

# Experimentelle Untersuchung der Einkopplung statistischer elektromagnetischer Felder in Leitungsnetzwerke

M. Sc. Johanna Kasper, Dr.-Ing. Mathias Magdowski, Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick,  
Otto-von-Guericke-Universität, Institut für Medizintechnik  
Lehrstuhl für EMV, Magdeburg, Deutschland, johanna.kasper@ovgu.de

## 1 Einleitung

Kommunikationsleitungen und Stromversorgungskabel sind ein wichtiger Einfallstor für gestrahlte elektromagnetische Störungen in angeschlossene Geräte. Oftmals wirkt nicht nur eine einzelne Leitung als Antenne, sondern mehrere Leitungen bilden zusammen ein entsprechendes Leitungsnetzwerk. Zur Berechnung der Einkopplung eines einfallenden Feldes auf ein Leitungsnetzwerk kann die klassische Leitungstheorie genutzt werden. Das Feld wird dabei durch eine ebene Welle mit einer bestimmten Einfallrichtung und Polarisation angenähert. Durch die Überlagerung vieler ebener Wellen mit beliebigen Einfallrichtungen und Polarisierungen lassen sich auch sogenannte statistische Felder nachbilden, wie sie z. B. in Modenverwirbelungskammern vorkommen. In diesem Beitrag soll ein vorhandenes numerisches Simulationsverfahren für Leitungsnetzwerke [2, 4] auf Basis der BLT-Gleichungen messtechnisch validiert werden.

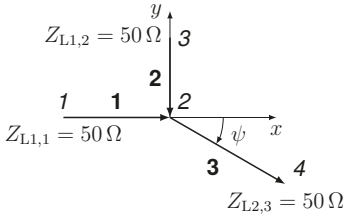
## 2 Messung

Dazu wird beispielhaft ein Netzwerk aus drei Leitungen, die in einem zentralen Knoten miteinander verbunden sind, untersucht. Dieses Netzwerk ist in Abbildung 1a dargestellt. Die einkoppelte Spannung am Ende der dritten Leitung wird für verschiedene Rührerstellungen in Abhängigkeit der Frequenz in einer Modenverwirbelungskammer (MVK) gemessen und statistisch ausgewertet. Dabei werden verschiedene Konfigurationen des Netzwerks untersucht. Die dritte Leitung wird in ihrer Länge und Ausrichtung verändert. Ebenso werden in den Messungen die Abschlusswiderstände der ersten und zweiten Leitung in Form von  $50\ \Omega$ , Kurzschluss und Leerlauf variiert.

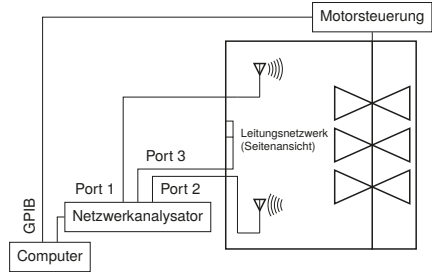
### 2.1 Messaufbau

Der entsprechende Messaufbau in einer MVK mit den Abmaßen  $7,9\text{ m} \times 6,5\text{ m} \times 3,5\text{ m}$  ist in Abbildung 1b dargestellt. Die MVK ist mit einer Sende- und einer Empfangsantenne ausgestattet, aus deren Verkopplung die Güte bestimmt werden kann. Der Modenrührer besitzt eine vertikale Drehachse. Die niedrigste nutzbare Frequenz beträgt etwa 200 MHz. Das Leitungsnetzwerk wurde an einer Wand der MVK in möglichst großem Abstand zum Rührer angebracht. Um Löcher in der Schirmwand zu vermeiden, wurde eine zusätzliche Metallplatte der Größe  $1\text{ m} \times 2\text{ m}$  verwendet, um die Einfachleitungen anzuschließen. Diese zusätzliche Metallplatte wirkt als Rückleiter der Einfachleitungen. Sie wurde möglichst dicht zu der Schirmwand aufgestellt und leitfähig mit dieser verbunden.

