

Transiente Analyse von nichtlinear beladenen metallischen Gehäusen in Zeit- und Frequenzbereich

Dr.-Ing. Miroslav Kotzev, TU Hamburg-Harburg, Institut für Theoretische Elektrotechnik

Dipl.-Ing. Matthias Kreitlow, Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien – ABC Schutz, Geschäftsfeld Elektromagnetische Wirkungen und HPEM

Prof. Dr. Frank Gronwald, TU Hamburg-Harburg, Institut für Theoretische Elektrotechnik

1 Einführung

Der Einbau von elektronischen Systemen innerhalb von Metallgehäusen ist bezüglich der EMV mit Vor- und Nachteilen behaftet. Ein offensichtlicher Vorteil sind die Schirmwirkungen von Metallgehäusen, welche umschlossene elektronische Systeme vor externen elektromagnetischen Störfeldern schützen können. Andererseits können Metallgehäuse aber auch als Resonatoren wirken, so dass umschlossene elektronische Systeme möglichen Resonanzeffekten ausgesetzt sind. Das Testen der Störfestigkeit von Systemen im Resonanzbereich hat daher innerhalb der EMV schon immer eine überragende Rolle gespielt. Dabei ist es zunächst natürlich, entsprechende Tests im Frequenzbereich durchzuführen und Transferfunktionen im Frequenzbereich zu bestimmen, um dominante Resonanzeffekte identifizieren zu können. Für *lineare* Systeme kann auf Basis der Fourieranalyse durch Störfestigkeitstests im Zeitbereich die gleiche Information erhalten werden, zumindest prinzipiell. Praktische Erwägungen, wie etwa die Notwendigkeit hoher Leistungsdichten bei bestimmten Frequenzen oder das Abbilden realer Störbeeinflussungen, mögen dann den Ausschlag für entweder Frequenz- oder Zeitbereichsmessverfahren geben.

Die Durchführung und Interpretation von Störfestigkeitstests im Resonanzbereich verkompliziert sich beträchtlich, wenn *nichtlineare* elektromagnetische Effekte auftreten und in die Analyse miteinbezogen werden müssen. Anregungen, die einem eingeschwingenen Zustand entsprechen und im Frequenzbereich durch eine oder gegebenenfalls auch mehrere singuläre Frequenzen gekennzeichnet sind, generieren dann beispielsweise weitere Frequenzanteile, die sich als Konversionsprodukte klassifizieren lassen. Wird der eingeschwingene Zustand auf beliebige zeitliche Anregungen mit transienten Anteilen erweitert, treten weitere Phänomene auf, die durch nichtlineare Dynamiken zu beschreiben sind und über standardisierte Modellierungen der EMV hinausgehen. Dahingehend liegt der Schwerpunkt dieses Beitrags in der transienten Analyse von nichtlinear beladenen metallischen Gehäusen, die als Resonatoren wirken. Mit Hilfe von Zeit- und Frequenzbereichsverfahren werden Phänomene erfasst und analysiert, die durch die Einkopplung transientser elektromagnetischer Felder hervorgerufen werden.

Analytische Betrachtungen zu erwartenden Effekten können aus [1] entnommen werden. Für den Fall des eingeschwingenen Zustands sind weitere Untersuchungen

auf sowohl analytischer als auch messtechnischer Basis durchgeführt worden, siehe hierzu beispielsweise [2, 3] und die darin zitierte Literatur. Für den transienten Fall sind ähnlich umfassende analytische und messtechnische Beschreibungen wünschenswert. Der Fokus dieses Beitrages liegt auf der Bereitstellung geeigneter messtechnischer Umgebungen.

Zu Beginn wird im nächsten Abschnitt zunächst ein generisches metallisches Gehäuse mit einer speziellen nichtlinearen Beladung vorgestellt. Es werden Messergebnisse an dieser Konfiguration gezeigt, bei denen im eingeschwungenen Zustand in deutlicher Weise nichtlineare Phänomene als Systemantwort zu einer Zweiton-Anregung nachgewiesen werden können. Die Konfiguration wird anschließend im transienten Fall betrachtet, wobei zur Anregung ein genäherter doppelt-exponentieller Puls verwendet wird. Nichtlineare Effekte werden für diesen Fall sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich identifiziert.

