

Verbesserung der Schirmeffektivität eines metallisch geschirmten Raums an den Resonanzfrequenzen mithilfe von Absorbermaterial

Dipl.-Ing. Stefan Parr, M.Sc. Hamed Karcoon, Univ.-Prof. Dr.-Ing Stefan Dickmann.
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Dipl.-Phys. Ronald Rambousky.
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien - ABC-Schutz (WIS), Munster

1 Einleitung

Metallisch geschirmte Räume als Teil eines komplexen Systems, z.B. eines Schiffs, sind zwangsläufig durch Aperturen und Kabel mit dem Rest des Systems verbunden. Durch die notwendigen Lüftungsöffnungen, Kabeldurchführungen und Türspalte wird die elektromagnetische Schirmeffektivität begrenzt. Durch Reflexion und positive Überlagerung von eingekoppelten Wellen an den Innenwänden kommt es zur Ausbildung von Resonanzen bei den Frequenzen

$$F_{(m,n,p)} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (1)$$

mit a , b und d : Abmessungen des quaderförmigen Raums, c : Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts, m , n und p : positive ganze Zahlen, von denen maximal eine Null sein darf, und die die Mode beschreiben [1]. Hierdurch kommt es zu großen räumlichen und spektralen Feldstärkeschwankungen von bis zu 45 dB [2]. Um die Schirmeffektivität an den Resonanzfrequenzen zu verbessern, muss die Reflektivität der Wände bzw. die Güte des Resonators reduziert werden. In Absorberkammern, die eine feld- und reflexionsfreie Umgebung reproduzieren sollen, wird dies durch eine Kombination von Ferritkacheln und Pyramidenabsorbern erreicht, um ein großes Frequenzspektrum abzudecken. Hierzu muss die Länge der Pyramidenabsorber in der Größenordnung der halben Wellenlänge liegen. Für andere Anwendungen kommt dies aufgrund des hohen Platzverbrauchs nur bedingt in Frage. Es wurden auch Versuche unternommen, die Schirmeffektivität durch Platzierung von Absorbermaterial an den Stellen maximaler Feldstärke zu verbessern [1]. Auch diese Methode ist für Räume mit Geräten im Innenraum nur schwierig zu realisieren. Olyslager et. al. haben vorgeschlagen, plattenförmige Absorber an der Innenseite eines geschirmten Raums anzubringen [3]. Dieser Ansatz wird in dieser Arbeit weiter verfolgt, mit dem Ziel festzustellen, um wieviel die Schirmeffektivität mit verschiedenen Absorbermaterialien oberhalb der ersten Resonanzfrequenz verbessert werden kann.

Hierzu wird zunächst eine metallisch geschirmte Kiste als Modell durch Simulation und Messung untersucht. Ziel ist die Verifizierung der Simulation durch Vergleich mit der Messung, um für Räume mit größerer Ausdehnung die Messung zu sparen. Simulation und Messung der Schirmeffektivität werden mit und ohne Absorbermaterial durchgeführt, um die Dämpfung der Resonanzen zu bestimmen. Danach wird die Untersuchung der Schirmeffektivität für einen Raum voller Größe durchgeführt. Da die Feldstärke innerhalb des Raumes durch die Resonanzen stark schwankt, wird die Schirmeffektivität über die mittlere Energiedichte im Raum berechnet.

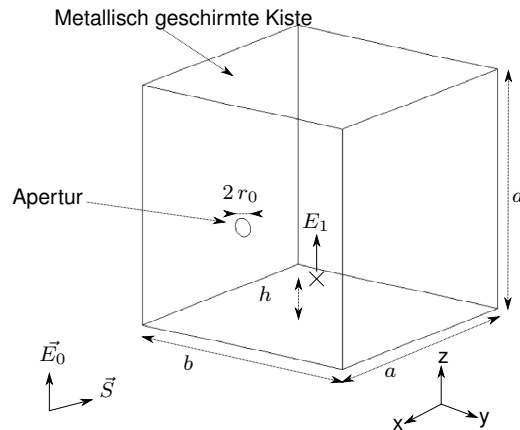


Abbildung 1: Metallisch geschirmte Kiste mit Apertur.

