

Von der Messung zur Netzwerkbeschreibung: Modellierung der Anregung nichtlinear belasteter Störsenken durch HPEM-Pulse

B.Sc. Robert Michels, Dipl.-Ing. Carsten Dietrich, Prof. Dr. Frank Gronwald, Universität Siegen, Zuverlässigkeit Technischer Systeme und Elektrische Messtechnik, Hölderlinstr. 3, 57076 Siegen

Dipl.-Ing. Matthias Kreitlow, Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien (WIS), Humboldtstr. 100, 29633 Munster

1 Einleitung und Stand der Technik

Gepulste Hochleistungsmikrowellen (kurz: *HPEM-Pulse*) gehören zu den klassischen transienten Störsignalen der EMV. Die Beschreibung der Einkopplung von HPEM-Pulsen in komplexe Systeme umfasst eine Vielzahl von Standardmethoden der EMV, um Koppelpfade „von der Quelle bis zur Senke“ modellieren zu können. Als Basis dienen dazu üblicherweise zunächst Begrifflichkeiten, die im Frequenzbereich definiert sind, wie etwa bei der Definition bestimmter Transferfunktionen, und die mathematisch lineare Zusammenhänge zwischen Anregung und Wirkung voraussetzen [1, 2]. In diesem Beitrag wird vorgestellt, wie auf dieser Basis auch die Wirkung von HPEM-Pulsen auf nichtlinear belastete Störsenken modelliert werden kann. Zu berücksichtigen ist dabei, dass sich solche Störsenken oftmals innerhalb metallischer Gehäuse befinden, welche als Resonatoren wirken können. Es ergeben sich damit bei der Beschreibung des EMV-Koppelpfades drei nichttriviale Aspekte, welche *Transiente*, *Resonatoren* und *Nichtlinearitäten* umfassen.

- *Transiente Anregungen* spielen in der EMV natürlich schon seit langem eine wichtige Rolle, etwa bei der Modellierung des *Nuclear Electromagnetic Pulse (NEMP)* und des *Lightning Electromagnetic Pulse (LEMP)* als EMV-Störquellen [1]. Das Gefährdungspotential solcher Störquellen ist etwa in den Dissertationen [3, 4] untersucht worden. Da viele wichtige Konzepte der EMV, wie beispielsweise das der Transferfunktion, üblicherweise im Frequenzbereich formuliert sind, erfordert die Modellierung und auch die Messung transienter Vorgänge eine gewisse Erfahrung in Transformationstechniken, welche nicht immer trivial sind. Beispiele hierfür sind in [5, 6, 7, 8] zu finden.
- Der Einfluss *resonierender Umgebungen* auf das EMV-Verhalten wird zumeist im linearen Fall und im Frequenzbereich untersucht [1, 2, 9, 10], doch auch im Zeitbereich sind analytische Modellierungen möglich [5]. Hier liegt der Fokus oft auf der Auswertung und Interpretation der entsprechenden analytischen Ausdrücke.
- Werden *nichtlineare Elemente* in die Betrachtungen miteinbezogen, so sind viele Methoden der elektromagnetischen Feldtheorie nicht mehr anwendbar, da sie Linearität voraussetzen. Die Erweiterung auf eine nichtlineare Feldtheorie ist jedoch weder praktikabel noch notwendig, da nichtlineare Elemente oft als konzentrierte Bauelemente angesehen werden können. Es wird dann eine Netzwerkformulierung gewählt, bei welcher der lineare Anteil die feldtheoretische Information enthält, zu dem die nichtlinearen Elemente ergänzt werden können. Frühe Arbeiten hierzu finden sich im Bereich nichtlinear belasteter Antennen und Übertragungsleitungen [11, 12, 13]. Die entsprechenden Ergebnisse können, etwa

mit Hilfe des Spiegelprinzips, auch auf Resonatoren übertragen werden [14, 15]. In weiteren Arbeiten ist gezeigt worden, dass der Einfluss von Nichtlinearitäten auf das EMV-Verhalten beträchtlich sein kann [16, 17, 18].

