

Auswirkung absorbierender Materialien auf die Verkopplung von Komponenten innerhalb eines PC-Gehäuses

Alexander Vogt, Heinz-D. Brüns, Christian Schuster
Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Theoretische Elektrotechnik

1 Einleitung

In diesem Beitrag wird mit Hilfe von Messungen und Simulationen die Verkopplung von Bauteilen in einem PC-Gehäuse untersucht. Dazu werden die wichtigsten Komponenten eines üblichen Bürorechners modellhaft in einer eigens gefertigten Kavität platziert. Die Abmaße der Kavität entsprechen einem typischen PC-Gehäuse mit Mainboard im Mini-ITX-Formfaktor. Spezielles Augenmerk wurde beim Design auf die Reproduzierbarkeit der Messungen und die Validierung der Messumgebung gelegt. Die internen Komponenten wurden vereinfacht, um sie in Simulationen modellieren zu können. Die Messungen mit einem 12-Tor-Vektornetzwerkanalysator (VNA) zeigen im Frequenzbereich bis 6 GHz eine sehr gute Übereinstimmung mit Simulationsergebnissen, die mit der Momentenmethode (MoM) [1] erzielt wurden. Die Auswirkung der Komponenten auf das Resonanzverhalten im Gehäuse wird mit Hilfe von elektrisch kleinen Feldsonden analysiert. Verschiedene absorbierende Materialien werden in das Gehäuse eingebracht, um die auftretenden Resonanzen zu bedämpfen. Die Wirksamkeit der verschiedenen Materialien wird diskutiert und verglichen.

2 Aufbau und Validierung

Wie in Abb. 1 dargestellt, wird für die Analyse der Komponenten und der absorbierenden Materialien im Folgenden ein Mini-ITX-Gehäuse mit den Abmaßen 20×20×20 cm genutzt. In [2] konnte gezeigt werden, dass die Abweichungen der Messergebnisse zwischen den realen Komponenten und ihren so vereinfachten Modellen gering sind. Da die kanonischen Strukturen die Simulationsaufbauten erheblich vereinfachen und die benötigten Rechenzeiten drastisch senken, werden auch hier die Modelle verwendet. Bei den nachgebildeten PC-Komponenten handelt es sich um ein Motherboard sowie zwei RAM-Speichermodule aus zweilagigen Leiterplatten mit den Dimensionen ihrer realen Gegenstücke. Zudem wird der Kühlkörper des Hauptprozessors (CPU) durch eine Aluminium-Box modelliert. Die Komponenten werden mit Hilfe von Abstandshaltern aus Polystyrol im Gehäuse platziert. Diese Abstandshalter werden aus Platten mit definierter Dicke geschnitten, um eine Reproduzierbarkeit der Messungen zu ermöglichen. Die Dimensionen der Komponenten und ihre Lage im PC-Gehäuse können den Abbildungen 2a und 2b entnommen werden.

Das PC-Gehäuse wird zunächst ohne Innenleben und mit einer Frontplatte ohne Aperturen analysiert. Dies hat den Vorteil, dass eine analytische Lösung existiert, gegen die der Messaufbau validiert werden kann. Hierzu werden zwölf Monopol-

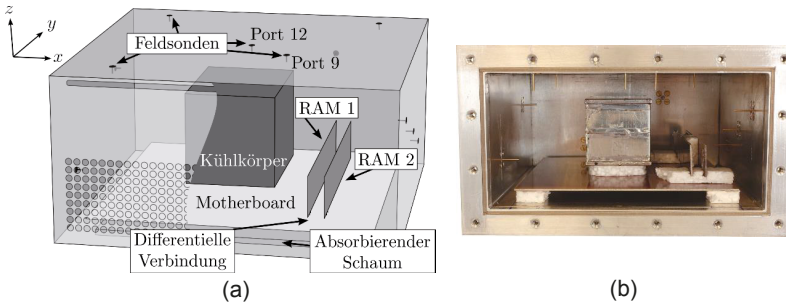


Abbildung 1: Vereinfachtes Modell eines PC Gehäuses: a) Simulationsaufbau und b) Messaufbau. Zwei RAM Module sind mit einem Mini-ITX-Motherboard verbunden. Die CPU ist als Spannungsquelle modelliert, die einen Kühlkörper gegen das Motherboard treibt. Auf der Bodenplatte ist eine absorbierende Matte eingebracht. Die Abmaße und Positionierungen können der Abb. 2 entnommen werden, die Koordinaten der Feldsonden finden sich in Tabelle 1.