2 Schirmeffektivität einer leeren metallisch geschirmten Kiste als Modell

Zunächst wird die Schirmeffektivität anhand eines Modells untersucht. Das hierzu erstellte und in Abb. 1 gezeigte Simulationsmodell besteht aus einer würfelförmigen Kiste mit einer Kantenlänge von etwa 40 cm mit einer kreisförmigen Apertur an der Vorderseite mit einem Radius von 15 mm. Die ersten vier Resonanzfrequenzen der metallisch geschirmten Kiste können nach Formel (1) berechnet werden und sind in Tabelle 1 gezeigt. Es wird hier der Einfachheit halber nicht nach TE und H Moden unterschieden und die Resonanzordnung wird fortan als (mnp) gekennzeichnet. Als Anregung wird eine TEM Welle verwendet, die

Tabelle 1: Frequenzen der ersten vier Resonanzen.

m n p	Frequenz in MHz
1 1 0	529
1 1 1	650
0 1 2	845
1 1 2	922

sich in -x Richtung ausbreitet und deren E-Feld in z Richtung polarisiert ist mit einer Amplitude $|\vec{E}_0|$ von 50 V/m. Das geschirmte Feld $|\vec{E}_1|$ wird 5 cm oberhalb des Kistenbodens mittig gemessen. Die elektrische Schirmeffektivität SE_{el} berechnet sich wie folgt:

$$SE_{el} = 20 \cdot \log_{10} \frac{|\vec{E}_0|}{|\vec{E}_1|} \text{ in dB.} \quad (2)$$

Die Simulation wird mit der Software FEKO durchgeführt. Als numerische Lösungsmethode für das Innere der Kiste werden die Momentenmethode (MoM) mit Surface Equivalence Principle (SEP) sowie Finite Elemente (FEM) getestet. Die Simulation wird in einem Frequenzbereich von 400 MHz bis 1 GHz mit 200 linear verteilten Frequenzpunkten durchgeführt. Ein Vergleich der benötigten Ressourcen für die beiden Methoden ist in Tabelle 2 gezeigt für eine Simulation mit zehn parallelen Prozessen. Die Ergebnisse für die Schirmeffektivität unterscheiden sich nur unwesentlich mit einer maximalen Abweichung von 4 dB. Da die Finite Elemente Methode einen klaren Vorteil in der Berechnungszeit zeigt, wird sie fortan verwendet.

Die Simulationsergebnisse werden mit einer analytischen Berechnungsmethode nach Robinson et. al. [4] verglichen. Hierbei wird der Schirm als Wellenleiter mit einer einzelnen Mode (TE_{10}) betrachtet und die Apertur mithilfe der Leitungstheorie berücksichtigt. Die

Tabelle 2: Vergleich der benötigten Ressourcen für eine Simulation bis 1 GHz.

	MoM/SEP	FEM
Zahl der Dreiecke	3364	3176
Zahl der Tetrahedra	0	14300
Gesamte Berechnungszeit	9 h 23 min	48 min
Arbeitsspeicher pro Prozess	509 MBytes	127 MBytes

Ergebnisse sind in Abb. 2 dargestellt. Die ersten vier Resonanzfrequenzen bei der Simulation sind in guter Übereinstimmung mit den in Tabelle 1 berechneten, nur bei 650 MHz bricht die Schirmeffektivität nicht ein. Diese Resonanz wird nicht angeregt, da das E-Feld in z Richtung polarisiert ist. Die Ergebnisse für die numerische sowie die analytische Berechnung stimmen bis zur (012) Resonanz in etwa überein. Die Berechnungsmethode nach Robinson betrachtet eine einzige Wellenleiter Mode (TE_{10}), daher werden hier die höheren Resonanzen nur zum Teil berücksichtigt. Die Schirmeffektivität wird negativ für mehrere Frequenzen, d.h. das Feld ist mit Schirm größer als ohne.

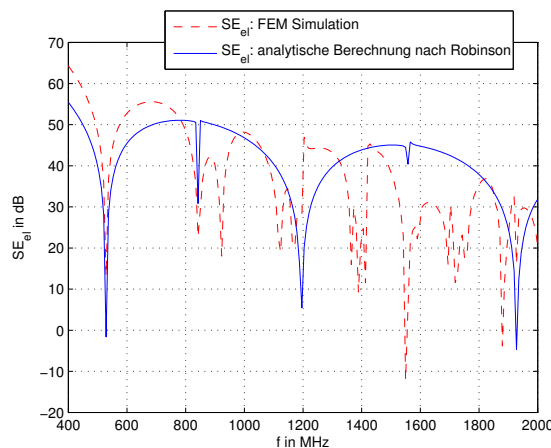


Abbildung 2: Vergleich der Ergebnisse für die Schirmeffektivität der numerischen sowie analytischen Berechnung.