2 Messtechnische Untersuchungen an einem generischen, nichtlinear beladenen Resonators

2.1 Charakterisierung und messtechnische Anbindung des Resonators

Als Untersuchungsobjekt zur transienten Analyse von nichtlinear beladenen metallischen Gehäusen wird ein metallischer Rechteckresonator mit den Abmessungen $0,20\text{ m} \times 0,40\text{ m} \times 0,51\text{ m}$ betrachtet. Durch diese Abmessungen und die gewählte Metallwandstärke von etwa 2 mm wird hier ein gewöhnliches Computergehäuse näherungsweise nachgebildet. Wie in Abbildung 1 zu sehen, ist eine Einkopplung von elektromagnetischen Pulsen an verschiedenen Positionen des Resonatorgehäuses mit Hilfe von Monopolantennen möglich, die an der Innenseite der Resonatorwände angebracht sind [4].

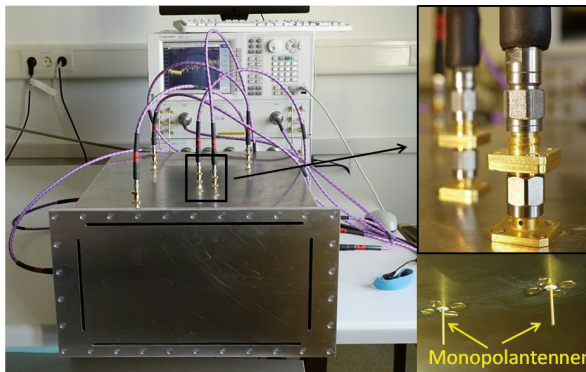


Abb. 1.: Rechteckresonator mit 12 Monopolantennen, angebracht an verschiedenen Stellen der Resonatorwände, die eine transiente Feldeinkopplung ermöglichen sollen. Die Schlitzlöcher in der vorderen Resonatorwand bieten eine Alternative für feldgebundene transiente Feldeinkopplungen.

Zusätzlich ist die Möglichkeit gegeben, elektromagnetische Felder extern durch verschiedene Aperturen in der Vorderseite des Resonators einzukoppeln. Konkret kann dies beispielsweise innerhalb einer GTEM-Zelle oder eines ähnlichen Wellenleiters erfolgen.

Zur messtechnischen Untersuchung nichtlinearer Effekte wurde als Beladung des Resonators eine rechteckige Kupferdrahtschleife der Abmessungen 5 cm x 5 cm mit einer eingelöteten Schottky-Diode als nichtlineares Bauelement verwendet. Für Vergleichsmessungen wurde eine baugleiche Drahtschleife ohne Schottky-Diode benutzt. Zur Anbindung an den Resonator wurden kleine Stifte an die Drahtenden gelötet, um diese, wie in Abbildung 2 zu sehen ist, an zwei Monopolantennen anschließen zu können.

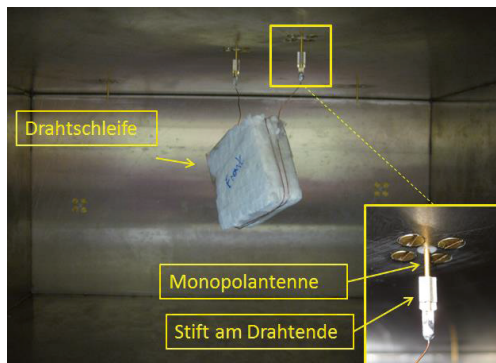


Abb. 2.: Eine Drahtschleife mit Schottky-Diode, angeschlossen an zwei benachbarte Monopolantennen innerhalb des Resonators.

2.2 Messungen im eingeschwungenen Zustand

Die Untersuchungen im eingeschwungenen Zustand beruhen in diesem Fall auf der klassischen Zweiton-Anregung, hierzu wurden zwei Frequenzgeneratoren und ein Spektrumanalysator verwendet. Der entsprechende Messaufbau ist in Abbildung 3 gezeigt, dabei ist ein Ende der Drahtschleife mit 50 Ohm abgeschlossen, indem die entsprechende Monopolantenne mit einem koaxialen Abschluss von $Z_0 = 50$ Ohm terminiert ist. In der Folge werden mögliche Reflektionen am Drahtende minimiert. Am anderen Ende der Schleife wird das Frequenzspektrum der induzierten Spannung am Ausgang der zweiten Monopolantenne mit einem Spektrumanalysator aufgenommen. Zur Zweiton-Anregung des Resonators werden zwei Signalgeneratoren an zwei weitere, nicht mit der Drahtschleife verbundene Monopolantennen angeschlossen. Um einen merklichen Intermodulationseffekt nachzuweisen, werden als Signale zwei unterschiedliche Frequenzen eingespeist, deren Frequenzdifferenz in der Nähe einer Resonatoreigenfrequenz liegt. Mathematisch ist das Zweitonssignal $a(t)$ beschrieben als