Bereits das Studium der hier aufgeführten Literatur verdeutlicht die Komplexität der Modellierung nichtlinear belasteter Störsenken, welche durch HPEM-Pulse angeregt werden. Innerhalb der zitierten Literatur wird dabei zumeist auf einen bestimmten Zugang fokussiert, der entweder analytische, numerische oder messtechnische Methoden verwendet. In diesem Beitrag wird exemplarisch aufgezeigt werden, wie sich diese verschiedenen Zugänge miteinander korrelieren lassen.

2 Verknüpfung von Messungen und Netzwerkmodellierung über Feldsimulation in Zeit- und Frequenzbereich

In Bild 1 sind analytische, numerische und messtechnische Methoden zur Untersuchung nichtlinear belasteter Empfangsstrukturen skizziert. Die darin als Pfeile dargestellten Verknüpfungen werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert und anschließend miteinander korreliert.

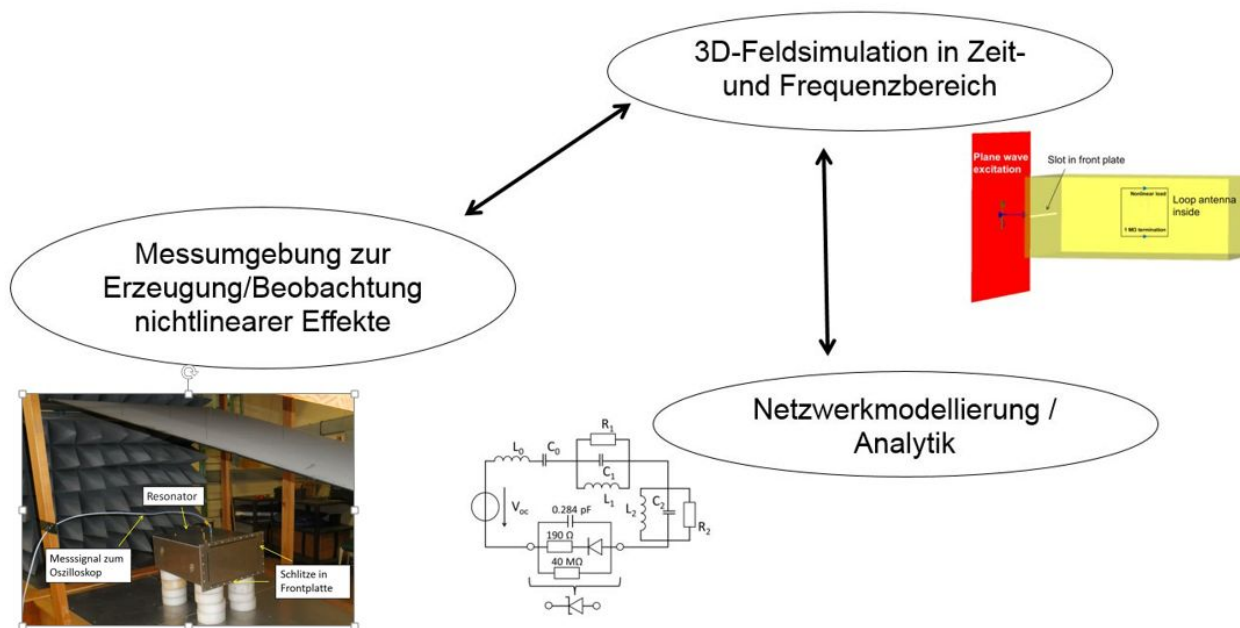


Bild 1: 3D-Feldsimulation als Bindeglied zwischen experimenteller Messumgebung und Netzwerkmodellierung zur Analyse der Anregung nichtlinear belasteter Störsenken durch HPEM-Pulse.