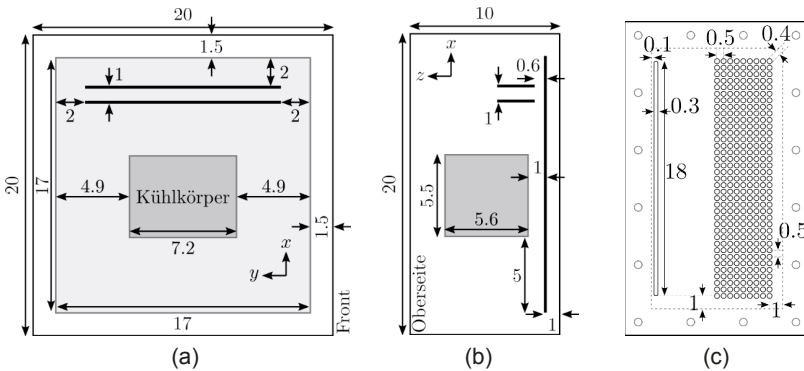


Abbildung 2: Schematische Darstellung des PC Gehäuses mit Innenleben: a) Aufsicht und b) Seitenansichten. Die Frontplatte ist in c) gegeben. Alle Einheiten sind in cm.

antennen an den Innenwänden der Kavität platziert und ihre Verkopplung mit einem 12-Tor-VNA bestimmt und mit der MoM simuliert. Wie in [2] beschrieben, muss die Speisestelle der Monopolantennen durch ein Deembedding aus der Messung herausgerechnet werden. Zu Vergleichszwecken wird zunächst die Verkopplung der beiden nächstgelegenen Feldsonden an den Ports 9 und 12 betrachtet. Wie in Abb. 3a zu sehen, ist die Übereinstimmung zwischen der Messung, den Simulationsergebnissen und der analytischen Lösung [3] über dem untersuchten Frequenzbereich sehr gut. In der analytischen Lösung wird eine sinusförmige Stromverteilung auf den Monopolantennen angenommen. Diese Annahme trifft jedoch bei höheren Frequenzen nicht mehr zu, was zu Abweichungen der Koppeltermine im Vergleich zu Simulation und Messung führt.

Abbildung 3b zeigt die Streuparameter $S_{9,12}$ für den Fall des Gehäuses mit den vereinfachten Komponenten. Wie im Fall der leeren Kavität lässt sich eine gute Korrelation zwischen Mess- und Simulationsergebnissen feststellen. Wie erwartet, erhöht die Gegenwart der metallischen Komponenten die Anzahl der Resonanzen im Gehäuse.

Tabelle 1: Koordinaten (in cm) der zwölf Ports in Abb. 1. Die Indizes beschreiben die linke (l), rechte (r), obere (o) bzw. hintere (h) Wand.

Port	x	y	z	Port	x	y	z
P_1^r	20,0	5,0	7,0	P_7^r	0,0	5,0	3,0
P_2^r	20,0	10,0	5,0	P_8^t	3,0	3,0	10,0
P_3^r	20,0	15,0	3,0	P_9^o	12,5	7,5	10,0
P_4^h	14,0	20,0	7,5	P_{10}^o	17,0	18,0	10,0
P_5^h	6,0	20,0	2,5	P_{11}^o	3,0	18,0	10,0
P_6^l	0,0	15,0	7,0	P_{12}^o	10,0	10,0	10,0

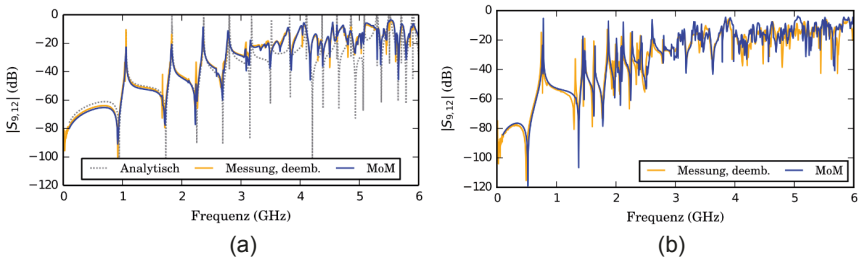


Abbildung 3: Vergleich der Verkopplung der zwei nächstgelegenen Ports 9 und 12. Die analytische und die numerische Lösung sind in sehr guter Übereinstimmung: a) leere Kavität und b) Kavität mit Ersatz-Komponenten.