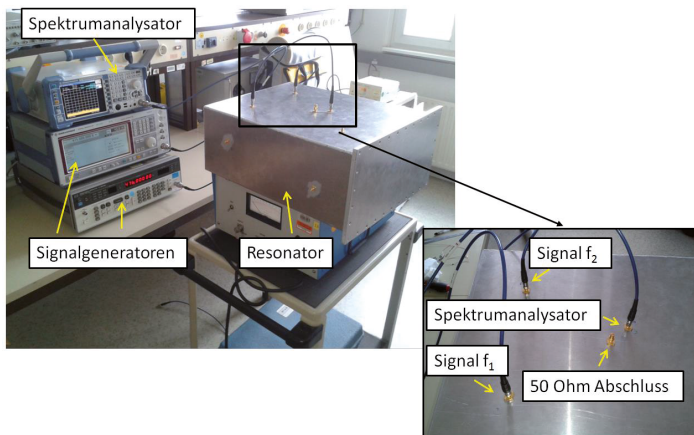


Abb. 3.: Messaufbau zur Zweitton-Anregung des nichtlinear beladenen, geschlossenen Resonators (keine Apertur in der Vorderseite). Zwei Signalgeneratoren generieren die verschiedenen Signale f_1 und f_2 . Mit einem Spektrumanalysator wird das Spektrum der induzierten Spannung an einem Ende der Drahtschleife gemessen.

$$a(t) = \hat{A}_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) + \hat{A}_2 \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2)$$

In der Antwort eines nichtlinearen Systems sollten sich Intermodulationsprodukte zweiter Ordnung bei Frequenzen $f_1 \pm f_2$, dritter Ordnung bei Frequenzen $2f_1 - f_2$ und $2f_2 - f_1$, und vierter Ordnung bei Frequenzen $3f_1 - 2f_2$ und $3f_2 - 2f_1$ ergeben [5]. Da die erste Resonanz des Resonators bei 473 MHz liegt, wurde zunächst diese Frequenzdifferenz angestrebt. Bei Messungen an der nichtlinear beladenen Drahtschleife konnte aber kein Intermodulationsprodukt bei 473 MHz nachgewiesen werden. Zur Erklärung wurde die Anpassung der Drahtschleife mit einem Vektornetzwerkanalysator untersucht und es ergab sich, dass diese ein Resonanzverhalten bei höheren Frequenzen aufweist. Daher war kein Intermodulationsprodukt bei der ersten Resonatoreigenfrequenz sichtbar, dieses war wegen der schlechten Anpassung bei 473 MHz im Rauschband des gemessenen Spektrums verborgen. Nur mit einer erhöhten Leistung des Zweitton-Signals lässt sich dieses Intermodulationsprodukt messtechnisch erfassen. In Abbildung 4 ist die Anpassung der Drahtschleife dargestellt, dort kann man sehen, dass die Drahtschleife eine erste scharfe Resonanz von -16.82 dB bei etwa 750 MHz aufweist. Daher wurde eine erneute Messung mit Frequenzen $f_1 = 900$ MHz und $f_2 = 1650$ MHz durchgeführt. Das entsprechende Intermodulationsprodukt zweiter Ordnung trat dabei, wie erwartet, bei 750 MHz mit einem Pegel von -51.6 dBm auf, vergleiche Abbildung 5(a). Bei einer Zweitton-Anregung mit gewählten Signalfrequenzen von $f_1 = 751$ MHz und $f_2 = 752$ MHz, sind auch

Intermodulationsprodukte höherer Ordnungen messbar, wie in Abbildung 5(b) dargestellt.

