

MoM-Simulation und Messung statistischer Feldparameter in Modenverwirbelungskammern

H.G. Krauthäuser, J. Nitsch

Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, IGET, Postfach 4120, 39106 Magdeburg, hgk@ieee.org

Zusammenfassung – Ziel dieser Arbeit ist es, die Eignung der MoM zur Vorhersage statistischer Feldparameter von Modenverwirbelungskammern zu untersuchen. Hierzu werden Simulationen mit unterschiedlichen Leitfähigkeiten der Resonatorwände mit Messungen in der Magdeburger Modenverwirbelungskammer und theoretischen Vorhersagen verglichen. Für stark reduzierte Leitfähigkeiten ergibt sich hierbei ein Bereich, in dem die Simulationen numerisch stabil sind, und in dem valide Vorhersagen, insbesondere zur Rührereffektivität bei tiefen Frequenzen, möglich erscheinen.

1 Motivation

Modenverwirbelungskammern (MVKn) finden zunehmend Beachtung als EMV-Testumgebungen. Die Eigenschaften und statistischen Parameter einer bestehenden MVK sind durch Messungen zugänglich [3, 5]. Für in Planung befindliche MVKn können Größen, wie z.B. die Resonanzfrequenzen, die Modendichte und bedingt auch die Güte aus der Geometrie und den Materialien abgeschätzt werden. Für darüber hinausgehende Aussagen — insbesondere zur Plazierung und Form des Modenrührers bzw. der Modenrührer — ist man bisher vor allem auf Erfahrungswissen angewiesen. Der kritische Frequenzbereich ist hierbei die Region der ersten nutzbaren Frequenz, wobei auch diese ein gleichermaßen unbekannter wie wichtiger Parameter ist. Für hohe Frequenzen spielen die Geometrie und Position der Rührer eine eher untergeordnete Rolle: Funktioniert eine MVK bei tiefen Frequenzen, so wird dies auch bei hohen Frequenzen der Fall sein. Typische Probleme bei hohen Frequenzen sind eher Leckagen der Schirmung, die zu einer Reduktion der Güte — und damit der erreichbaren Feldstärke — führen.

Die statistische Theorie der Modenverwirbelungskammern ist zwar gut entwickelt und experimentell validiert, jedoch gilt sie nur im Grenzfall hoher Frequenzen [4]. Gerade im kritischen Frequenzbereich kann die Gültigkeit der statistischen Vorhersagen nicht erwartet werden.

Ansätze zu einer analytischen Theorie der Felder in Resonatoren deutlich oberhalb der ersten Resonanzfrequenz existieren zwar, können aber zur Zeit z.B. noch keine reale Rührergeometrie oder reale Antennenstrukturen behandeln [7].

Es bleibt somit nur der Weg der numerischen Simulation. Hier bietet sich zunächst die Transmission-Line-Method (TLM) an [1]. Von dieser Zeitbereichsmethode ist bekannt, dass sie sehr zuverlässige Resultate auch für resonante Strukturen liefern kann. Allerdings lassen sich mit den bekannten TLM-Implementationen reale Rührergeometrien nur sehr schlecht approximieren, und auch die Modellierung realer Antennen (z.B. logarithmisch-periodische Antenne) ist kaum möglich.

In diesem Beitrag soll daher erstmals untersucht werden, inwieweit die Method of Moments (MoM) [6] zur Vorhersage von E-Feld-Verteilungsfunktionen sowie von Autokorrelationsfunktionen eingesetzt werden kann. Konkret fiel die Wahl hierbei auf das Programmpaket CONCEPT [2].

Im Folgenden werden Ergebnisse von Simulationsrechnungen vorgestellt und mit Messungen in der Magdeburger Modenverwirbelungskammer sowie mit den Vorhersagen der statistischen Theorie der MVKn verglichen.

2 Simulationen

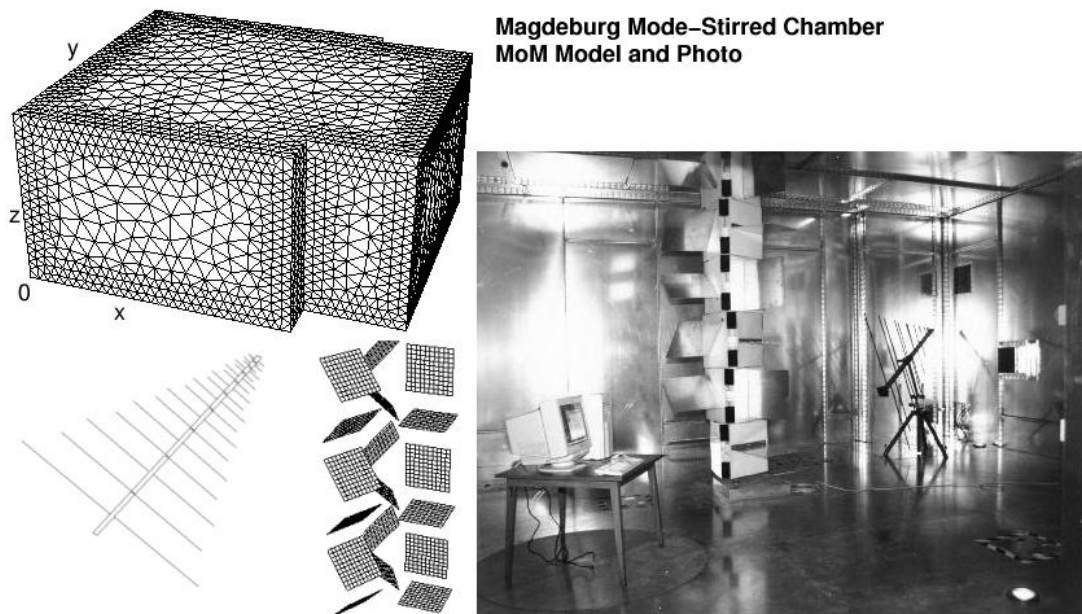


Abbildung 1: Die Magdeburger Modenverwirbelungskammer: Photo und MoM-Modell.

