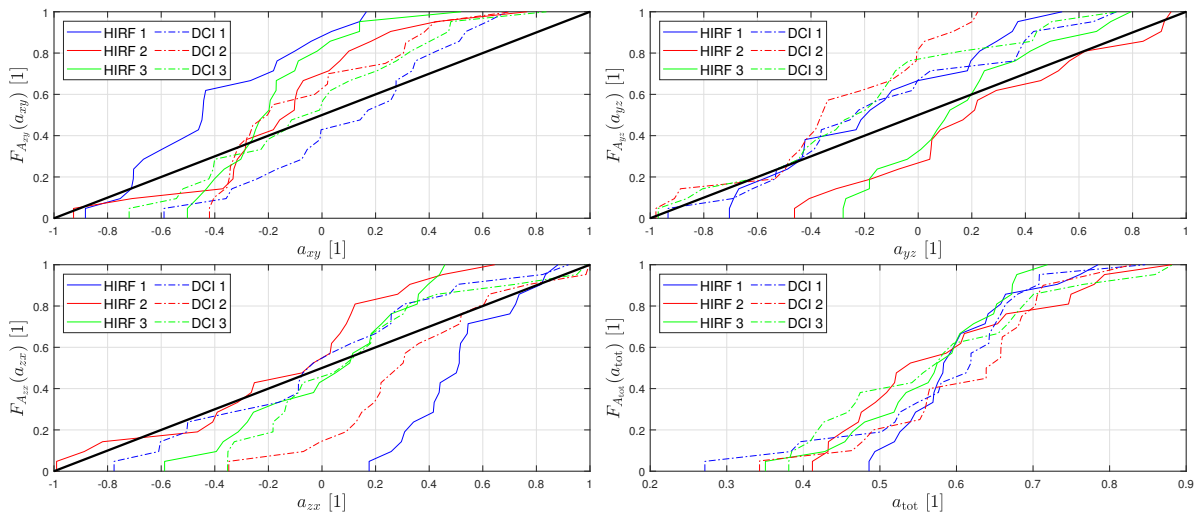


Abbildung 9: Verteilungsfunktionen $F_{A_{xy}}$, $F_{A_{yz}}$, $F_{A_{zx}}$, $F_{A_{tot}}$ der Feldanisotropiekoeffizienten.

zung analysiert werden. Als Streuobjekte dienen vier rechteckförmige (500 x 500 x 500 mm) bzw. zylinderförmige (Länge = Durchmesser = 500 mm) Körper am Fahrzeugboden, die reale Radkästen nachbilden (siehe Silhouetten in Abbildung 1). Im Vergleich zum Fall ohne zusätzliche Streukörper zeigen sich unter anderem im Bereich der LUF deutliche Verbesserungen, siehe Abbildung 10. Sowohl Feldhomogenität als auch Feldisotropie können folglich durch das Einbringen von Streukörpern über breite Frequenzbereiche gesteigert werden.