2.1 Messtechnische Untersuchungen von HPEM-Einkopplungen im TEM-Wellenleiter

Um ein Objekt mit HPEM-Pulsen zu beaufschlagen, wird dieses üblicherweise in einen TEM-Wellenleiter eingebracht, welcher mit einer geeigneten HPEM-Quelle verbunden ist. Ein entsprechender Messaufbau ist in Bild 2 gezeigt. Darin ist das Messobjekt ein Resonator, der durch Aperturkopplung in seinem Inneren angeregt wird. Im Resonator ist

weiterhin eine Antenne positioniert, die entweder linear oder nichtlinear belastet ist. Das Antennensignal kann mittels eines Steckadapters von außen gemessen werden. Dieser Messaufbau ist in [19] näher beschrieben und Details der Kalibrierung zur Berücksichtigung frequenzabhängiger Kabeldämpfungen bei der Messung von Pulsantworten im Zeitbereich finden sich in [8].

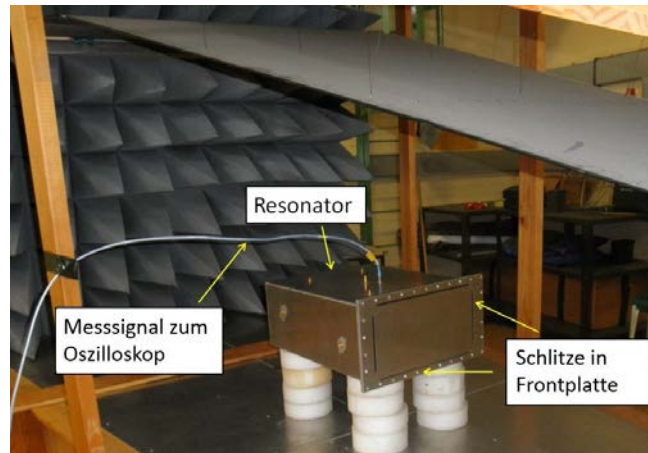


Bild 2: Experimenteller Messaufbau, bei dem ein Resonator innerhalb eines TEM-Wellenleiters in seinem Inneren durch schlitzförmige Aperturen angeregt wird.

2.2 Numerische Simulationen in Zeit- und Frequenzbereich

Zur Simulation des in Bild 2 dargestellten Messaufbaus eignet sich im Hinblick auf die gepulsten Anregungen zunächst ein Zeitbereichsverfahren, wie die Finite Integrationstechnik (FIT) [20]. Das TEM-Wellenfeld wird durch eine ebene Welle modelliert und die Pulsform bestimmt sich aus Messdaten des tatsächlichen Pulses, welche in das Simulationsmodell importiert werden können. Die Geometrie eines solchen Modells ist in Bild 3 dargestellt.



Bild 3: Im Simulationsmodell wird der grau dargestellte Resonator durch eine ebene, gepulste Welle angeregt, welche durch die rote Ebene symbolisiert ist [20]. Erkennbar ist im Inneren des Resonators auch eine rechteckförmige Drahtantenne, die nichtlineare Bauelemente enthalten kann.

Im linearen Fall kann solch ein Modell auch im Frequenzbereich erstellt werden, beispielsweise mit Hilfe der Momentenmethode [21,10], so dass Simulationsergebnisse mehrerer unabhängiger Verfahren miteinander verglichen werden können. Im Hinblick auf die Korrelation mit Messergebnissen ist der Einfluss des Steckadapters zu

berücksichtigen, der das Empfangssignal von innen nach außen führt. Anstatt diesen Adapter im Detail zu modellieren, kann sein Einfluss alternativ durch ein *Deembedding* berücksichtigt. bzw. herauskalibriert werden [10].

2.3 Netzwerkmodellierung des Empfangsverhaltens nichtlinear belasteter Antennen

Die Netzwerkmodellierung der hier als EMV-Störsenken fungierenden Antennen ist prinzipiell ein Standardverfahren, welches als Eingangsparameter die durch die Anregung verursachte Leerlaufspannung V_{oc} , die Eingangsimpedanz Z_{in} der Antenne sowie deren Lastimpedanz Z_{Load} benötigt [11,12, 22].