Die in Abschnitt 5 vorgestellten Resultate sind das Ergebnis von CONCEPT-Simulationen mit einem Modell der Magdeburger Modenverwirbelungskammer. Das Modell und ein Photo der Magdeburger MVK sind in Abbildung 1 dargestellt. Bei Erstellung des Modells wurde versucht, die reale Geometrie möglichst genau nachzubilden. Das gilt für die Kammer ebenso wie für die Geometrie und Position des Modenrührers und der Antenne. Als Simulationsfrequenz wurde 200 MHz ausgewählt. Diese Frequenz liegt knapp über der experimentell bestimmten kleinsten nutzbaren Frequenz von etwa 150 MHz. Das aus dem Modell resultierende Gleichungssystem hat etwa 13.000 Unbekannte. Von Simulation zu Simulation wurde der Rührer jeweils um 5 Grad rotiert. Für die Durchführung der Rechnungen stand ein Cluster mit insgesamt 12 ALPHA-CPU's und 7 GByte Hauptspeicher zur Verfügung.

Die ursprüngliche Planung, die Simulationen mit der parallel arbeitenden Variante pCONCEPT durchzuführen, konnte leider vorläufig nicht realisiert werden. Die ersten Simulationen mit unendlicher Leitfähigkeit der Kammerwände ergaben keine zuverlässigen Resultate. Eine Berücksichtigung endlicher Leitfähigkeiten ist in pCONCEPT zur Zeit jedoch noch nicht möglich (hieran wird gearbeitet), so dass alle hier dargestellten Simulationen mit der sequentiell arbeitenden Variante durchgeführt werden mussten. Der Zeitaufwand für die Berechnung für eine Rührerposition liegt bei etwa 700 Minuten, wobei sieben Positionen auf dem Cluster gleichzeitig berechnet werden können. Die Berechnung einer Rührerposition mit pCONCEPT erfolgt in etwa 15 Minuten.

Die Simulationen wurden mit unterschiedlichen Leitfähigkeiten der Wände durchgeführt. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die Rechnung numerisch zu stabilisieren. Da in die statistische Theorie der Modenverwirbelungskammern die Güte nicht eingeht, besteht die Hoffnung, dass aus den bei der Simulation mit kleiner Leitfähigkeit gewonnenen statischen Parametern trotzdem valide Aussagen über reale MVKn (mit hoher Güte) folgen können.

3 Messungen

Zur Validierung der MoM-Simulationen wurden Messungen in der Magdeburger Modenverwirbelungskammer (ca. 8 m × 6 m × 3,5 m, Schirmung aus verschraubten Stahlmodulen, ein vertikaler Modenrührer, vgl. Abbildung 1) durchgeführt. Hierbei wurden die kartesischen Komponenten des E-Feldes mittels einer aktiven E-Feld Sonde (EMCO 7240) an vier Punkten im Raum als Funktion der Rührerposition gemessen. Bezüglich eines Koordinatensystems, das in Abbildung 1 angedeutet ist, haben die Messpunkte die Koordinaten $P_1 = (2m, 1m, 1m)$, $P_2 = (2m, 2m, 1m)$, $P_3 = (2m, 3m, 1m)$ und $P_4 = (2m, 4m, 1m)$. Die Anregungsfrequenz betrug für alle Messungen 200 MHz. Der Rührer wurde in ein Grad Schritten gedreht.

Die Ergebnisse der Messungen werden in Abschnitt 5 gemeinsam mit den Simulationsergebnissen vorgestellt und diskutiert.

4 Theorie

Auf eine detaillierte Darstellung der statistischen Theorie von Modenverwirbelungskammern muss hier verzichtet werden. Einen guten Einstieg in diese Thematik vermittelt [4]. Im Folgenden werden einige Ergebnisse zusammengefasst, die für die weitere Diskussion hilfreich sind.

Für den Grenzfall hoher Frequenzen können die Parameter des elektromagnetischen Feldes als Zufallsvariable aufgefasst werden. Im Sinne einer Maximum-Entropie Lösung ergeben sich dann folgende Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF):

- Real- und Imaginärteile der kartesischen Feldkomponenten sind normalverteilt um Null mit der Varianz $\sigma^2 = \frac{E_0^2}{6} = \frac{\langle W(\vec{r}) \rangle}{6\epsilon_0}$ ($\langle W(\vec{r}) \rangle$ ist die mittlere Energiedichte), d.h. z.B. für den Realteil der x-Komponente E_{xr} :

$$f(E_{xr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{E_{xr}^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1)$$

- Der Betrag jeder kartesischen Feldkomponente ist χ -verteilt mit zwei Freiheitsgraden (Rayleigh Verteilung), also z.B.

$$f(|E_x|) = \frac{|E_x|}{\sigma^2} \exp \left[-\frac{|E_x|^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2)$$

- Das Quadrat des Betrages jeder Feldkomponente ist χ^2 -verteilt mit zwei Freiheitsgraden, z.B.

$$f(|E_x|^2) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp \left[-\frac{|E_x|^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3)$$

- Der Betrag des Gesamtfeldes ist χ -verteilt mit sechs Freiheitsgraden:

$$f(|\vec{E}|) = \frac{|\vec{E}|^5}{8\sigma^6} \exp \left[-\frac{|\vec{E}|^2}{2\sigma^2} \right] \quad (4)$$