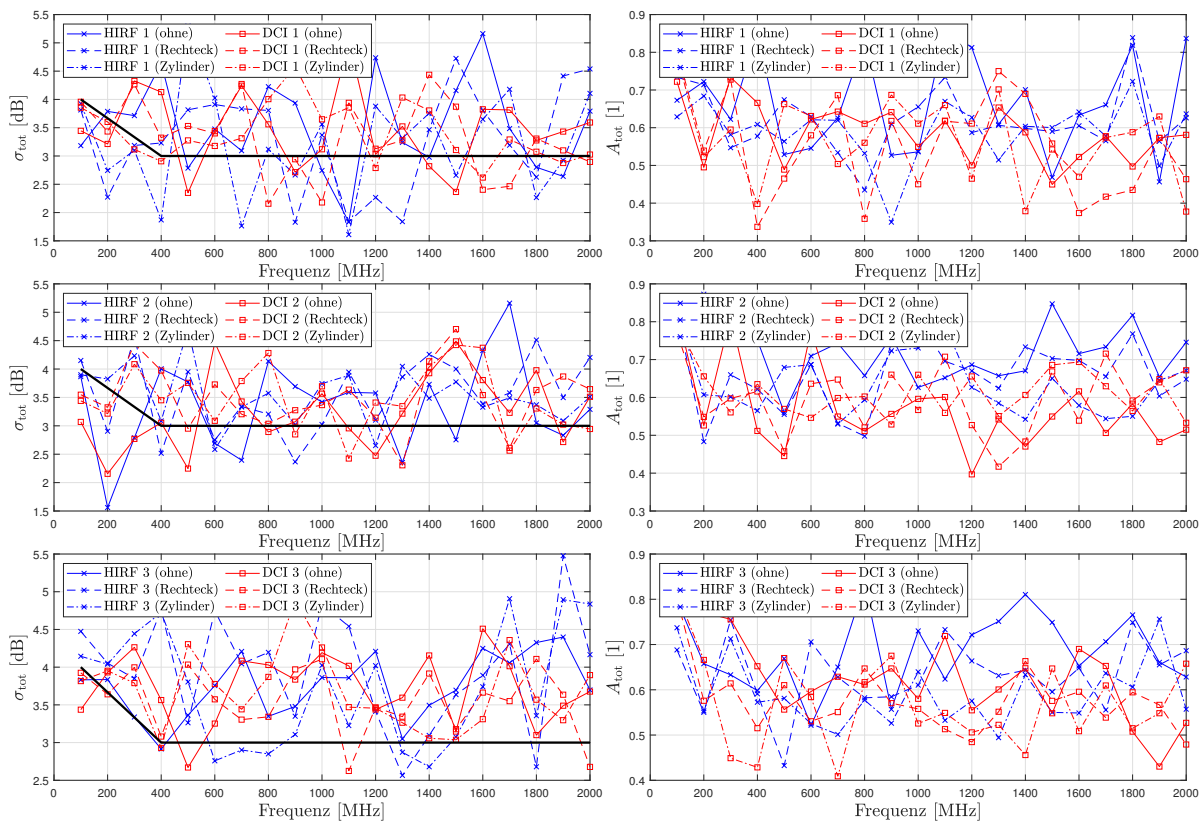


Abbildung 10: Einfluss von Radkästen unterschiedlicher Geometrie auf die Standardabweichung σ_{tot} und den Feldanisotropiekoeffizient A_{tot} .

Als weiterer Einflussfaktor wird eine Verkleinerung des Arbeitsvolumens durch Reduzieren des longitudinalen Feldsondenabstands d_0 , vgl. Abbildung 1, auf $d_0/2$ und $d_0/3$ untersucht, wobei

das Arbeitsvolumen im Zentrum des Automodells verbleibt. Die resultierenden Feldeigenschaften gemäß Abbildung 11 zeigen nur in begrenzten Frequenzbereichen eine Verbesserung. Eine höhere Feldhomogenität bzw. Feldisotropie innerhalb kleinerer Raumbereiche ist somit prinzipiell nicht gegeben.