3 Verbesserung der Schirmeffektivität der geschirmten Kiste mithilfe von Absorber Material

3.1 Simulation der Schirmeffektivität mit und ohne Absorber

Um das Absorbermaterial simulieren zu können, müssen zunächst dessen dielektrische Eigenschaften bestimmt werden. Dies ist mithilfe eines Koaxialleitungsexperiments und der Transmissions-/Reflexionsmessung möglich. Die Auswertung erfolgt durch den Nicolson-Ross-Weir-Algorithmus [5, 6, 7]. Die Ergebnisse für die komplexe Permittivität

$$\epsilon_r = \epsilon'_r + j\epsilon''_r \quad (3)$$

von in Kohlenstoff getränktem Polyurethanschaum sind in Abb. 3 gezeigt. Die metallisch geschirmte Kiste wird nun mit einer Absorberplatte mit einer Dicke von 20 mm an der Rückwand bis zu einer Frequenz von 2 GHz simuliert. Die Ergebnisse für die elektrische Schirmeffektivität mit und ohne Absorber sind in Abb. 4 gezeigt. Für hohe Frequenzen kann eine Verschiebung der Resonanzen beobachtet werden. Dies wird durch die hohe

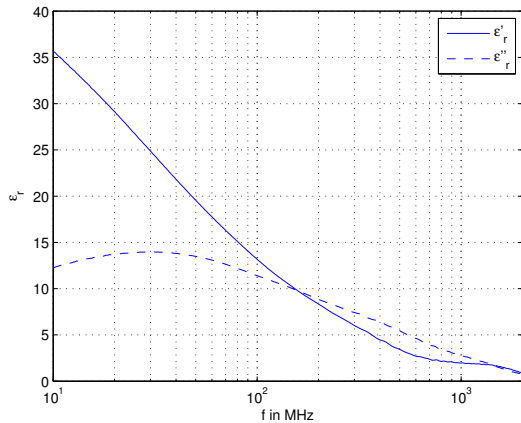


Abbildung 3: Gemessene Permittivität für den Polyurethanabsorber.

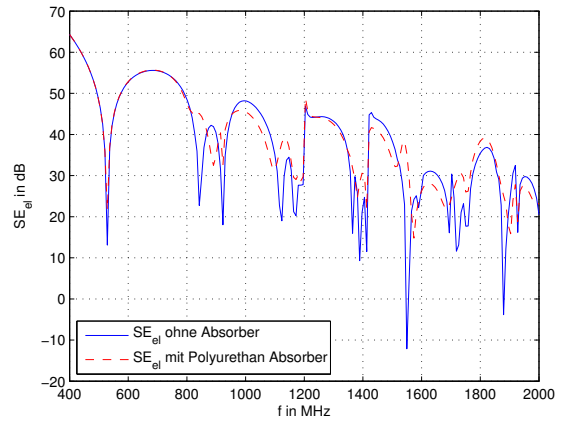


Abbildung 4: Simulierte elektrische Schirmeffektivität mit und ohne Polyurethanabsorber.

Permittivität des Absorbermaterials und der damit geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit darin verursacht. Die minimale Schirmeffektivität wird durch den Absorber von -10 auf +15 dB verbessert.

3.2 Messung der Schirmeffektivität mit und ohne Absorber

Die Geometrie der geschirmten Kiste für die Messung stimmt mit der für die Simulation überein (siehe Abb. 4). Die Schirmwände bestehen aus 1,5 mm starkem Edelstahl. Die vier seitlichen Wände sind miteinander verschweißt, der elektrische Kontakt zu Vorder- und Rückseite wird durch Hochfrequenzdichtungen sichergestellt. Die Kiste wird in einer GTEM-Zelle platziert, die zusammen mit einem Signalgenerator und einem 100 Watt Verstärker die anregende TEM-Welle erzeugt. Die Feldstärke in der Kiste wird mit einer Feldmesssonde mit optischem Kabel gemessen. In einer früheren Veröffentlichung sind Angaben zur Feldbeschaffenheit innerhalb der GTEM-Zelle enthalten [8]. Die Messung der Schirmeffektivität wird durch das Rauschen der Feldmesssonde beschränkt und das E-Feld innerhalb der GTEM-Zelle enthält ungewollte Komponenten in x- und y- Richtung.