- Das Betragsquadrat des resultierenden E-Feldes ist χ^2 -verteilt mit sechs Freiheitsgraden:

$$f(|\vec{E}|^2) = \frac{|\vec{E}|^4}{16\sigma^6} \exp \left[-\frac{|\vec{E}|^2}{2\sigma^2} \right] \quad (5)$$

- Die Ergebnisse für das H-Feld ergeben sich durch die Ersetzungen $E \rightarrow H$ und $\sigma^2 \rightarrow \sigma_H^2 = \langle H_{xr}^2 \rangle = \frac{E_0^2}{6Z_0^2}$

Für den Vergleich der Theorie mit Messung und Simulation sind die Verteilungen für den Betrag der kartesischen Komponenten (Gleichung (2)) und des Gesamtfeldes (Gleichung (4)) interessant. Wegen der niedrigen Simulations- bzw. Messfrequenz, sind Abweichungen vom theoretischen Verlauf zu erwarten. Fallen die Abweichungen der Simulation vom theoretischen Verlauf klein aus, so würde dies die Notwendigkeit von numerischen Simulationen nachträglich in Frage stellen.

Ein Hauptziel der Simulationen ist die Bewertung der Rührerqualität bei tiefen Frequenzen. Ein Maß hierfür liefert die Autokorrelationsfunktion der Feldstärke als Funktion der Rührerposition:

$$r(\alpha) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i^0 - \langle E \rangle) (E_i^\alpha - \langle E \rangle)}{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E_i^0 - \langle E \rangle)^2} \quad (6)$$

Hierbei ist E_i^0 der Originaldatensatz und E_i^α der um den Winkel α rotierte Datensatz. N bezeichnet die Anzahl der Winkelpositionen. Für $\alpha = 0$ ergibt sich völlige Autokorrelation, d.h. $r(\alpha) \simeq 1$. Für größer werdendes α sinkt die Autokorrelation zunächst ab. Der Winkel, für den ein Wert von 0.36 unterschritten wird, wird üblicherweise als die kleinste Rotation definiert, die statistisch unabhängige Feldstärkemessungen liefert. Ein Modenrührer ist umso effektiver, je kleiner dieser Winkel ist.

5 Ergebnisse

Im folgenden werden die Mess- und Simulationsergebnisse für die vier Punkte P_1 bis P_4 erläutert und den theoretischen Vorhersagen gegenübergestellt. Hierzu finden sich in den Abbildungen 2 und 3 zunächst die E-Feldstärken als Funktion der Rührerposition.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Hierbei wurden jedoch nicht die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen aus Gleichung (2) und (4) integriert. Offensichtlich ist (dies war auch zu erwarten), dass die Standardabweichungen (somit auch die Mittelwerte) der verschiedenen Rechnungen und die der Messungen jeweils verschieden sind. Dieser Effekt muss zunächst herauskaliert werden. Für die χ -Verteilungsdichtefunktionen zu den Freiheitsgraden zwei und sechs wird dies durch die Bildung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von E/σ erreicht.

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen schließlich die Autokorrelationsfunktion im Bereich kleiner Winkel. Zusätzlich ist hier eine Linie bei $r = 0.36$ eingezeichnet.

In all diesen Abbildungen sind jeweils die Ergebnisse für die drei kartesischen Komponenten und für das Gesamtfeld in einzelnen Graphen dargestellt. Die verschiedenen Leitfähigkeiten für die Simulationsrechnungen sind in den Legenden angegeben. Die Feldstärken der Messung wurden auf eine Spannung von 1 Volt an der Antenne (entsprechend der Simulation) umgerechnet.

5.1 Feld versus Winkel

Das Simulationsmodell soll die wahren Verhältnisse in der Magdeburger Modenverwirbelungskammer möglichst exakt nachbilden. Daher wurde für die Leitfähigkeit der Wände zunächst ein Wert von $7 \cdot 10^6$ S/m angesetzt. Anschliessend wurden Simulationen für 10^4 S/m und 10^3 S/m durchgeführt. Die Feldverteilungen als Funktion des Rührerwinkels sind in diesen drei Fällen sehr ähnlich: Es ergibt

sich eine — im Vergleich zur Messung — nur sehr schwache Variation der Feldstärke in Abhängigkeit vom Rührerwinkel. Es besteht der Verdacht, dass CONCEPT in diesem Bereich sehr hoher Resonatorgüte numerische Probleme hat. Verstärkt wird dieser Verdacht durch das Simulationsergebnis für eine Leitfähigkeit von 100 S/m: Trotz geringerer Güte ergeben sich Feldstärken, die etwa eine Größenordnung größer sind. Wären die Lösungen für hohe Güten (Leitfähigkeiten) physikalisch, so müssten die Feldstärken mit geringer werdender Leitfähigkeit zurückgehen. Genau dies geschieht dann auch bei einer weiteren Verringerung auf 10 S/m. Die Kurven für 10 S/m zeigen wieder nur eine geringe Abhängigkeit vom Rührerwinkel. Die Ursache der schmalen Spitze, die hier zu beobachten ist, muss noch genauer analysiert werden. Insbesondere sind hier noch Simulationen mit kleineren Rührerschritten notwendig, da diese Spitze nur aus einem Punkt besteht. Bei der Diskussion der Autokorrelationsfunktionen im Abschnitt 5.3 wird hierauf nochmals eingegangen werden.

Es ergibt sich der Eindruck, dass die Simulationen zunächst einen Bereich numerischer Instabilität durchlaufen. Bei Verringerung der Leitfähigkeit gelangt man offensichtlich in ein Gebiet, in dem die Lösungen schon numerisch stabil erscheinen und noch eine resonante Struktur vorliegt. Bei einer weiteren Absenkung der Leitfähigkeit verliert das Modell schließlich seinen resonanten Charakter.