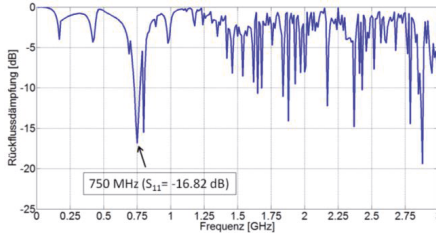


Abb. 4.: Die mit einem Vektornetzwerkanalysator gemessene Anpassung am Drahtschleifenausgang, an dem das Spektrum der induzierten Spannung aufgenommen wurde. Die Drahtschleife weist eine scharfe Resonanz bei 750 MHz auf, daher sind in diesem Frequenzbereich deutlichere Intermodulationsprodukte zu erwarten, falls eine passende Zweiton-Anregung gewählt wird.

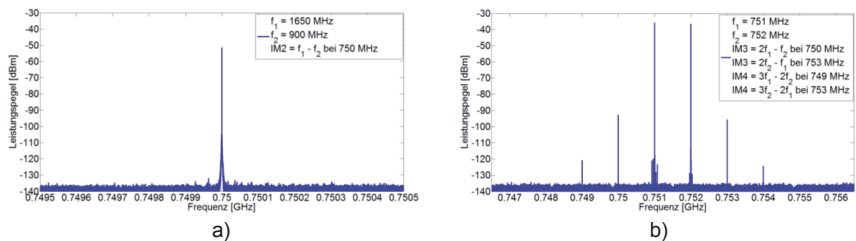


Abb. 5.: Beispielhafte Intermodulationsprodukte zweiter Ordnung (a) sowie dritter und vierter Ordnung (b), hervorgerufen durch eine Zweiton-Anregung mit Grundfrequenzen von f_1 und f_2 ; die Generatorleistung beträgt für beide Signalgeneratoren -5dBm.

Diese exemplarischen Ergebnisse verdeutlichen, dass bei der messtechnischen Erfassung von Intermodulationsprodukten natürlich die gesamte Messkette zu betrachten ist und in unserem Fall die Eigenresonanz der Drahtschleife einen großen Einfluss auf die Amplitude der gemessenen Intermodulationsprodukte hat.

Festzuhalten ist, dass deutliche nichtlineare Kopplungen innerhalb des Resonators nachgewiesen werden können. Hier nicht explizit gezeigt ist die gemachte Beobachtung, dass Positionierung und Ausrichtung der nichtlinear belasteten Drahtschleife innerhalb des Resonators einen großen Einfluss auf die Messergebnisse haben, so dass innerhalb des betrachteten Frequenzbereiches, in welchem einzelne Resonanzen noch deutlich voneinander getrennt sind, die Kopplung der Drahtschleife an einzelne Moden die Messergebnisse hauptsächlich bestimmt. Diese qualitative Beobachtung ist im Einklang mit theoretischen Überlegungen zur Antennenkopplung innerhalb von Resonatoren [6].

2.3 Messungen bei transienter Anregung

Für die transiente Analyse wurde der nichtlinear beladene Resonator mit einem näherungsweise doppelt-exponentiellen Puls (Anstiegszeit t_{rise} 20%-80% \sim 250 ps, Pulsbreite t_{width} 50%-50% \sim 1ns) angeregt, siehe Abbildung 6(a). Weiterhin wurde das Signalspektrum dieses Pulses gemessen, siehe Abbildung 6(b). Das gemessene und für den doppelt-exponentiellen Puls charakteristische Spektrum zeigt, dass merkliche Leistungsanteile des Signals bis ca. 1,5 GHz auftreten. Das breitbandige Spektrum deutet jedoch an, dass eine Einspeisung des Pulses über die verwendeten schmalbandigen Monopolantennen problematisch ist.

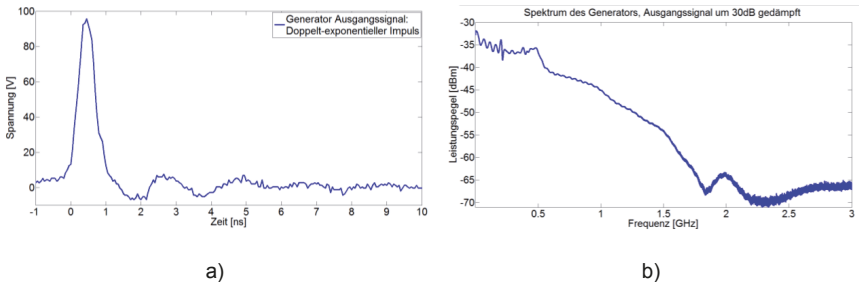


Abb. 6.: Der für die transiente Anregung verwendete doppelt-exponentielle Puls, generiert mit einem Signalgenerator: a) Zeitbereichssignal: die maximale Ausgangsspannung beträgt 100 V, t_{rise} 20%-80% \sim 250 ps, t_{width} 50%-50% \sim 1ns. b) Leistungsspektrum des Pulses.