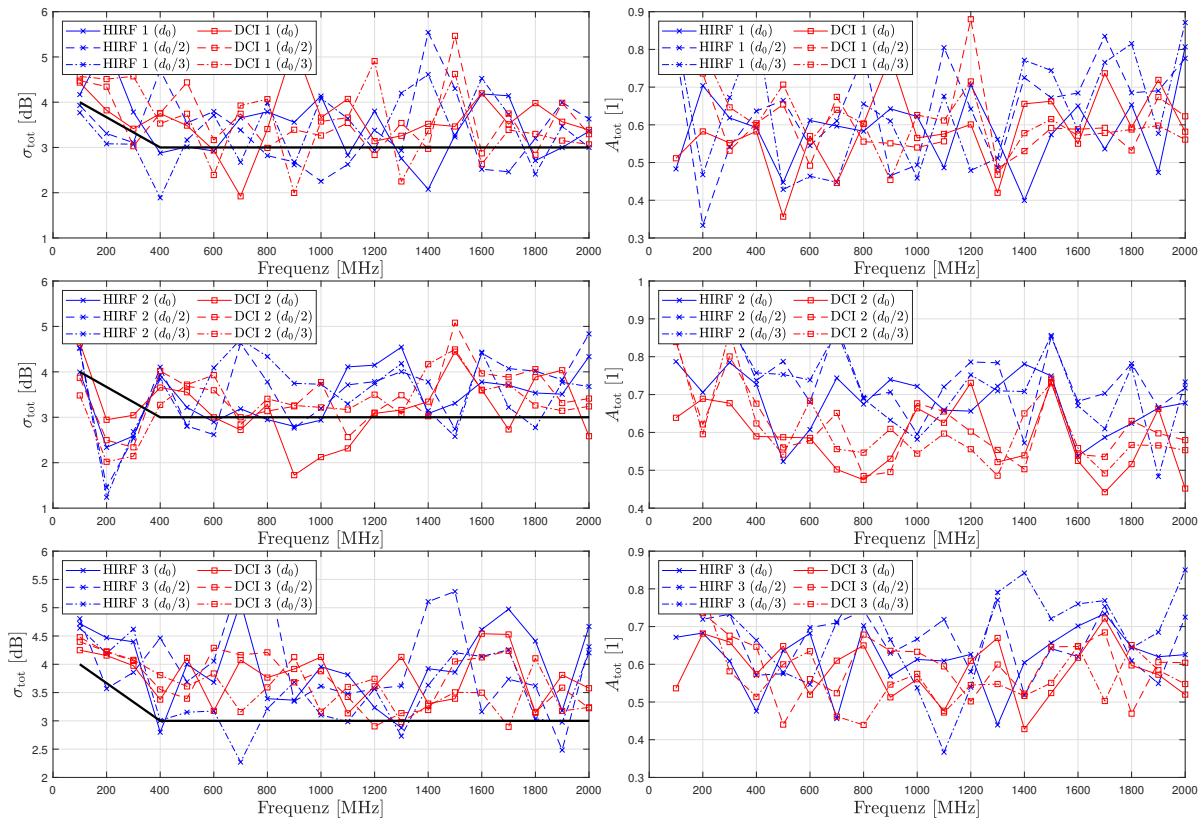


Abbildung 11: Einfluss eines variablen Arbeitsvolumens auf die Standardabweichung σ_{tot} und den Feldanisotropiekoeffizient A_{tot} .

7 Zusammenfassung

Bezüglich der Feldhomogenität zeigt sich, dass die in DIN EN 61000-4-21 festgelegten Grenzwerte der Standardabweichung zwar häufig überschritten, bei vielen Frequenzen jedoch eingehalten werden oder Überschreitungen unterhalb 1 dB liegen. Dies gilt sowohl für Simulation als auch Messung, obwohl letztere ausschließlich Frequenzen unterhalb der LUF verwendet. Eine ähnliche Größenordnung besitzen die Unterschiede zwischen HIRF und DCI, welche über breite Frequenzbereiche ebenfalls unterhalb 1 dB liegen. Insgesamt fluktuieren die Standardabweichungen jedoch relativ stark mit der Frequenz.

Diese Beobachtung betrifft gleichermaßen die Feldanisotropiekoeffizienten, welche für HIRF und DCI eine von idealer Feldisotropie abweichende Vorzugsrichtung einzelner Feldkomponenten anzeigen. Jedoch kann für DCI sowohl hinsichtlich Simulation als auch Messung ein gegenüber HIRF vorteilhafteres Isotropieverhalten beobachtet werden, da das anregende Signal keine bevorzugte Polarisierung besitzt. Der totale Feldanisotropiekoeffizient zeigt ähnliche mittlere Werte wie in gut verwirbelten Umgebungen.