3 Statistische Auswertung der Messergebnisse

Die oben gezeigten Kurven zeigen, dass der Messaufbau gut geeignet ist, um die Verkopplung der Monopulantennen und den Einfluss der internen Komponenten zu messen. Da jedoch eine Analyse der einzelnen Streuparameter auf Grund der hohen Zahl der Feldsonden sehr zeitaufwändig ist, wird im Folgenden eine statistische Auswertung gewählt. In [2] wurde vorgeschlagen, an jedem gemessenen bzw. simulierten Frequenzpunkt die Perzentilen aller unabhängigen Koppelterme zu betrachten. Die p -Quantile $Q_X(p)$ einer kumulativen Verteilungsfunktion F_X der Variablen X kann wie folgt beschrieben werden [4]:

$$Q_X(p) = \inf\{x \in \mathbb{R} \mid F_X(x) \geq p\}, \text{ mit } p \in (0,1). \quad (1)$$

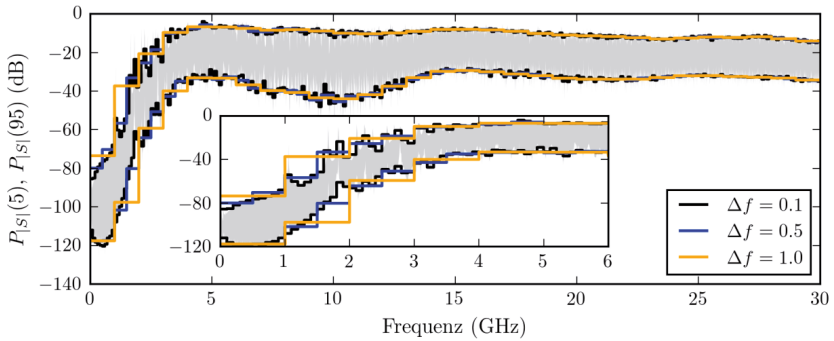


Abbildung 4: Die 5%- und 95% Perzentile der Koppeltermine in der leeren Box ausgewertet mit verschiedenen Binbreiten und für einzelne Frequenzen (grau).

Die zugehörigen Perzentilen ergeben sich zu $P_X(p) = Q_X(p/100)$. In diesem Beitrag werden die unabhängigen Koppeltermine $S_{x,y}$ mit $x \neq y$ zur Bestimmung der Verteilungsfunktion herangezogen. Diese Art der Auswertung ist für die Analyse der Reduktion des Übersprechens nur bedingt geeignet, da sie eine identische Frequenzabtastung der Messungen bzw. Simulationen voraussetzt. Zudem ist der Frequenzverlauf auf Grund der hohen Güte der Kavität stark "verrauscht". Um eine größere Datenbasis für die Bestimmung der Perzentilen zu erhalten, wird der Ansatz im Folgenden um ein Frequenz-Binzing erweitert, und die statistische Auswertung auf alle Messdaten in einem Frequenzbereich der Breite Δf angewandt. Eine größere Breite führt in diesem Ansatz zu einem insgesamt glatteren Kurvenverlauf, der Frequenzverlauf kann aber auch nicht mehr im Detail nachgebildet werden. Zur Bestimmung der zu wählenden Bandbreite wird im Folgenden die Messung am leeren Gehäuse aus Abb. 1 bis 30 GHz herangezogen. Da die für eine statistische Auswertung benötigte geringe Korrelation der Streuparameter streng genommen erst im Falle einer übermodeten Kavität auftreten, sind die so gewonnen Daten erst ab ca. 2-3 GHz aussagekräftig.

In Abb. 4 wird die Breite der Bins variiert und die sich ergebenden Perzentilen gegen die original Messdaten in grau verglichen. Es zeigt sich, dass eine Breite von $\Delta f = 0.5$ GHz ausreicht, um den Kurvenverlauf gut zu approximieren und gleichzeitig einen glatten Kurvenverlauf zu erhalten. Die gewählte Breite entspricht etwa 250 Frequenzpunkten pro Bin.