5.2 Kumulierte Verteilungsfunktionen

Die Analyse der kumulierten Verteilungsfunktionen (CDF) ergibt insgesamt kein einheitliches Bild: Im Trend zeichnet sich ab, dass die Kurven für die drei höchsten Leitfähigkeiten zu größeren Werten von E/σ hin verschoben sind. Es ergeben sich weder konsequente Übereinstimmungen der Messung mit der Theorie, der Simulationen mit der Theorie oder einer Simulation mit der Messung.

Die Abweichungen der Simulationen bzw. der Messungen von der Theorie können zwanglos dadurch erklärt werden, dass die Theorie in diesem Frequenzbereich nicht mehr gültig ist. Die Abweichungen zwischen Simulation und Messung deuten darauf hin, dass noch nicht alle Faktoren der Messung in die Simulation eingehen. Dies bedarf einer weiteren Analyse.

5.3 Autokorrelation

Die Autokorrelationsfunktionen der Simulationen mit den Leitfähigkeiten größer/gleich 10^3 S/m fallen im Vergleich zur Messung offensichtlich zu langsam ab. Dies ist konsistent mit dem direkten Eindruck der Strukturlosigkeit des Verlaufs der Feldstärke als Funktion des Rührerwinkels.

Für die Simulation mit einer Leitfähigkeit von 100 S/m ergibt sich eine verblüffend gute Übereinstimmung mit der Messung. Allerdings geht hier die Autokorrelation schon so schnell verloren (< 10 Grad), dass zusätzliche Simulationen mit einer kleineren Schrittweite als 5 Grad notwendig erscheinen.

Noch deutlicher wird dies bei der Simulation mit 10 S/m. Die Feldstärkeverteilung als Funktion des Rührerwinkels erscheint hier subjektiv zunächst strukturlos. Die Autokorrelation macht aber deutlich, dass genau das Gegenteil der Fall ist: Die einzelne Rührerposition, für die sich eine etwa um eine Größenordnung erhöhte Feldstärke ergibt, führt natürlich zu einem fast vollständigen Verlust der Autokorrelation bei Rotation um einen Schritt (5 Grad). Hier sind also unbedingt Simulationen mit kleinerer Rührerschrittweite nötig.

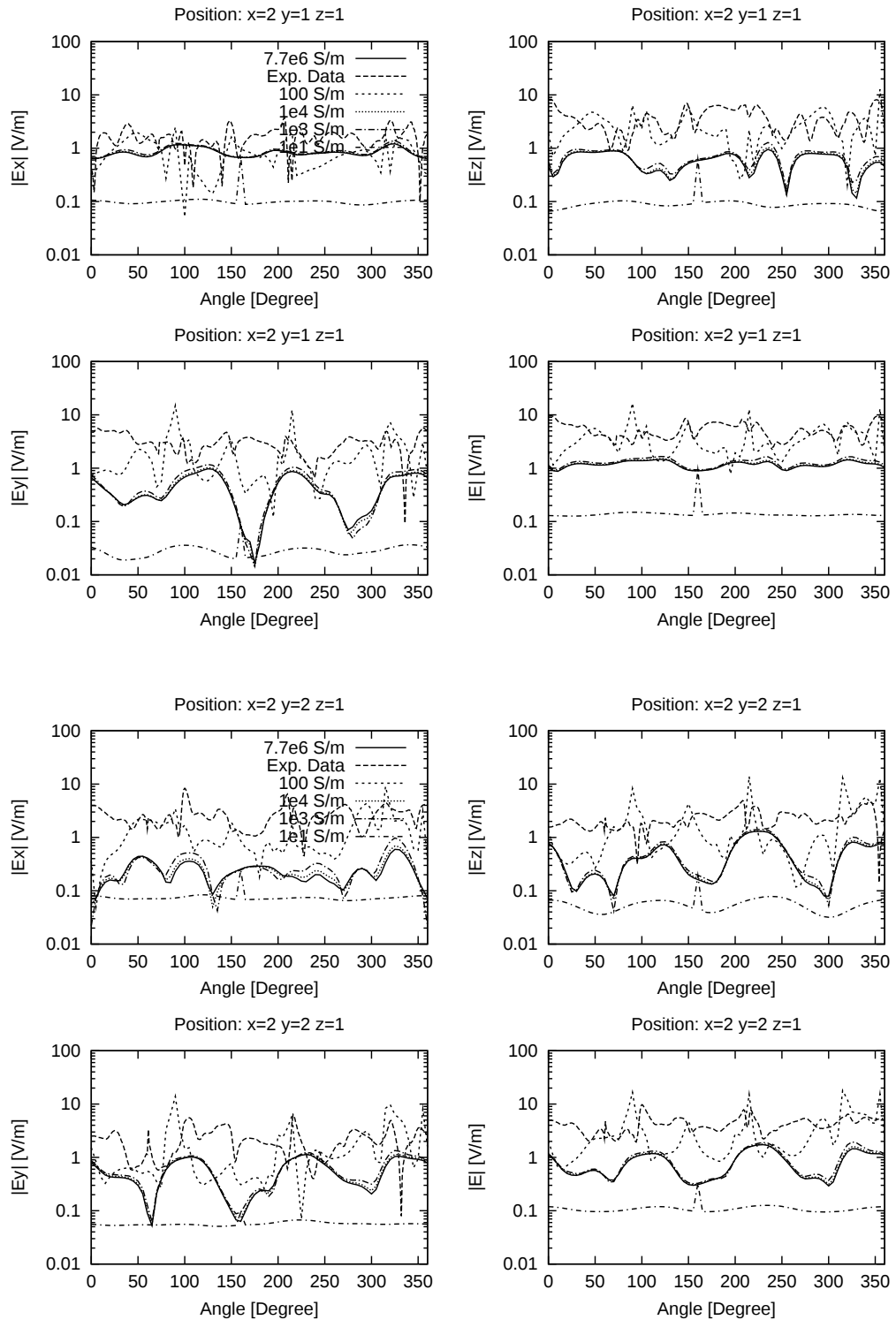


Abbildung 2: E-Feldstärke versus Rührerwinkel für die Position (2,1,1) und (2,2,1).