Abbildung 2 zeigt den tatsächlichen Versuchsaufbau in der MVK. Für das Leitungsnetzwerk wurde Kupferdraht mit einem kreisförmigen Querschnitt von  $A = 4\text{ mm}^2$  gewählt.



(a) Draufsicht des untersuchten Netzwerks (fette Ziffern bezeichnen die Leitungen und kursive Ziffern die Knoten)



(b) Messung der Einkopplung in die Leitung

Abbildung 1: Schematischer Messaufbau in einer Modenverwirbelungskammer

An die Enden der Leitungen wurden Anschlussstifte von N-Steckern angelötet. Damit die Leitungen nicht durchhängen, wurden diese mit Styropor abgestützt. Zum Anschluss der koaxialen Messleitungen wurden an die Leitungsenden N-Durchführungen an der Metallplatte angebracht. Diese stellen gleichzeitig einen  $50 \Omega$ -Abschlusswiderstand dar (siehe Abbildung 3a). Der Abstand  $h$  zwischen den Leitungen und der Masseebene beträgt 3 cm. Aus den Querabmessungen der Leitung ergibt sich eine charakteristische Impedanz von etwa  $238 \Omega$ .

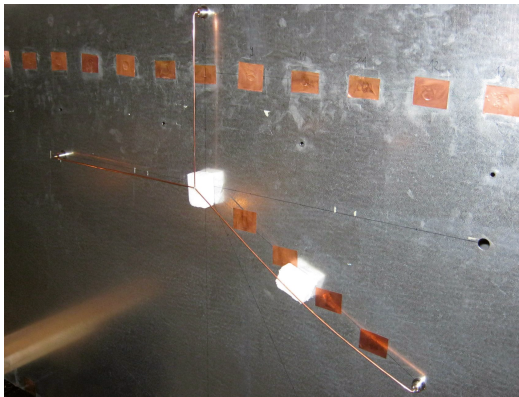
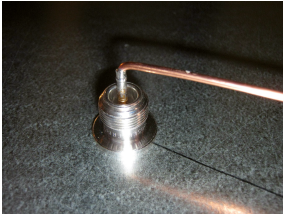


Abbildung 2: Leitungsnetzwerk über der Masseebene in der Basiskonfiguration

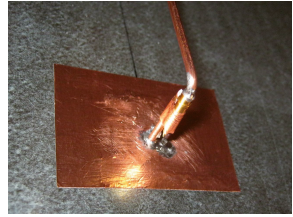
Aus der Bedingung  $kh < 1$ , wobei  $k = 2\pi/\lambda$  die Wellenzahl und  $\lambda$  die Wellenlänge darstellen, folgt eine maximale Frequenz von 1,6 GHz für die Anwendbarkeit der Leitungstheorie. Um die Kopplung zwischen der Sende-, der Empfangsantenne und dem Netzwerk zu messen, wurde ein Vektornetzwerkanalysator (VNA) genutzt. Dieser zeichnet sich gegenüber einem Oszilloskop durch eine höhere Dynamik- und einen weiteren nutzbaren Frequenzbereich aus. Außerdem können mit einem Netzwerkanalysator sowohl die Amplitude als auch die Phase direkt gemessen werden. Allerdings müssen die gemessenen Streuparameter anschließend in die eingekoppelte Spannung umgerechnet werden.