4 Absorbierende Materialien

Mit dem oben entwickelten Ansatz lässt sich der Einfluss absorbierender Materialien auf die gemessenen Koppeltermine gut charakterisieren. Hierzu wird die Reduktion der Verkopplung im Vergleich zur leeren Kavität wie folgt definiert:

$$P_{|S|}^{leer}(p) / P_{|S|}^{DUT}(p), \quad (2)$$

wobei *DUT* („Device Under Test“) die Versuchsanordnung mit den absorbierenden Materialien beschreibt. Für die folgende Analyse der absorbierenden Materialien werden die 95 % Perzentilen ($p = 95$) gewählt. Für die Analyse stehen drei verschiedene Arten von kommerziell erhältlichen Absorbermatten mit

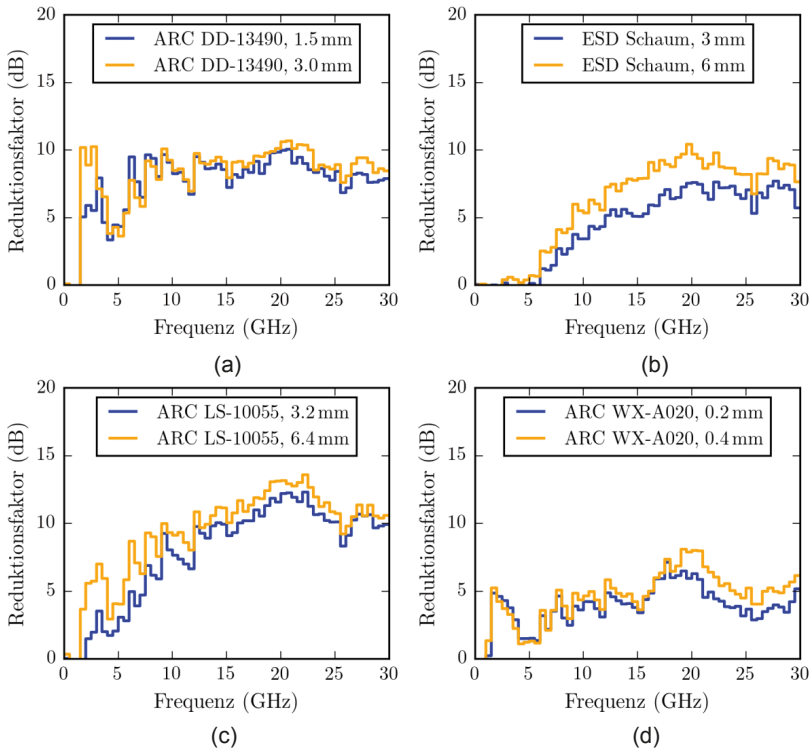


Abbildung 5: Reduktion der Verkopplung der Feldsonden in der Kavität in Präsenz verschiedener Absorbermatten. Konfigurationen mit einer oder zwei Matten wurden gewählt, die Gesamtdicke des Materials ist angegeben.

unterschiedlichen Verlustmechanismen zur Verfügung. Darunter befinden sich breitbandige Schäume (z.B. ARC LS-10055 [5]) mit primär dielektrischen Verlusten [6], sowie Matten mit magnetischen Verlusten (z.B. ARC WX-A020 [7]). Materialien wie Silikonharze (z.B. ARC DD-13490 [8]) weisen sowohl dielektrische, als auch magnetische Verluste auf.

Wie in Abb. 1a dargestellt, werden die Absorbermatten zentriert auf der Bodenplatte der Kavität positioniert. Um eine Verfälschung der Messergebnisse auf Grund der

internen Komponenten auszuschließen, wird die Messserie mit dem ansonsten leeren Gehäuse durchgeführt. Wiederum werden die Koppelterme gemessen, die Speisestellen der Feldsonden herausgerechnet („deembedded“) und eine Auswertung der Messdaten mit Hilfe der 95% Perzentilen in Frequenzbins der Breite $\Delta f = 0.5$ GHz durchgeführt.

Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abb. 5 für die oben genannten Materialien sowie einen ableitfähigen Schaum zum Schutz vor Elektrostatische Entladung („Electrostatic Discharge“, ESD) dargestellt. Es sind deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialien zu erkennen. Aus den Messdaten ergibt sich, dass im gewählten Messaufbau der Breitbandschaum zur höchsten Dämpfung führt. Insgesamt lässt sich feststellen, dass mit zunehmender Frequenz die Dämpfungsrate zunimmt. Eine Verdoppelung der Schichtdicke durch Platzieren einer zweiten, identischen Dämpfmatte auf der ersten führt nicht zu einer weiteren Reduktion von 3dB. Interessant ist auch der Vergleich zum ESD-Schaum in Abb. 5d. Obwohl dieser deutlich kostengünstiger ist als die kommerziellen Absorbermatten, zeigt er gerade im höheren Frequenzbereich durchaus vergleichbare Dämpfungseigenschaften auf.