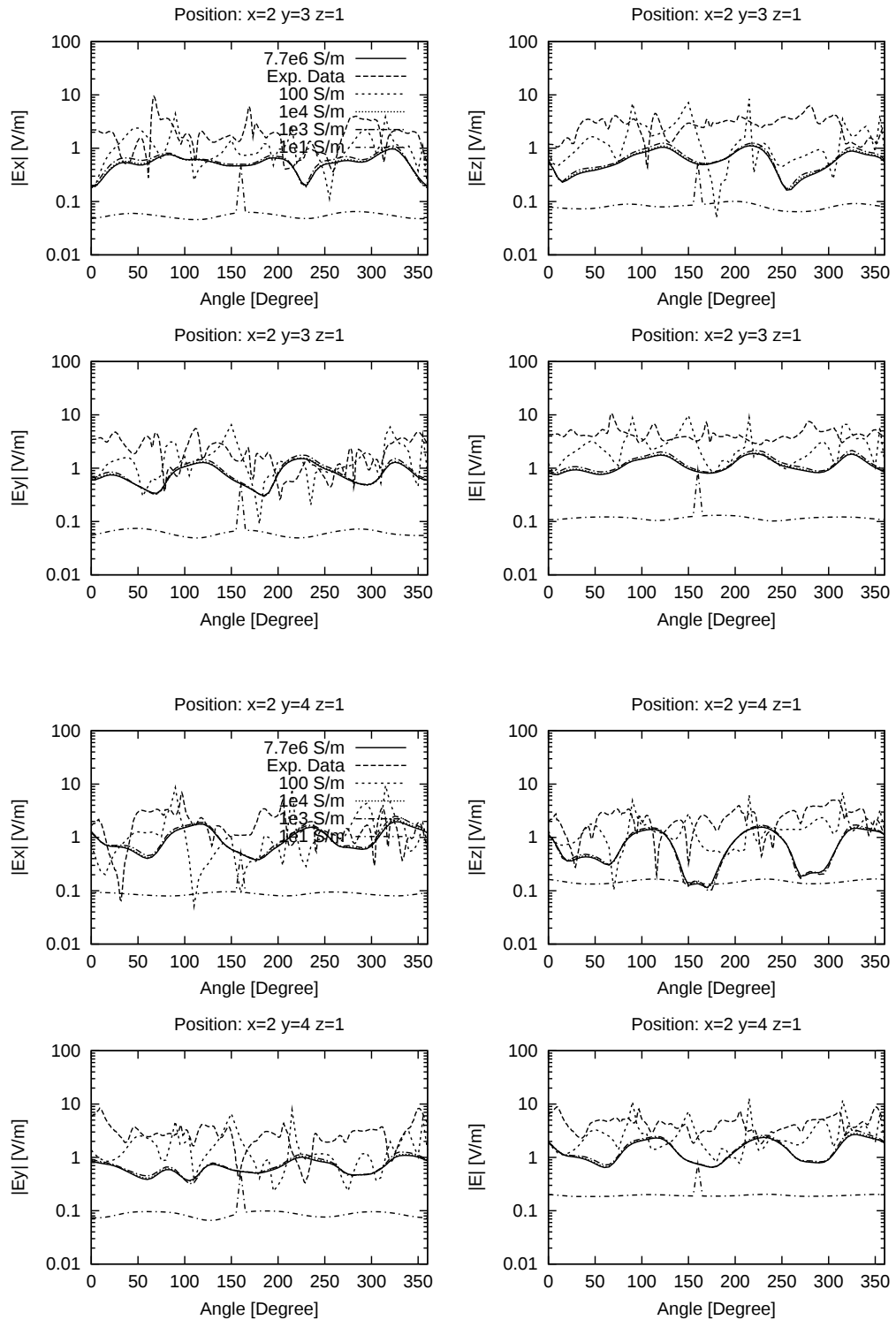


Abbildung 3: E-Feldstärke versus Rührerwinkel für die Position (2,3,1) und (2,4,1).