Die Feldstärke wird in Abwesenheit des Schirms sowie innerhalb des Schirms mit und ohne Absorber an der Rückseite gemessen, um die Schirmeffektivität zu berechnen. Zwei verschiedene Absorber werden verwendet: der mit Kohlenstoff getränkte Polyurethanschaum mit einer Dicke von 20 mm sowie Ferritkacheln mit einer Dicke von 5,5 mm. Die Ferritkacheln bedecken lediglich 9/16 der gesamten Rückseitenfläche. Die Messung ist durch den Verstärker auf eine Frequenz von 1 GHz beschränkt. Das Ergebnis für die somit bestimmte Schirmeffektivität ist in Abb. 5 gezeigt. Ohne Absorber bricht die Schirmeffektivität an den Resonanzfrequenzen ein, das Minimum ist bei 10 dB. Durch die Ferritkacheln wird der Wert auf 33 dB verbessert. Der Polyurethan Absorber zeigt ebenfalls gute Dämpfung mit einem Minimum von 25 dB an der (110) Resonanz. Das Dämpfungsverhalten der Ferritkacheln und des Polyurethan Absorbers weicht voneinander ab aufgrund der unterschiedlichen elektrischen und magnetischen Feldverteilungen bei den verschiedenen Resonanzen. Die Ferritkacheln zeigen die insgesamt bessere Dämpfung. Ihr Nachteil sind die hohen Kosten sowie das Gewicht. Clegg [9] hat gezeigt, dass die vollständige Bedeckung einer Fläche mit Ferritkacheln nicht notwendig ist, um die Reflexion erheblich zu reduzieren. Eine 80% -ige Abdeckung liefert demnach dieselben Ergebnisse wie die volle Auskleidung. Somit kann an Kosten und Gewicht gespart werden.

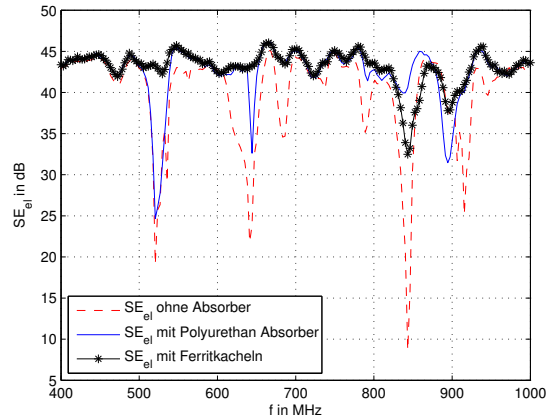


Abbildung 5: Gemessene Schirmeffektivität mit und ohne 20 mm Polyurethanabsorber.

3.3 Vergleich der gemessenen und simulierten Schirmeffektivität

Für große Räume sind Probemessungen der Schirmeffektivität und der Verbesserung mithilfe von Absorbern kostspielig und zeitaufwändig. Daher werden die Simulations- und Messergebnisse für die Kiste verglichen, um die Simulation zu verifizieren und somit für größere Anwendungen die Messung zu umgehen. Die Ergebnisse für die Schirmeffektivität mit Polyurethanabsorber sind hierzu in Abb. 6 dargestellt. Gute Übereinstimmung ist an der (110) und (112) Resonanz zu sehen. Die (111) Resonanz wird nur bei der Messung angeregt, in der Simulation jedoch nicht. Zu ihrer Anregung ist eine E-Feld Komponente in x Richtung notwendig, die nur bei der Messung vorhanden ist aufgrund der inhomogenen Feldverteilung innerhalb der GTEM-Zelle [8]. Die maximal messbare Schirmeffektivität ist aufgrund der minimal messbaren Feldstärke der Feldmesssonde auf 45 dB beschränkt.

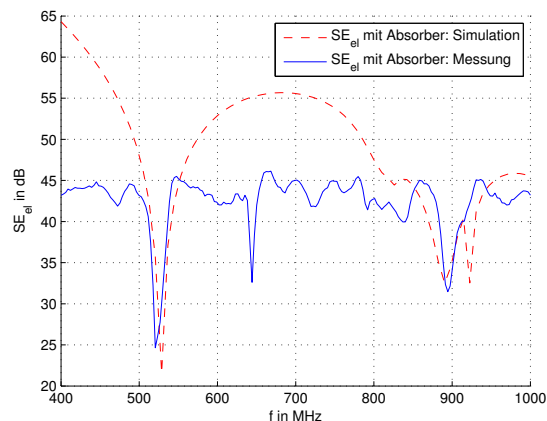


Abbildung 6: Vergleich der gemessenen und simulierten Schirmeffektivität für 20 mm Polyurethanabsorber.