5 Einfluss auf die Verkopplung interner Komponenten

Im Gegensatz zur Verkopplung der Feldsonden an den Gehäusewänden lässt sich der Einfluss der absorbierenden Materialien auf die Verkopplung interner Komponenten messtechnisch nur sehr schwer zu bestimmen. Daher werden die folgenden Untersuchungen mittels Simulationen auf Basis der Momentenmethode durchgeführt. Als absorbierendes Material wurde der Breitbandschaum ARC LS-10055 [5] gewählt, der wie oben gezeigt, zur größten Reduktion der Verkopplung führt. Um die Simulationen bei Frequenzen bis 6 GHz durchführen zu können, sind schnelle Löseverfahren notwendig. Die hohe Güte der PC-Gehäuse führt zu Konvergenzproblemen bei iterativen Löseverfahren, daher wurde ein direktes Verfahren auf Grundlagen der hierarchischen (\mathcal{H} -) Matrizen [9] gewählt. Die komplexen Materialparameter des Schaums wurden [6] entnommen.

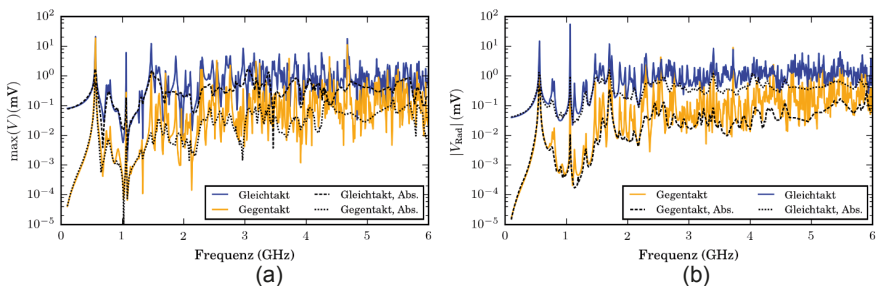


Abbildung 6: Maximale Spannung gemessen a) an den Feldsonden und b) am Kühlkörper der CPU (Simulationsergebnisse). Wie erwartet zeigen sich höhere Spannungen bei Gleichtaktanregung (+1mV) als bei Gegentaktanregung (+/-1mV). Wird ein Absorber in das Gehäuse eingebracht, reduziert sich das Rauschlevel in allen Fällen

Typischerweise weisen reale PC-Gehäuse Lüftungsgitter und Schlitze auf, die durch Komponenten wie optische Laufwerke oder durch Fertigungstoleranzen zwischen den Blechen der Kavität entstehen. Um diese besser abzubilden, wurde eine Frontplatte nach Abb. 2c an die Kavität angebracht. Als Anregung wurde der differentielle Anschluss zwischen dem linken Speicherriegel in Abb. 1 (RAM 1) und dem Motherboard gewählt, an dem zwei Spannungsgeneratoren mit ± 1 mV geschaltet wurden. Je nach Ansteuerung können so die Auswirkung einer Gleich- und Gegentaktanregung untersucht werden. Im ersten Schritt werden die Fußpunktspannungen an den Feldsonden bestimmt. Die maximale Spannung zu jedem Frequenzpunkt ist in Abb. 6a geplottet. Wie erwartet, ist das Niveau der Feldstärken in der Kavität im Gegentaktfall deutlich niedriger als im Gleichtaktfall. Im zweiten Schritt wird nun die Einkopplung der vom Speichermodul abgestrahlten Felder in die Verbindung zwischen dem Kühlkörper und der Hauptplatine berechnet. Da an dieser Stelle üblicherweise die CPU sitzt, ist die Untersuchung der Störeinkopplung dort besonders interessant. Aus dem Plot in Abb. 6b wird deutlich, dass wiederum die Gleichaktanregung zu einer größeren Einkopplung führt. Wird nun das absorbierende Material in das Gehäuse eingebracht, kann das Niveau der Einkopplung in allen Fällen teilweise deutlich reduziert werden. Dies ist insbesondere deshalb beachtlich, da auf Grund der Feldsonden die Absorbermatten nur unterhalb der Hauptplatine platziert werden konnten. Im letzten Schritt werden nun Messung und Simulation verglichen. Da eine direkte Messung der Verkopplung des Speichermoduls und der CPU nicht möglich ist, wird wie in [2] vorgeschlagen die charakteristische Kopplung aus den Messdaten der Feldsonden bestimmt. In Abb. 7 wird das resultierende Konfidenzintervall zwischen der 5% und der 95% Perzentile gegen die simulierten Koppelterme verglichen. In beiden Fällen ist der volle Aufbau aus Abb. 1 betrachtet worden.