(a) 50  $\Omega$ -Abschlusswiderstand der Leitungen



(b) leerlaufendes Leitungsende



(c) kurzgeschlossenes Leitungsende

Abbildung 3: Messaufbau in der Modenverwirbelungskammer

Die x- und y-Koordinaten an den Anfängen und Enden der drei Leitungen betragen

$$[x_1] = [-40 \text{ cm} \ 0 \ 0] \quad [x_2] = [0 \ 0 \ l_3 \cdot \cos(-\psi)] , \quad (1a)$$

$$[y_1] = [0 \ 30 \text{ cm} \ 0] \quad [y_2] = [0 \ 0 \ l_3 \cdot \sin(-\psi)] . \quad (1b)$$

In der Basiskonfiguration beträgt die Länge der dritten Leitung  $l_3 = 50 \text{ cm}$  und der Winkel  $\psi = 30^\circ$ . In den Messungen wurden sowohl die Länge  $l_3$  als auch der Winkel  $\psi$  variiert. Ebenso wurden die Abschlusswiderstände am Anfang der ersten und zweiten Leitung in folgenden Varianten verändert:

- a) Leerlauf an Leitung 1, Kurzschluss an Leitung 2 ( $Z_{L1,1} \mapsto \infty, Z_{L1,2} = 0$ )
- b) Kurzschluss an Leitung 1, Leerlauf an Leitung 2 ( $Z_{L1,1} = 0, Z_{L1,2} \mapsto \infty$ )
- c) Leerlauf an Leitung 1, Leerlauf an Leitung 2 ( $Z_{L1,1} = Z_{L1,2} \mapsto \infty$ )
- d) Kurzschluss an Leitung 1, Kurzschluss an Leitung 2 ( $Z_{L1,1} = Z_{L1,2} = 0$ )

Für einen Kurzschluss wurden die Leitungsenden auf leitfähiges Klebeband gelötet, das mit der Massefläche verbunden wurde (siehe Abbildung 3c). Im Leerlauf fall wurde das Leitungsende gegenüber der Massefläche isoliert und mit einem Styroporquader fixiert (siehe Abbildung 3b). Diese Abschlüsse wurden gewählt, da bei einer solchen Fehlanpassung starke Leitungsresonanzen zu erwarten sind. Ein angepasster Abschluss, bei dem praktisch keine Resonanzen auftreten, ist ebenso wünschenswert, jedoch über einen weiten Frequenzbereich nur mit Mühe zu realisieren.

## 2.2 Messablauf

Um den Einfluss der langen Messkabel und Adapter zu kompensieren, wurde zu Beginn der Messungen eine Kalibrierung durchgeführt. Die Einkopplung wurde bei 72 äquidistanten Rührerstellungen von  $0^\circ$  bis  $355^\circ$  in Schritten von  $5^\circ$  gemessen. Für jede Rührerposition wurden 5001 Frequenzen von 200 MHz bis 1 GHz aufgenommen. Die untere Frequenz wird durch die niedrigste nutzbare Frequenz der Kammer vorgegeben und die obere durch die Verwendung der klassischen Leitungstheorie begrenzt. Dieser Messablauf wurde für verschiedene Winkel, Längen und Abschlusswiderstände wiederholt.

### 3 Messergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Statistische Auswertung der eingekoppelten Spannung als Funktion der Frequenz

Zur Umrechnung der gemessenen Streuparameter in die eingekoppelte Spannung wird die Güte der MVK benötigt. Sie errechnet sich aus der Kopplung zweier Antennen [3]

$$Q = 16\pi^2 \frac{V}{\lambda^3 \eta_{tx} \eta_{rx}} \left\langle \frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2} \right\rangle, \quad (2)$$

wobei der Wirkungsgrad der Antennen mit  $\eta_{tx} = \eta_{rx} = 1$  approximiert wird. Um die statistische Unsicherheit durch zwei Einzelmessungen zu verringern, wird die Messung direkt mit einem Viertornetzwerkanalysator durchgeführt. Die Streuparameter können mit Hilfe der gekoppelten Leistung  $P_3$  an Port 3 und der Eingangsimpedanz  $Z_{VNA} = 50 \Omega$  des Netzwerkanalysators in die eingekoppelte Spannung umgerechnet werden.

$$P_3 = \frac{|U|^2}{Z_{VNA}} \quad (3)$$

Die elektrische Feldstärke steht im Zusammenhang mit der Leistung  $P_1$  an Port 1, der Güte  $Q$  der MVK, dem Kammervolumen  $V$  und der Kreisfrequenz  $\omega$  [1, Gl. (23)].