2.3.1 Transiente Anregung über Monopolantennen

Für die messtechnische Analyse im transienten Fall wurde der Resonator mit der nichtlinearen Last aus Abschnitt 2.1 beladen und mit dem doppelt-exponentiellen Puls über eine Monopolantenne auf der Innenwandseite des Resonators eingespeist. In Abbildung 7 ist ein Vergleich der Impulsantworten im Resonator mit und ohne Beladung sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich dargestellt. Die in Abbildung 7(a) dargestellten Messergebnisse zeigen, dass sich mit dieser Versuchsanordnung keine deutlichen Unterschiede der Systemantworten bei linearer und nichtlinearer Last erzeugen lassen, auch wenn im Zeitbereich die Anwesenheit der nichtlinearen Last zu einer etwas stärkeren Dämpfung der gemessenen Spannung führt. Aus der Darstellung im Frequenzbereich ist ersichtlich, dass sich einzelne Spektralanteile in ihren Amplituden unterscheiden, doch wesentliche Effekte sind in diesem Fall nicht zu erkennen. Dies führt zurück auf die Schwierigkeit, mittels der schmalbandigen Monopolantennen genügend Energie des breitbandigen Pulses in den Resonator einzukoppeln, um die nichtlineare Last auch tatsächlich in einen nichtlinearen Bereich zu treiben. Eine Lösung dieses Problems ist der Entwurf von breitbandigeren Einspeiseantennen, welches zurzeit verfolgt wird [7].

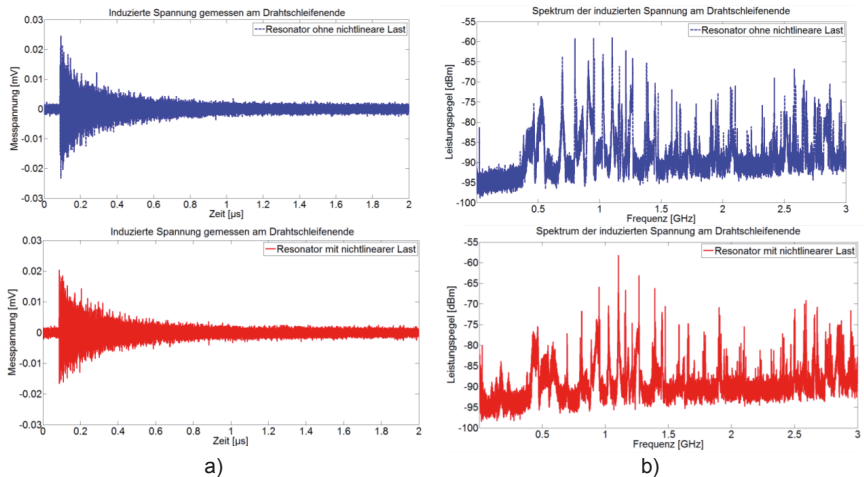


Abb. 7.: Zeit- und Frequenzbereichsantworten des Resonators nach Anregung mit einem doppelt-exponentiellen Puls, jeweils ohne und mit nichtlinearer Last. a) Zeitbereich b) Frequenzbereich.

2.3.2 Transiente Anregung über Aperturen in der vorderen Resonatorwand

Um im transienten Fall mehr Energie in den Resonator einkoppeln zu können, wurde dieser in einen offenen Wellenleiter verbracht. Für diesen Wellenleiter stand eine doppelt-exponentielle Pulsquelle zur Verfügung, die eine Ausgangsspannung von mehreren kV erzeugen kann. Zur feldgebundenen Einkopplung wurde die zuvor geschlossene vordere Resonatorwand durch eine aperturbefahete Wand ersetzt, die konkret über vier Schlitze verfügt. Diese Schlitze sind jeweils zwei Mal horizontal (30 cm x 0.5 cm) und vertikal (15 cm x 0.5 cm) ausgerichtet, siehe auch Abbildung 1.