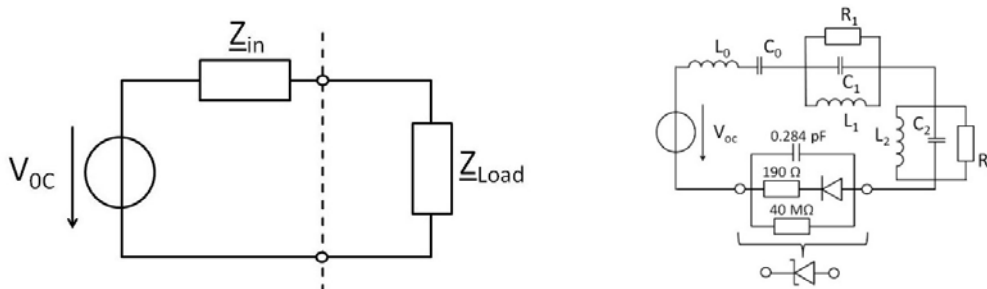


Bild 4: Netzwerkmodell einer empfangenden Antenne, sowohl allgemein (links) als auch exemplarisch mit konkreten Netzwerkelementen für Eingangsimpedanz und nichtlineare Last (rechts).

Im linken Teil von Bild 4 sind diese Größen zunächst in einem allgemeinen Ersatzschaltbild zusammengefasst. Auch wenn die Lastimpedanz das Verhalten eines linearen Netzwerkelementes im Frequenzbereich impliziert, kann dort auch ein nichtlineares Bauelement für Netzwerksimulationen im Zeitbereich eingefügt werden, was für die betrachtete Problemstellung natürlich wesentlich ist. Konkret müssen die induzierte Leerlaufspannung und die Eingangsimpedanz der Antenne durch numerische Simulationen erhalten werden, so wie im vorigen Abschnitt 2.2. angedeutet. Da die Leerlaufspannung als Funktion der Zeit benötigt wird, bieten sich hierfür entsprechend Simulationen im Zeitbereich an. Die Eingangsimpedanz der Antenne wird üblicherweise durch Simulationen im Frequenzbereich erhalten. Es ist dann nicht trivial, im betrachteten Frequenzbereich diese Eingangsimpedanz durch äquivalente Netzwerkelemente zu repräsentieren. Dieses ist ein klassisches Problem und für Details der entsprechenden Vorgehensweise im betrachteten Fall wird auf [22] verwiesen. Exemplarisch sind im rechten Teil von Bild 4 Netzwerkelemente gezeigt, die neben dem Nahfeldverhalten der Antenne bei tiefen Frequenzen auch Resonanzeigenschaften der Antenne und ihrer Umgebung widerspiegeln. Schließlich wird ein Modell der Last benötigt, in Bild 4 rechts ist dies das Modell einer Schottky-Diode mit einer parasitären Kapazität und realistischen Widerständen. Speziell im Fall nichtlinearer Lasten ist die Kenntnis der parasitären Eigenschaften wichtig aber nicht immer in den entsprechenden Datenblättern verfügbar. Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass die Eingangsimpedanz der empfangenden Struktur an dem Port definiert ist, an dem sich die Last befindet. Dieser Port ist nicht notwendigerweise mit dem tatsächlichen Port der Antenne identisch. Beispielsweise wurde in [22] eine kleine Rahmenantenne untersucht, bei welcher der Antennenport gegenüber der nichtlinearen Last positioniert ist. Als Resultat ergibt sich in dem Fall die Eingangsimpedanz an der Position der nichtlinearen Last als die einer Dipolantenne und nicht als die einer Rahmenantenne.

3 Korrelation der verschiedenen Methoden

Im Folgenden werden gemäß der in Bild 1 gezeigten Verknüpfungen einige Resultate der verschiedenen Verfahren und Modellierungen miteinander verglichen. Dabei werden zufriedenstellende Übereinstimmungen erzielt, so dass sich als Resultat ein stimmiges Methodenkonzept zur Modellierung der Anregung nichtlinear belasteter Störseken durch HPEM-Pulse ergibt.