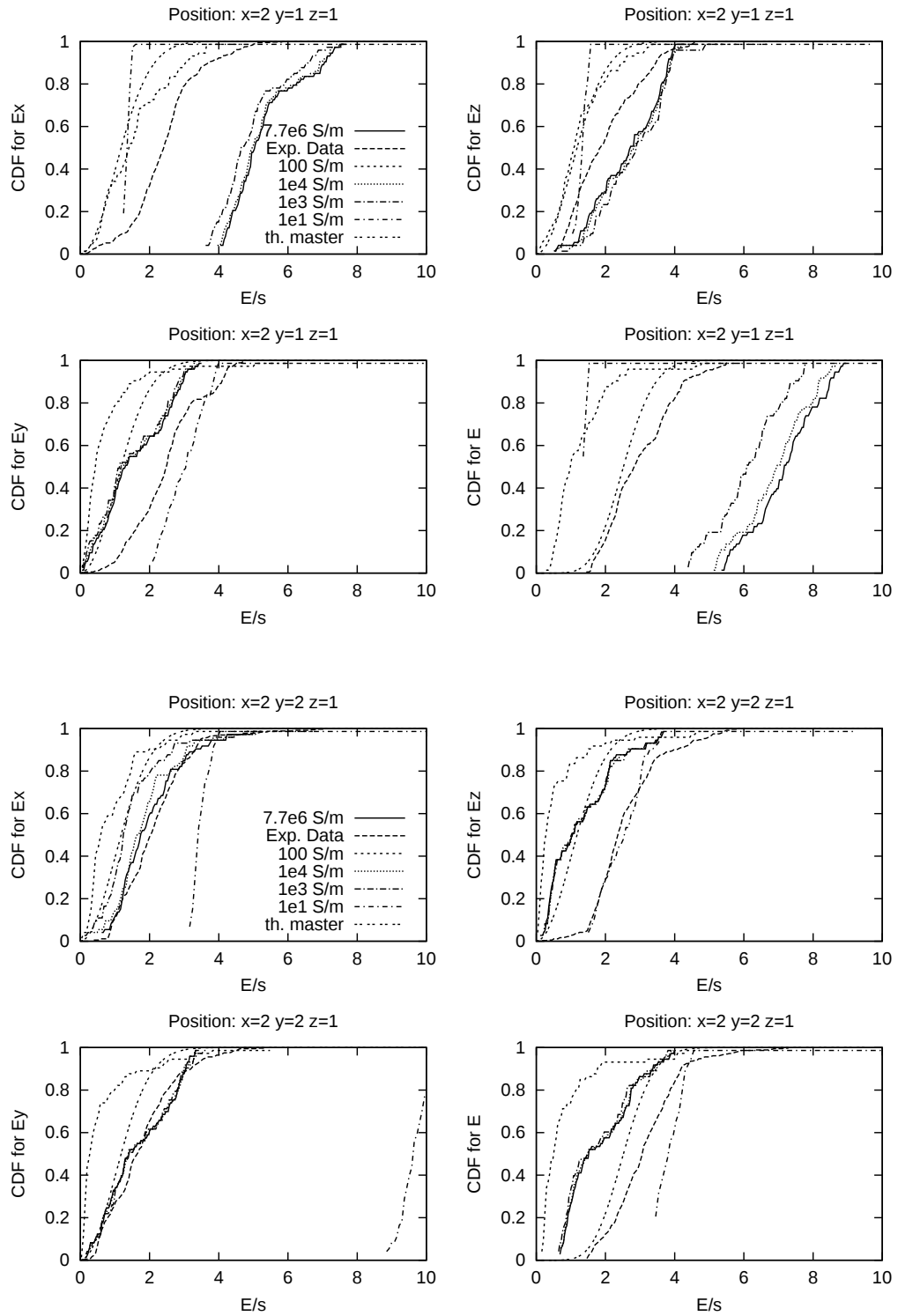


Abbildung 4: CDF von E/σ für die Position $(2,1,1)$ und $(2,2,1)$.