In Abbildung 8(a) sind die Systemantworten für die Fälle mit und ohne nichtlineare Last dargestellt. Wie zuvor wurde die Spannung am nicht mit 50 Ohm abgeschlossenen Ende der Drahtschleife gemessen. Es ist nun ersichtlich, dass die nichtlineare Last eine deutliche Auswirkung auf die Impulsantwort des Resonators hat. Weitere Untersuchungen mit nur einem horizontalen Schlitz (30 cm x 0.5 cm) mittig in der Frontplatte zeigen einen ähnlichen Effekt, siehe Abbildung 8(b), nur ist das eingekoppelte Signal, wie zu erwarten, wegen der geringeren Anzahl von Aperturen im Vergleich etwas abgeschwächt. Der Effekt der nichtlinearen Last besteht hier in einer Abschwächung der Schwingungsminima bei einer gleichzeitigen Verstärkung der Schwingungsmaxima. Die Bedeutung eines solchen Verhaltens wurde bereits im Rahmen eines Oszillatormodells diskutiert [3]: Werden Oszillatoren als einfachste Störseenen durch „unsymmetrische“ Schwingungsverläufe angeregt, so lassen sich deutlich höhere Amplituden erzielen als im „symmetrischen“ Fall. Für die vorliegende Untersuchung steht eine entsprechende quantitative Analyse jedoch noch aus.

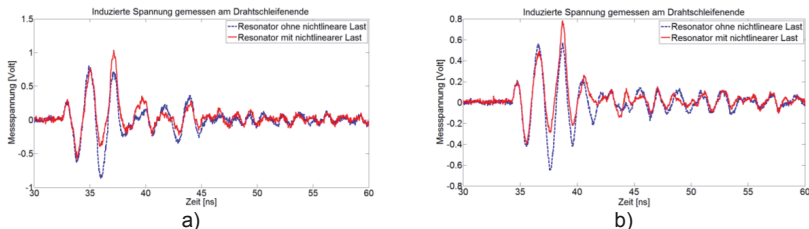


Abb. 8.: Zeitbereichsantworten des Resonators nach Anregung mit einem doppelt-exponentiellen Puls innerhalb eines offenen Wellenleiters, jeweils mit und ohne nichtlineare Last. a) Impulsantwort des Resonators mit einer Apertur mit zwei horizontalen und zwei vertikalen Schlitze; b) Impulsantwort des Resonators mit einem horizontalen Schlitz als Apertur.

3 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden Messumgebungen vorgestellt, welche das Studium transienter Vorgänge innerhalb eines nichtlinear beladenen Resonators erlauben. Im Vergleich zu Zweitonanregungen ist die Anregung durch breitbandige Pulse nicht trivial. Monopolantennen sind nur begrenzt einsetzbar und können wegen ihrer schlechten Anpassung in weiten Frequenzbereichen elektromagnetische Energie nicht effektiv in einen Resonator einkoppeln, so dass die Verwendung breitbandiger Antennen erforderlich ist. Eine Alternative besteht in der Möglichkeit der Anregung durch Aperturkopplung, die mit genügend Leistung innerhalb eines Wellenleiters tatsächlich deutliche nichtlineare Effekte hervorrufen kann.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Nitsch, S. Tkachenko, and S. Potthast: "Pulsed Excitations of Resonators", Interaction Note 619, September 2010.
- [2] S. Tkachenko, J. Nitsch, and R. Rambousky: "Electromagnetic Field Coupling to a Thin Wire located symmetrically inside a Rectangular Resonator", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 55, 2013, pp. 334-341.
- [3] H.Krauthäuser, S. Tkachenko, and J. Nitsch: "The Action of Non-Linear Effects in a Resonator", In Proc. of the URSI GA 2002, Maastricht, The Netherlands, August 2002, 4 pages.
- [4] 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 in IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility.
- [5] M. Hiebel, Grundlagen der vektoriellen Netzwerkanalyse, 3. Auflage, München, Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG, 2011.
- [6] F. Gronwald: "Iterative solution of a nonlinear antenna problem inside a high-quality resonating chamber", in Proc. of EMC Europe 2012, Rome, Italy, 2012, 6 pages.
- [7] M. Kotzev, M. Kreitlow, and F. Gronwald: "Design and Analysis of Ultra-wideband Antennas for Transient Field Excitations", Kleinheubacher Tagung 2015, submitted to Advances in Radio Science.