Erhöhte Werte von Standardabweichung und Feldanisotropie sind durch die geringe Güte des Prüflings und fehlende Modenrührer bedingt. Ebenfalls tritt die bei MVKs übliche Verbesserung der Feldeigenschaften mit steigender Frequenz nicht auf, da die Güte des Automodells bei hohen Frequenzen stagniert (vgl. Abbildung 2). Dass außerdem die Güte über den gesamten Frequenzbereich schwankt, erklärt die Fluktuation der Feldgrößen. Die insgesamt schlechte Prüflingsgüte dominiert das EMV-Verhalten und macht es weitgehend unabhängig von Para-

metern der Anregung sowie der Anregungsmethode. So zeigt etwa auch eine (hier nicht prä-sentiertere) Bestrahlung unter unterschiedlichen Polarisierungen oder Elevationswinkeln bei HIRF keine Verbesserungen der Feldeigenschaften. Lediglich eine detailliertere Modellierung des Fahrzeuginnenraums durch Einfügen von Streukörpern führt zu einer Verbesserung der Feldeigenschaften, während ein verkleinertes Arbeitsvolumen kaum Auswirkungen hat.

Danksagung

Die Autoren danken Dr. Mathias Magdowski für unterstützende Hinweise zur inhaltlichen Gestaltung dieses Beitrags.

Literaturangaben

- [1] ED-107A. Guide to certification of aircraft in a high-intensity radiated field (HIRF) environment. EUROCAE, 2010.
- [2] T. Konefal, A. Marvin, J. Dawson, and M. Robinson. A statistical model to estimate an upper bound on the probability of failure of a system installed on an irradiated vehicle. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 49(4):840–848, 2007. DOI: 10.1109/TEM.2007.908265.
- [3] DIN EN 61000-4-21. Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-21: Prüf- und Messverfahren - Verfahren für die Prüfung in der Modenverwirbelungskammer. Beuth, 2011.
- [4] J. Ückerseifer, M. Aidam, M. Rothenhäusler, and F. Gronwald. A numerical analysis of HIRF- and DCI-equivalence by characteristic mode theory. In *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, pages 315–320, 2019. DOI: 10.1109/EMCEurope.2019.8871548.
- [5] M. Rothenhäusler, A. Schoisl, and M. Schwarz. Numerical simulation of a direct current mode stirred reverberation chamber. In *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, pages 247–252, 2019. DOI: 10.1109/EMCEurope.2019.8872037.
- [6] R. Serra. Reverberation chambers through the magnifying glass: an overview and classification of performance indicators. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 6(2):76–88, 2017. DOI: 10.1109/MEMC.0.7990003.
- [7] Dassault Systèmes. CST Studio Suite 2021. Version 2021.05.
- [8] M.L. Crawford. Design, evaluation, and use of a reverberation chamber for performing electromagnetic susceptibility/vulnerability measurements. Technical Note 1092, National Bureau of Standards, 1986.
- [9] B. Liu and D. Chang. Eigenmodes and the composite quality factor of a reverberating chamber. Technical Note 1066, National Bureau of Standards, 1983.
- [10] D.A. Hill, M.T. Ma, A.R. Ondrejka, B.F. Riddle, M.L. Crawford, and R.T. Johnk. Aperture excitation of electrically large, lossy cavities. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 36(3):169–178, 1994. DOI: 10.1109/15.305461.
- [11] D.A. Hill. Electromagnetic theory of reverberation chambers. Technical Note 1506, National Institute of Standards and Technology, 1998.
- [12] L.R. Arnaut, R. Serra, and P.D. West. Statistical anisotropy in imperfect electromagnetic reverberation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 59(1):3–13, 2017. DOI: 10.1109/TEM.2016.2606540.
- [13] M. Magdowski, J. Immidisetti, and R. Vick. Experimental analysis of the field homogeneity and isotropy inside a reverberation chamber with two hemispherical diffractors. In *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, pages 683–688, 2018. DOI: 10.1109/EMCEurope.2018.8485147.
- [14] L.R. Arnaut. Operation of electromagnetic reverberation chambers with wave diffractors at relatively low frequencies. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 43(4):637–653, 2001. DOI: 10.1109/15.974645.