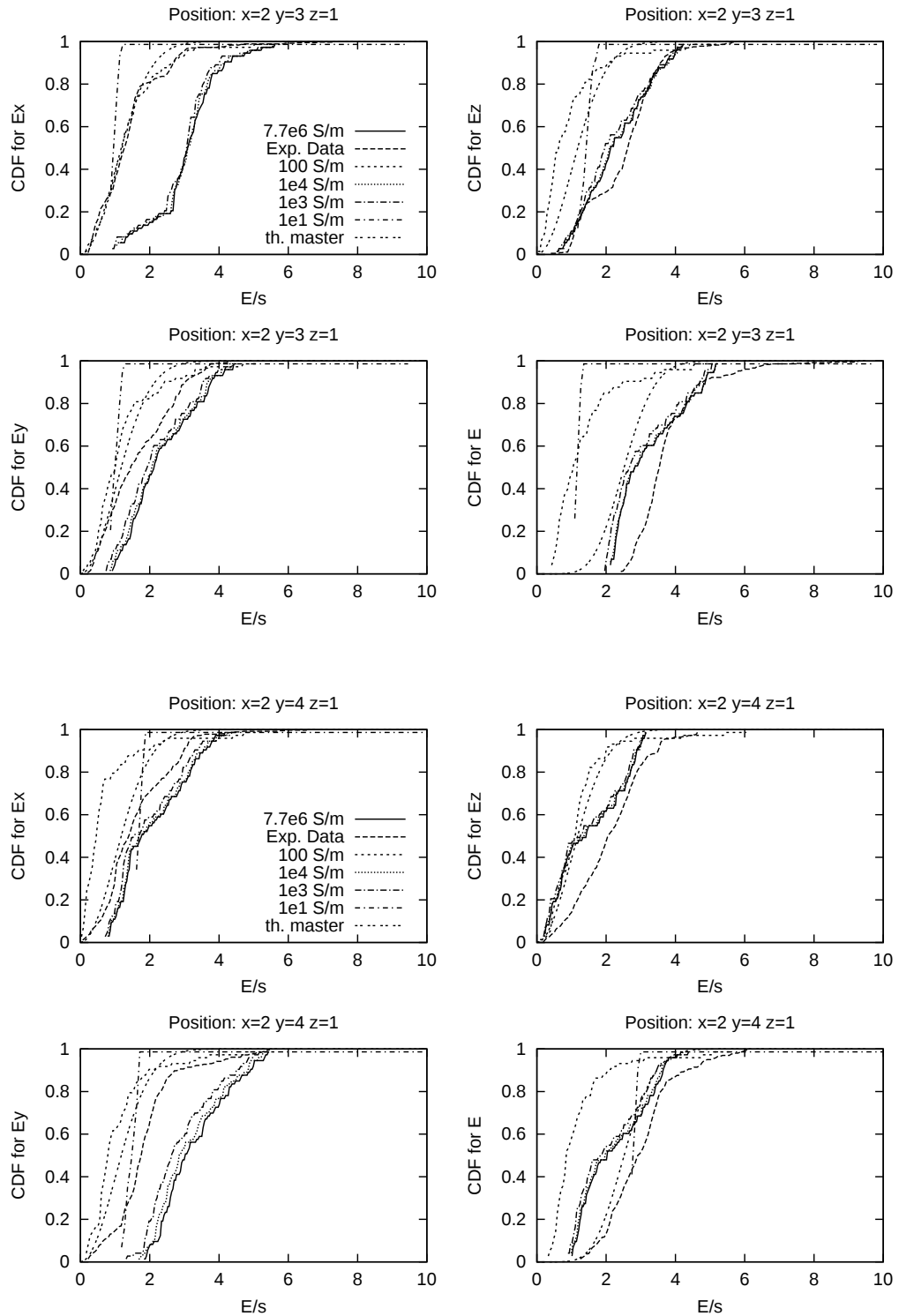


Abbildung 5: CDF von E/σ für die Position $(2,3,1)$ und $(2,4,1)$.

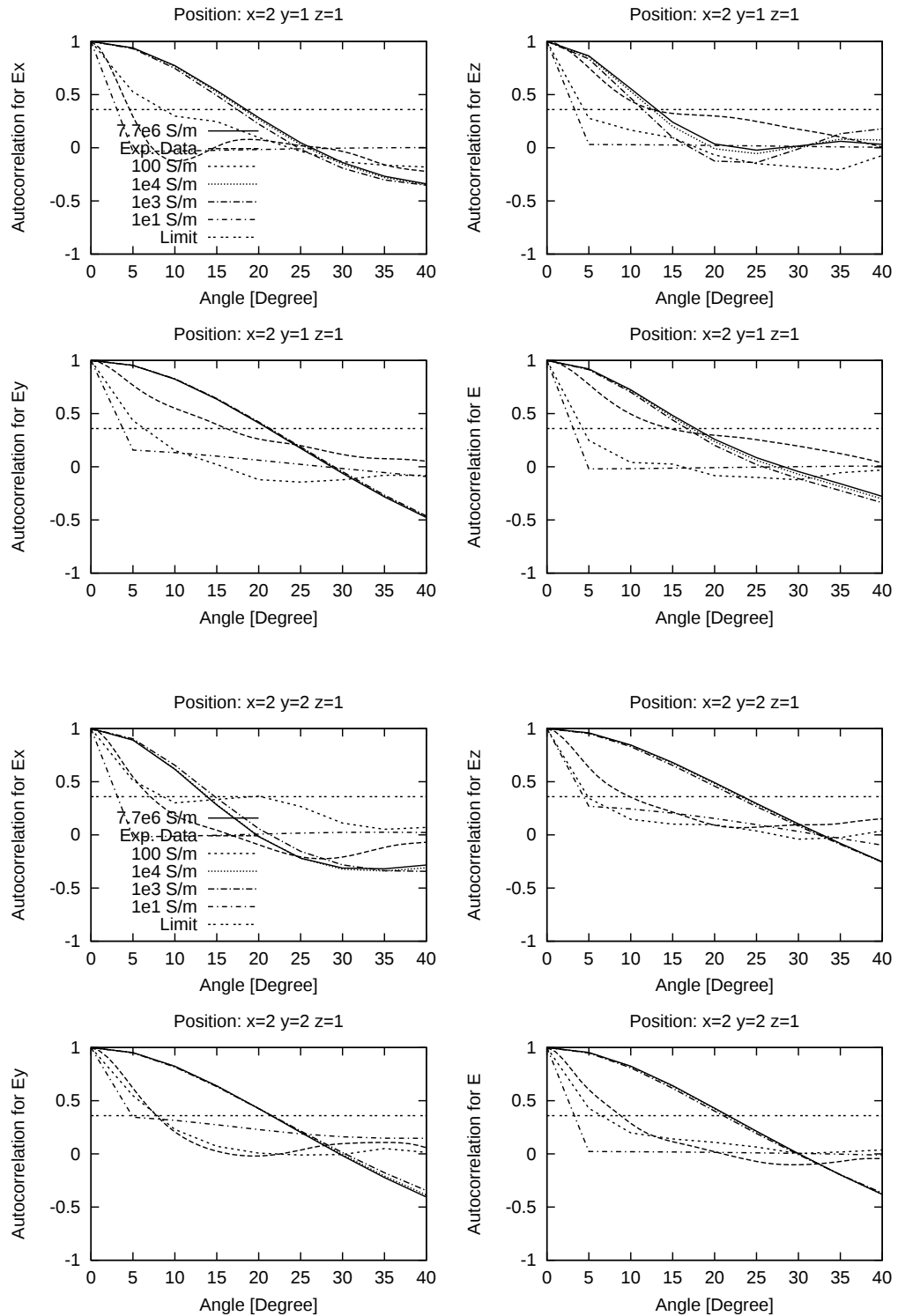


Abbildung 6: Autokorrelationsfunktion für die Position $(2,1,1)$ und $(2,2,1)$.