4 Verbesserung der Schirmeffektivität in einem metallisch geschirmten Raum

4.1 Berechnung der Schirmeffektivität über die mittlere elektromagnetische Energiedichte

Bei der Berechnung der Schirmeffektivität nach Formel (2) kann entweder nur das elektrische oder das magnetische Feld berücksichtigt werden. Bei hohen Frequenzen sind jedoch elektrische und magnetische Felder stets miteinander gekoppelt. Hinzu kommt, dass die klassische Definition der Schirmeffektivität nur für einen Punkt definiert ist, die Feldstärke im Innern des Schirms an den Resonanzfrequenzen jedoch stark inhomogen ist. Um eine aussagekräftige Schirmeffektivität angeben zu können, wird im Folgenden die örtlich gemittelte Energiedichte zur Berechnung herangezogen.

Die zeitlich gemittelte elektrische bzw. magnetische Energiedichte w_{el} und w_{mag} einer sinusförmigen Feldgröße mit der Amplitude \hat{E} bzw. \hat{H} ist gegeben durch:

$$w_{\text{el}} = \frac{1}{4} \epsilon \hat{E}^2, \quad w_{\text{mag}} = \frac{1}{4} \mu \hat{H}^2. \quad (4)$$

Die örtlich gemittelte Energiedichte \bar{w} eines elektromagnetischen Feldes im Volumen V ist

$$\bar{w} = \frac{1}{V} \int_V \left(\frac{1}{4} \epsilon \hat{E}^2 + \frac{1}{4} \mu \hat{H}^2 \right) dV. \quad (5)$$

Im Fall von N Messpunkten kann die mittlere Energiedichte aus den Werten für die Feldstärken \hat{E}_i und \hat{H}_i analog berechnet werden:

$$\bar{w} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{4} \epsilon \hat{E}_i^2 + \frac{1}{4} \mu \hat{H}_i^2 \right) \Delta V_i. \quad (6)$$

mit ΔV_i : das zum Messpunkt i gehörige Teilvolumen. Wenn alle Teilvolumen ΔV_i gleich groß sind, ergibt dies:

$$\bar{w} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{4} \epsilon \hat{E}_i^2 + \frac{1}{4} \mu \hat{H}_i^2 \right). \quad (7)$$

Damit kann die elektromagnetische Schirmeffektivität berechnet werden:

$$SE_{\text{em}} = 10 \log_{10} \frac{\bar{w}_0}{\bar{w}_1}. \quad (8)$$

mit \bar{w}_0 : mittlere Energiedichte in Abwesenheit des Schirms, \bar{w}_1 : mittlere Energiedichte im Schirm.

4.2 Simulation eines metallisch geschirmten Raums mit und ohne Absorber

Der in Abb. 7 gezeigte Raum wird in FEKO simuliert, um die Schirmeffektivität mit und ohne Absorber zu bestimmen. Die Geometrieparameter des Raums und der Apertur in Form eines Türschlitzes sowie die ersten Resonanzfrequenzen bis 200 MHz sind in Tabelle 3 gelistet. Die einfallende TEM Welle breitet sich in -x Richtung aus. Ihr E Feld ist 45° zur y und z Richtung polarisiert, um alle Resonanzen anzuregen. Als Absorber wird

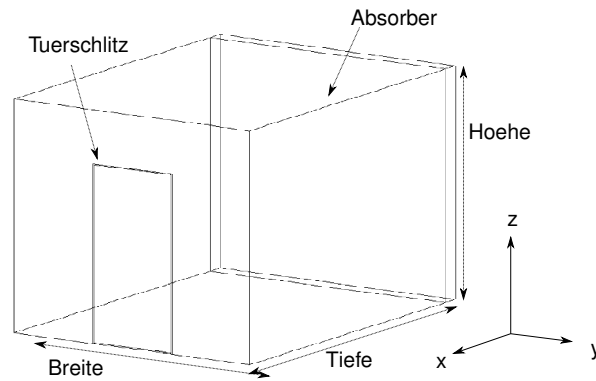


Abbildung 7: Metallisch geschirmter Raum mit Türschlitz und Absorber.