$$E_0^2 = \frac{QP_1}{\omega \varepsilon V} \quad (4)$$

Das Verhältnis der Leistungen an Port 1 und 3 kann mittels der Streuparameter ausgedrückt werden. Einsetzen von (3) und (4) ergibt

$$\frac{P_3}{P_1} = \frac{|S_{31}|^2}{1 - |S_{11}|^2} = \frac{|U|^2}{E_0^2} \cdot \frac{Q}{\omega \varepsilon V Z_{VNA}}. \quad (5)$$

Mit (2) und ein paar weiteren Vereinfachungen kann nun das Verhältnis

$$\frac{|U|}{E_0 h} = S_{31} \cdot \frac{\lambda}{h} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon Z_{VNA} c}{8\pi \langle |S_{21}|^2 \rangle}} \quad (6)$$

bestimmt werden. Dabei bezeichnet  $c$  die Lichtgeschwindigkeit. Durch die Normierung der Spannung auf die Kammerkonstante  $E_0$  und den Abstand  $h$  der Leitung zur leitfähigen Ebene erhält man eine dimensionslose Größe zum besseren Vergleich der Ergebnisse. Diese hängt nur noch von der Konfiguration des Netzwerks und nicht mehr von der Feldstärke und der Höhe des Leitungsnetzwerks über der Masseebene ab.

#### 3.2 Diskussion und Vergleich der Ergebnisse

In den Abbildungen 4 bis 7 sind die mittleren Beträge der normierten eingekoppelten Spannung für die verschiedenen Konfigurationen dargestellt. Die jeweiligen Simulationsergebnisse wurden mit 360 Randbedingungen aus je 10 überlagerten Wellen erzeugt.



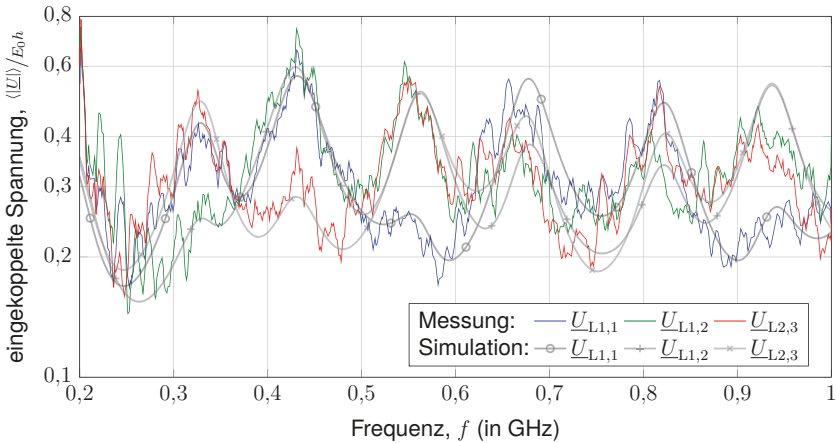


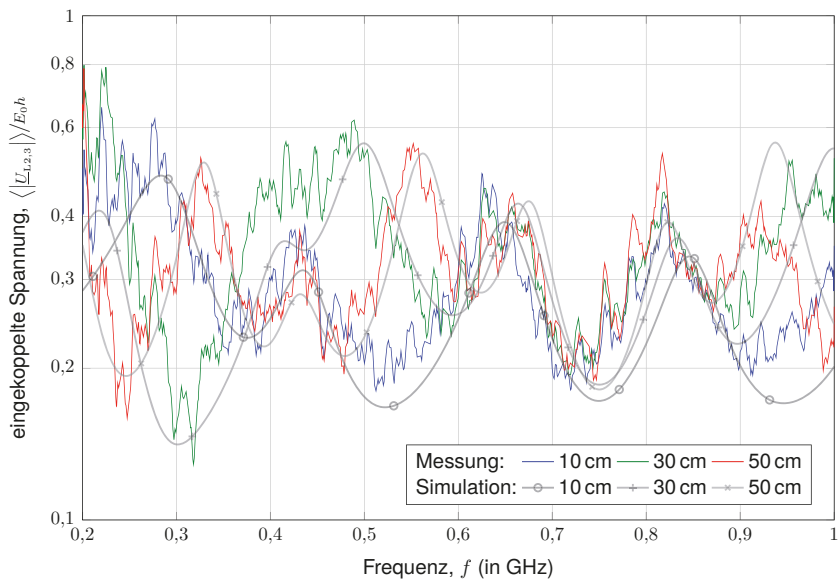
Abbildung 4: Mittlerer Betrag der eingekoppelten Spannung an den drei Leitungsenden für die Basiskonfiguration des Netzwerks