3.1 Korrelation zwischen Messtechnik und Numerik

Im nachfolgenden Beispiel werden messtechnisch und numerisch erhaltene Ergebnisse des in Bild 2 skizzierten Messaufbaus verglichen. Die entsprechende Antennenkonfiguration ist genauer in [19] beschrieben und beinhaltet eine an zwei Ports befestigte Rahmenantenne, von denen ein Port mit 50 Ohm abgeschlossen ist. Die am zweiten Port induzierte Spannung dient als Messgröße. Innerhalb der Rahmenantenne befindet sich eine Schottky-Diode als nichtlineare Last. Der Zeitverlauf des anregenden HPEM-Pulses ist in Bild 5 gezeigt.

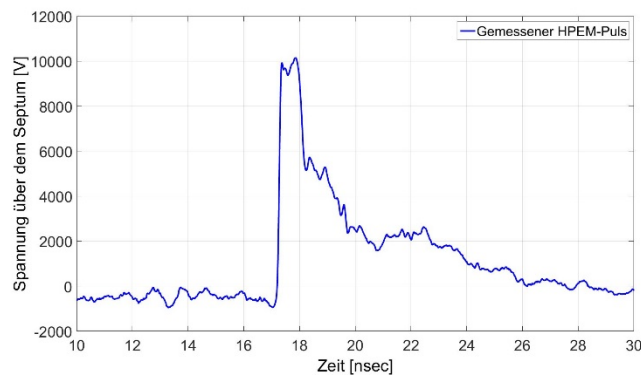


Bild 5: Zeitlicher Verlauf des anregenden HPEM-Pulses, als charakteristische Größe ist die Spannung über dem Septum im TEM-Wellenleiter gezeigt.

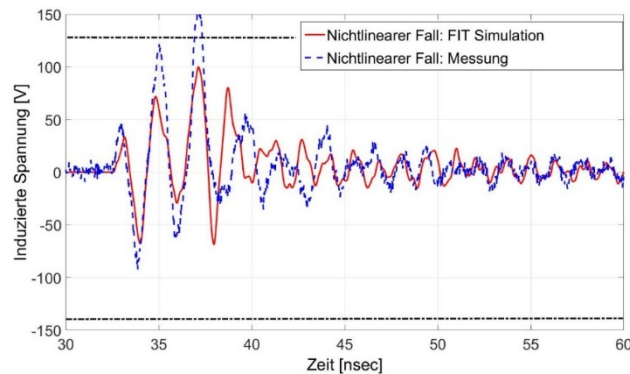


Bild 6: Vergleich von Messung und Simulation im nichtlinearen Fall. Bis zur dritten Oszillation zeigt sich eine gute Übereinstimmung beider Methoden.

In Bild 6 zeigt sich als Ergebnis die Ausbildung eines Gleichanteils in der Systemantwort, welcher nach Abklingen der Anregung auch gleichermaßen abklingt und nicht von längerer Dauer ist. Dies lässt sich durch den geringen Messwiderstand von 50 Ohm begründen, über den sich der Gleichanteil abbaut, so dass über der Nichtlinearität keine elektrische Energie gespeichert wird. Der Vergleich von Messung und Simulation zeigt nach mehreren Oszillationen Abweichungen, die teilweise darauf zurückzuführen sind, dass innerhalb des Wellenleiters Reflektionen des anregenden Pulses auftreten, die im Simulationsmodell nicht berücksichtigt sind.

3.2 Korrelation zwischen Numerik und Netzwerkmodellierung

Zur Korrelation zwischen Numerik und Modellierung wird eine Konfiguration betrachtet, bei der eine Rahmenantenne im Resonator befindlich ist und in diesem ohne Anbindung nach außen positioniert ist. In der Rahmenantenne sind eine Schottky-Diode und ein Messwiderstand von 1 MOhm jeweils gegenüber befindlich. Durch diese Anordnung entfällt die Notwendigkeit, die Steckverbindung von innen nach außen modellieren zu müssen. Doch zunächst wird die Rahmenantenne im freien Raum betrachtet und dort mit einem HPEM-Puls beaufschlagt. Als Messgröße dient die über der Diode induzierte Spannung, welche sowohl durch eine Feldsimulation als auch durch eine Netzwerksimulation mit Hilfe des Programms LTspice erhalten wird [22].