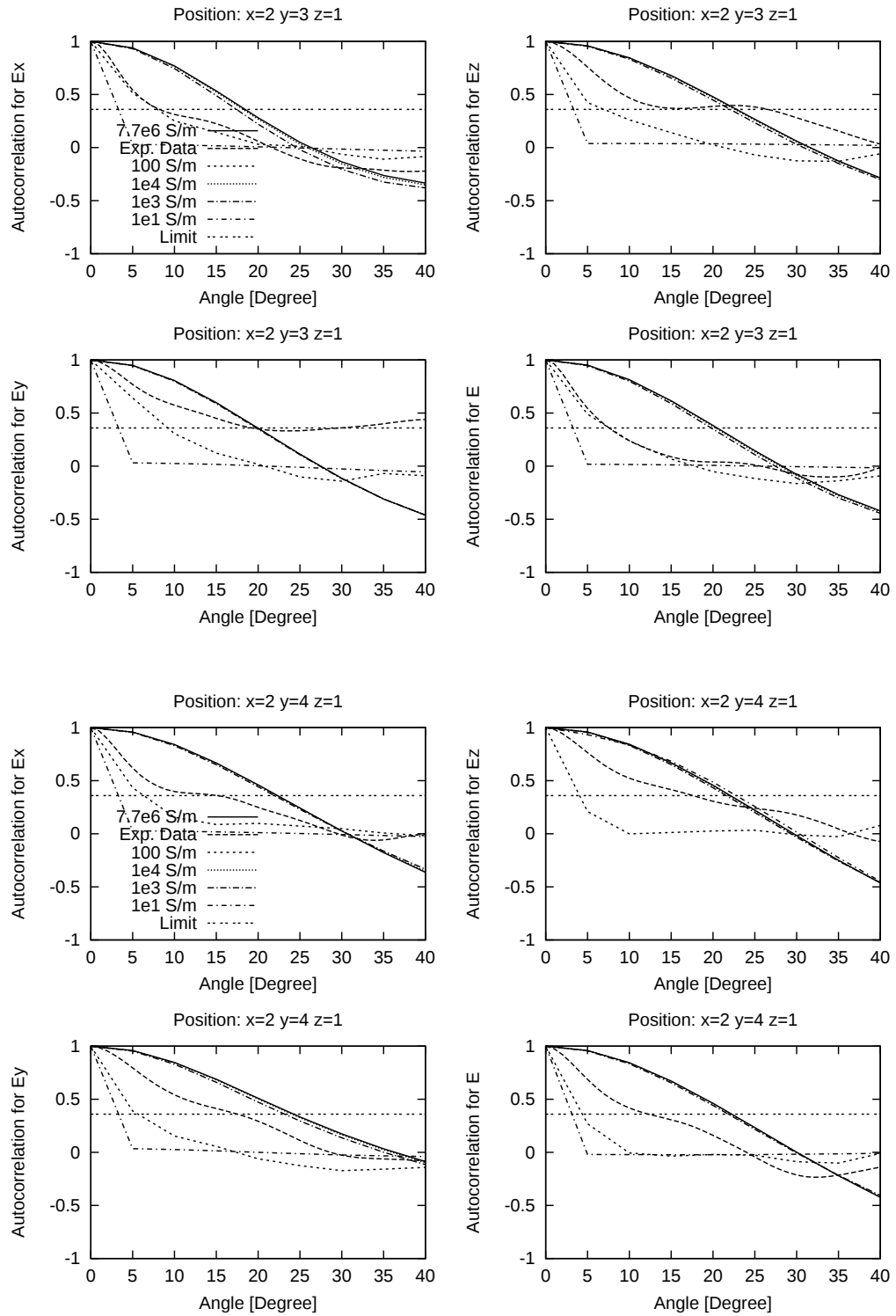


Abbildung 7: Autokorrelationsfunktion für die Position (2,3,1) und (2,4,1).

6 Zusammenfassung

Es wurden numerische MoM-Simulationen mit einem realistischen Modell der Magdeburger Modenverwirbelungskammer im Bereich der unteren Grenzfrequenz durchgeführt und mit Messungen sowie mit theoretischen Vorhersagen verglichen. Es zeigt sich, dass eine drastische Verringerung der Leitfähigkeit der Wände in der Simulation nötig ist, um sinnvolle Ergebnisse zu erhalten. Bei einer zu starken Reduzierung der Leitfähigkeit verliert das Modell seinen resonanten Charakter.

Bezüglich der Verteilungsfunktionen der Feldstärke kann festgestellt werden, dass sowohl Messung als auch Simulation deutliche Abweichungen von den theoretischen Vorhersagen zeigen. Bezogen auf die Übereinstimmung der Verteilungsfunktionen der Simulation und der Messung ergibt sich kein einheitliches Bild. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

Die Autokorrelationsfunktionen der Messergebnisse stimmen gut überein mit den Simulationen für 100 S/m. Allerdings sollten hier noch weitere Simulationen mit kleinerer Rührerschrittweite durchgeführt werden, bevor ein abschließendes Urteil gefällt werden kann.

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

Literatur

- [1] CHRISTOPOULOS, C.: *The Transmission-Line Modeling Method TLM*. IEEE/OUP series on electromagnetic wave theory. IEEE Press, 1995. ISBN 0-7803-1017-9.
- [2] http://www.tu-harburg.de/~tebr/con_home.html.
- [3] 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.
- [4] HILL, D.A.: *Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers*. IEEE Transactions on EMC, 40(3):209–217, aug 1998.
- [5] LADBURY, J., G. KOEPKE und CAMELL D.: *Evaluation of the NASA Langley Research Center Mode-Stirred Chamber Facility*. Technischer Bericht 1508, National Institute of Standards and Technology, 1999.
- [6] MILLER, E.K., L. MEDGYESI-MITSCHANG und E.H. NEWMAN (Herausgeber): *Computational Electromagnetics: frequency-Domain Method of Moments*. IEEE Press, 1992. ISBN 0-87942-276-9.
- [7] TKACHENKO, S.V., G.V. VODOPIANOV und L.M. MARTINOV: *Electromagnetic field coupling to an electrically small antenna in a rectangular cavity*. In: *13th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, 16–18 Februar 1999.