Zunächst wird die Basiskonfiguration des Netzwerks untersucht. In Abbildung 4 ist der normierte Mittelwert des Betrags der gemessenen Spannungen über der Frequenz dargestellt. Die gemessenen und simulierten Verläufe zeigen eine gute Übereinstimmung. Bei tiefen Frequenzen ist die Übereinstimmung der Resonanzfrequenzen sehr gut. Bei hohen Frequenzen ergeben sich gewisse Abweichungen, die durch die Vernachlässigung der Aufstiege an den Leitungsenden und der damit verbundenen Abstrahlverluste der Leitung in der Simulation verursacht werden. Um das statistische Rauschen der Messung zu mindern, wird ein gleitender Mittelwert über jeweils 50 Frequenzen berechnet.

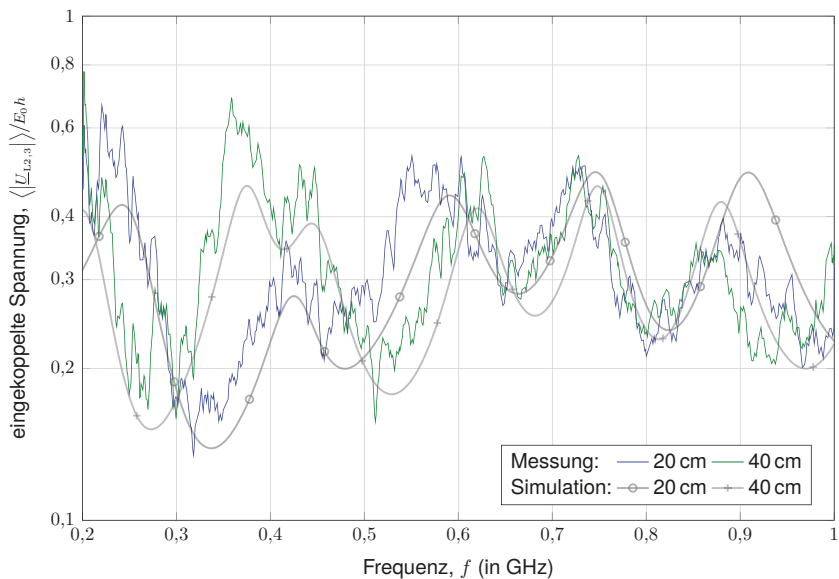
Die Messungen bei verschiedenen Längen der dritten Leitung sind in Abbildung 5 dargestellt und zeigen eine ähnlich gute Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. Die gemessenen Leitungsresonanzen stimmen mit den zu erwartenden Resonanzfrequenzen des Netzwerks überein, bei denen die Leitungslänge ein Vielfaches der halben Wellenlänge ist (z. B. im Fall von  $l_3 = 30$  cm die Frequenzen 500 MHz und 1000 MHz für die 30 cm lange Leitung  $l_3$ , die Frequenzen 214 MHz, 428 MHz, 642 MHz und 857 MHz für die 70 cm lange Kombination aus  $l_1 + l_3$  und die Frequenzen 500 MHz und 1000 MHz für die 60 cm lange Kombination aus  $l_2 + l_3$ ).