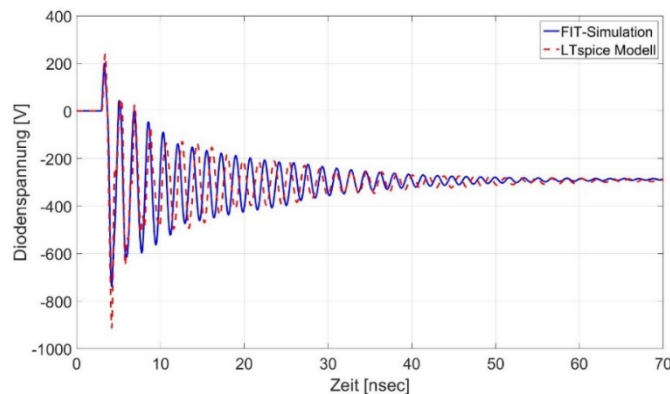


Bild 7: Induzierte Diodenspannung im Fall der im Freiraum befindlichen Antenne.

Im Resultat zeigt sich in Bild 7 die Ausprägung eines deutlichen Gleichanteils, der über längere Zeitskalen erhalten bleibt. Grund hierfür ist der in der Antenne vorhandene hochohmige 1MOhm Widerstand, der einen schnellen Abbau der über der Diode vorhandenen Spannung verhindert.

Ähnliches zeigt sich in Bild 8 für den Fall, dass sich die Antenne innerhalb eines Resonators befindet. Neben der dominanten Antennenresonanz treten hier aber noch weitere Resonanzen auf, welche die Systemantwort verkomplizieren. Das zeitlich längere Auftreten des durch die Nichtlinearität verursachten Gleichanteils ist aber wie im Freiraumfall vorhanden.

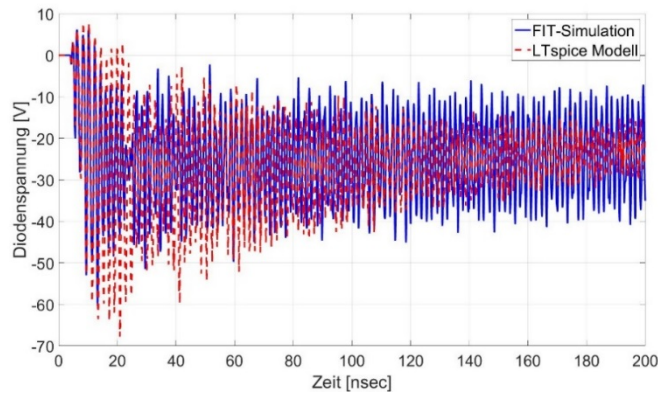


Bild 8: Induzierte Diodenspannung im Fall der im Resonator befindlichen Antenne.

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden messtechnische, numerische und netzwerktheoretische Verfahren zur Analyse des Antwortverhaltens nichtlinear belasteter Antennen in resonierenden Umgebungen vorgestellt und miteinander korreliert. Als wichtiger nichtlinearer Effekt ergibt sich ein Gleichanteil innerhalb der Systemantwort, der durch die Speicherung elektrischer Energie in der als Schottky-Diode verwendeten Nichtlinearität hervorgerufen wird.

Danksagung

Diese Forschungsarbeit wurde vom Wehrwissenschaftlichen Institut für Schutztechnologien in Munster im Rahmen des Projekts "Transiente Modellierung von nichtlinear beladenen Resonatoren" unter der Nummer E/E590/EZ018/CF162 gefördert.