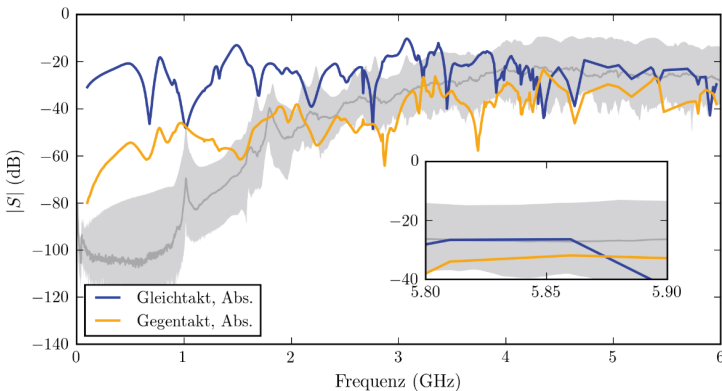


Abbildung 7: Vergleich der messtechnisch bestimmten Verkopplung der Feldsonden (grau) und der mittels Simulation bestimmten Interaktion zwischen Speichermodul und CPU (farbig) in Anwesenheit einer Absorbermatte. Im übermodeten Fall (ab 2-3 GHz) liefert die charakteristische Verkopplung zuverlässige Ergebnisse.

Es wird deutlich, dass die Messung und das in [2] vorgeschlagene Verfahren schnelle und zuverlässige Ergebnisse liefert, um die Kopplung interner Komponenten in metallischen Gehäusen durch Feldsonden an den Wänden zu charakterisieren. Wie gezeigt wurde, kann das Verfahren auch zur Abschätzung des Einflusses absorbierender Materialien genutzt werden.

6 Fazit

Ein Messaufbau wurde eingeführt, der es ermöglicht, schnell die Auswirkung von Komponenten in einem Metallgehäuse zu analysieren. Es wurde gezeigt, dass mit Hilfe von absorbierenden Materialien das Übersprechen erheblich reduziert werden kann. Der Aufbau lässt sich gut modellieren und mit Hilfe der Momentenmethode effizient simulieren. Damit eignet er sich hervorragend für die schnelle Evaluation von EMV-Maßnahmen in metallischen Gehäusen. Zudem wurde das Verfahren erweitert, um quantitative Aussagen über die Reduktion der Interaktion interner Strukturen durch absorbierende Materialien treffen zu können.

Literatur

[1] Technische Universität Hamburg-Harburg. The CONCEPT-II website. [Online]. Available: <http://www.tet.tu-harburg.de/concept/>

[2] A. Vogt, H.-D. Brüns, Q. Wu, F. Gronwald, and C. Schuster, "A measurement setup for quantification of electromagnetic interference in metallic casings," Accepted for Publication at IEEE Trans. Electrom. Compat., Mar. 2015.

[3] F. Gronwald, "Antenna theory in resonating systems derived from fundamental electromagnetism," Habilitation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2006.

[4] H.-O. Georgii, Stochastik: Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik, 4th ed., Berlin, Germany: de Gruyter, 2009.

[5] ARC Technologies, Inc., "Technical data sheet, LS-10055," [Online]. Available: <http://www.arc-tech.com> (visited on Dec. 23, 2014).

[6] N. Rahman, A. Sharma, and M. N. Afsar, "Characterization, design and optimization of low-profile cavities for UWB spiral antennas," Int. J. Electromagn. Appl., vol. 2, no. 3, pp. 16–23, Aug. 2012.

[7] ARC Technologies, Inc., "Technical data sheet, WX-A series," [Online]. Available: <http://www.arc-tech.com> (visited on Dec. 23, 2014).

[8] —, "Technical data sheet, DD-13490," [Online]. Available: <http://www.arc-tech.com> (visited on Dec. 23, 2014).

[9] A. Vogt, T. Reuschel, H.-D. Brüns, S. Le Borne, and C. Schuster, "On the treatment of arbitrary boundary conditions for a fast direct H-matrix solver in MoM," Submitted to IEEE Trans. Antennas Propag., Jan. 2015.