Weiterhin wurden die Abschlüsse an den Anfängen der ersten und zweiten Leitung variiert. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt. Da auch hier in der Simulation keine Aufstiege an den Leitungsenden und keine Abstrahlungsverluste berücksichtigt wurden, können besonders bei hohen Frequenzen geringe systematische Abweichungen der Resonanzfrequenzen verzeichnet werden.

In der letzten Untersuchung wurde der Winkel der dritten Leitung variiert. Wie zu erwarten, liegen die in Abbildung 7 gezeigten Verläufe dicht beieinander, da die Länge der Leitung nicht verändert wurde und damit die Resonanzfrequenzen gleich bleiben.

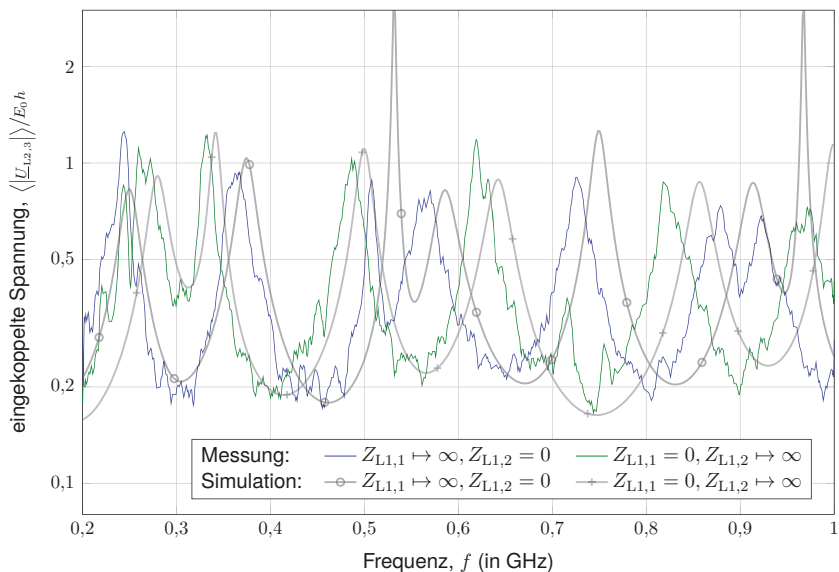


(a) 10 cm, 30 cm und 50 cm

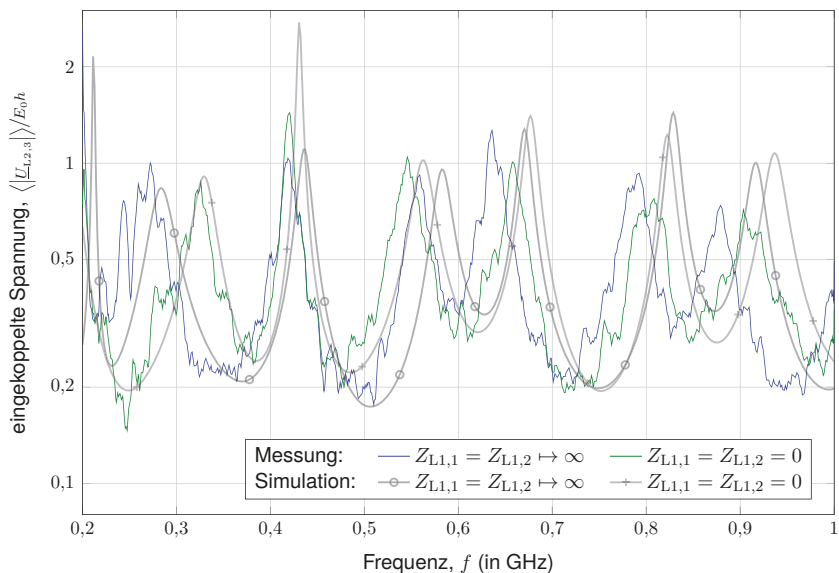


(b) 20 cm und 40 cm

Abbildung 5: Mittlerer Betrag der eingekoppelten Spannung  $\underline{U}_{L,2,3}$  am Ende der dritten Leitung des Netzwerks für unterschiedliche Längen  $l_3$  dieser Leitung