Literaturangaben

- [1] Lee, K. S. H. (Ed.): EMP Interaction: Principles, Techniques, and Reference Data, revised printing, Taylor & Francis, Washington D.C., 1995.
- [2] Tesche, F. M., Ianoz, M. V., and Karlsson, T.: EMC Analysis Methods and Computational Methods, JohnWiley & Sons, New York, 1997.
- [3] D.Nitsch: „Die Wirkung eingekoppelter ultrabreitbandiger elektromagnetischer Impulse auf komplexe Systeme“, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2005.
- [4] F. Sonnemann: „Elektromagnetische Effekte an elektrischen Zündmitteln (EED) mit angeschlossener Zündelektronik (ZKE) bei impulsförmiger, breitbandiger Bestrahlung“, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2009.
- [5] J. Nitsch, S. Tkachenko, and S. Potthast: "Pulsed Excitations of Resonators", Interaction Note 619, September 2010.
- [6] T. Ehlen: „Transiente Abstrahlung, Einkopplung und Streuung der Schlitzantennen im EMV-Umfeld“, Advances in Radio Science, vol. 12, (2014), pp. 123-133.
- [7] R. Rambousky, S. Tkachenko, and J. Nitsch: "A novel solution algorithm for non-

- linearly loaded transmission lines inside resonating enclosures”, *Advances in Radio Science*, vol. 12, (2014), pp. 1-8.
- [8] M. Kreitlow, G. Schmidt, and F. Sabath: „Accreditation of a NEMP test procedure: Approach, measurement technique, uncertainty”, 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Ottawa, Canada, July 2016, pp. 841-846.
- [9] S.Tkachenko, R.Rambousky, and J.Nitsch: Electromagnetic Field Coupling to a Thin Wire located symmetrically inside a Rectangular Resonator”, in *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 55, 2013, pp. 334–341.
- [10] A. Vogt, H.-D. Brüns, Q. Wu, F. Gronwald, and C. Schuster: “A Measurement Setup for Quantification of Electromagnetic Interference in Metallic Casings”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 57, no. 6, December 2015, pp. 1354–1364.
- [11] T.K. Liu and F.M. Tesche: “Analysis of antennas and scatterers with nonlinear loads”, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 24, 1976, pp. 131–139.
- [12] T.K. Sarkar and D.D. Weiner: “Scattering Analysis of Nonlinearly Loaded Antennas”, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 24, 1976, pp. 126–131.
- [13] A. Djordjevic, T. Sarkar, and R. Harrington: “Analysis of lossy transmission lines with arbitrary nonlinear terminal networks”, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 34, (1986), pp. 660–666.
- [14] K.-C. Lee and T.-H. Chu: “Mutual Coupling Mechanisms Within Arrays of Non-linear Antennas”, *IEEE Trans. on EMC*, vol. 47, 2005, pp. 963–970.
- [15] F. Gronwald: “Antenna Theory in Resonating Systems derived from Fundamental Electromagnetism”, *Habilitationsschrift*, ISBN 3-929757-93-1, (Res Electricae Magdeburgenses, Band 16, 2006).
- [16] H.G. Krauthäuser, S. Tkachenko, and J. Nitsch: “The Action of Non-Linear Effects in a Resonator”, in *Proc. of the XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science, URSI GA 2002, Maastricht, The Netherlands, August 2002*, 4 pages.
- [17] 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.
- [18] R. Rambousky, S. Tkachenko, and J. Nitsch: “A novel solution algorithm for non-linearly loaded transmission lines inside resonating enclosures”, *Advances in Radio Science*, vol. 12, (2014), pp. 1–8.
- [19] M. Kotzev, M. Kreitlow, and F. Gronwald: Transient Excitation of Nonlinearly Loaded Resonators and Observation of System Responses in Time Domain, in: 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Wroclaw, Poland, 5–9 September 2016, IEEE, 75–78, 2016.
- [20] CST: CST EM Studio Version 2013, CST – Computer Simulation Technology AG, Darmstadt, Germany, available at: <http://www.cst.com>
- [21] TET: CONCEPT-II, Institute of Electromagnetic Theory (TET), Hamburg University of Technology (TUHH), available at: <http://www.tet.tuhh.de/concept/uebersicht/>
- [22] M. Kotzev, X. Bi, M. Kreitlow, and F. Gronwald: „Equivalent circuit simulation of HPEM-induced transient responses at nonlinear loads”, *Advances in Radio Science*, vol. 15, (2017), pp. 175-180.