(a) Leerlauf-Kurzschluss oder Kurzschluss-Leerlauf



(b) Leerlauf-Leerlauf oder Kurzschluss-Kurzschluss

Abbildung 6: Mittlerer Betrag der eingekoppelten Spannung  $U_{L,2,3}$  am Ende der dritten Leitung für unterschiedliche Abschlusswiderstände am Anfang der Leitungen 1 und 2 des Netzwerks

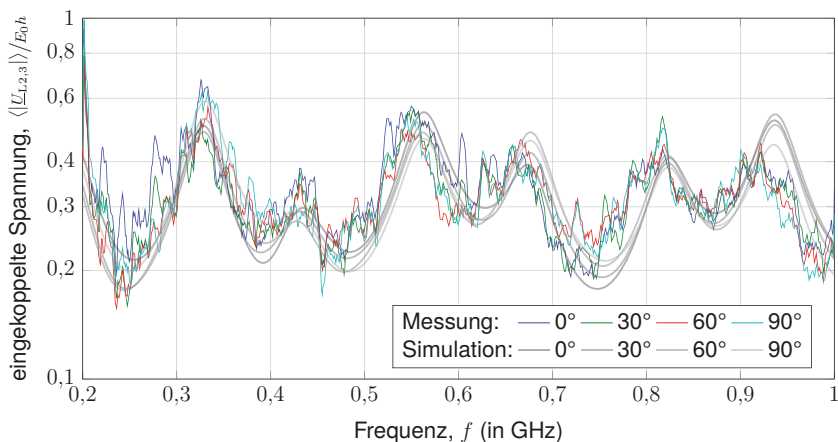


Abbildung 7: Mittlerer Betrag der eingekoppelten Spannung  $\langle U_{1,2,3} \rangle$  am Ende der dritten Leitung des Netzwerks für unterschiedliche Winkel  $\psi$  dieser Leitung

#### 4 Zusammenfassung

Die Einkopplung statistischer elektromagnetischer Felder in ein Leitungsnetzwerk wurde messtechnisch in einer Modenverwirbelungskammer untersucht. Die eingekoppelte Spannung wurde als Funktion der Frequenz aufgenommen und über mehrere Rührerpositionen ausgewertet. Die Messergebnisse wurden mit Simulationsergebnissen verglichen und weisen eine gute Übereinstimmung auf. Die Ergebnisse bestätigen damit ein vorhandenes Simulationsmodell auf Basis der klassischen Leitungstheorie. Geplante Untersuchungen umfassen die Einkopplung in Netzwerke aus Doppel- und Mehrfachleitungen.

#### Literatur

- [1] HILL, David A.: Plane Wave Integral Representation for Fields in Reverberation Chambers. In: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 40 (1998), August, Nr. 3, S. 209 – 217. <http://dx.doi.org/10.1109/15.709418>. – DOI 10.1109/15.709418. – ISSN 0018–9375
- [2] MAGDOWSKI, Mathias ; VICK, Ralf: Numerical Simulation of the Stochastic Electromagnetic Field Coupling to Transmission Line Networks. In: *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*. Dresden, August 2015. – ISBN 978–1–4799–6615–8, S. 818–823. – IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB
- [3] MITRA, Atindra K. ; TROST, Thomas F.: Power transfer characteristics of a microwave reverberation chamber. In: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 38 (1996), Mai, Nr. 2, S. 197–200. <http://dx.doi.org/10.1109/15.494624>. – DOI 10.1109/15.494624. – ISSN 0018–9375
- [4] PEREZ, Reinaldo (Hrsg.): *Handbook of Electromagnetic Compatibility*. 1. London : Academic Press, 1995. – ISBN 0–12–550710–0