Tabelle 3: Geometrieparameter und Resonanzfrequenzen des Raums

Breite	3 m	m n p	Frequenz in MHz
Höhe	2.6 m	1 1 0	62,5
Tiefe	4 m	1 0 1	68,8
Höhe Tür	2 m	0 1 1	76,3
Breite Tür	1 m	1 1 1	85,1
Breite Türschlitz	10 mm	2 1 0	90,1
		2 0 1	94,6

kohlenstoffgetränkter Polyurethanschaum mit einer Dicke von 20 cm angenommen. Die Energiedichte des elektromagnetischen Feldes im Raum wird über 240 Messpunkte mit einem Abstand von 0.5 m für die Berechnung nach (7) gemittelt. Die Simulationsergebnisse für die Schirmeffektivität mit und ohne Absorber sind in Abb. 8 gezeigt. Die meisten Resonanzen werden um über 20 dB gedämpft. Die erste Resonanz bei ca. 50 MHz wird durch den Türschlitz verursacht, daher wird die Schirmeffektivität hier nicht verbessert.

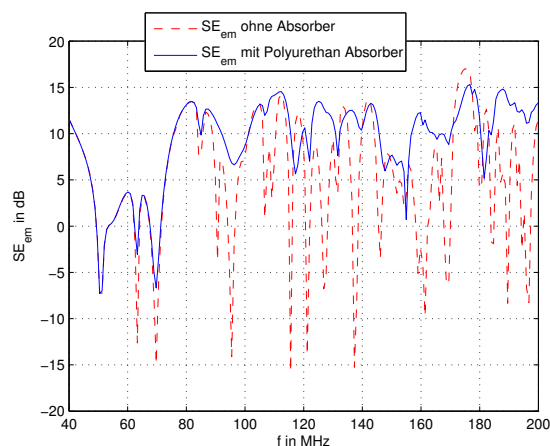


Abbildung 8: Simulierte Schirmeffektivität des Raums.

5 Fazit und Ausblick

Die Möglichkeit der Verbesserung der Schirmeffektivität metallisch geschirmter Räume mit Absorberplatten wurde durch Messung und Simulation bestätigt. Die besten Ergeb-

nisse werden mit Ferritkacheln erzielt, die bei Verwendung in einer würfelförmigen Kiste eine Verbesserung der minimalen Schirmeffektivität von 10 dB auf 35 dB erreichen. Der Nachteil der Kacheln sind Kosten und Gewicht. Der mit Kohlenstoff getränkte Polyurethanschaum als Alternative zeigt ebenfalls erhebliche Dämpfungswerte. Messung und Simulation zeigen gute Übereinstimmung für die geschirmte Kiste, daher ist für Räume mit größeren Ausdehnungen eine Simulation ausreichend. Für den untersuchten Raum mit Türschlitz als Apertur kann die Schirmeffektivität durch Einfügen von Absorberplatten an einer Wand um 20 dB an den meisten Resonanzen verbessert werden. In weiteren Untersuchungen sollen die Dämpfungseigenschaften von Ferritkacheln sowie anderer magnetischer Absorber in Räumen genauer analysiert werden.

Literatur

- [1] DAWSON, L. ; DAWSON, J. F. ; MARVIN, A. C. ; WELSH, D.: Damping resonances within a screened enclosure. In: *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 43 (2001), Nr. 1, S. 45–55. <http://dx.doi.org/10.1109/15.917935>. – DOI 10.1109/15.917935
- [2] IZZAT, N. ; CRADDOCK, I. J. ; HILTON, G. S. ; RAILTON, C. J.: Analysis and realisation of low-cost damped screened rooms. In: *IEE Proceedings -Science, Measurement and Technology* 145 (1998), Nr. 1, S. 1–7. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-smt:19981650>. – DOI 10.1049/ip-smt:19981650
- [3] OLYSLAGER, F. ; LAERMANS, E. ; DE ZUTTER, D. ; CRIEL, S. ; DE SMEDT, R. ; LIETAERT, N. ; DE CLERCQ, A.: Numerical and experimental study of the shielding effectiveness of a metallic enclosure. In: *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on* 41 (Aug), Nr. 3, S. 202–213. <http://dx.doi.org/10.1109/15.784155>. – DOI 10.1109/15.784155. – ISSN 0018–9375
- [4] ROBINSON, M.P. ; BENSON, T.M. ; CHRISTOPOULOS, C. ; DAWSON, J.F. ; GANLEY, M. D. ; MARVIN, A.C. ; PORTER, S.J. ; THOMAS, D. W P.: Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. In: *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on* 40 (Aug), Nr. 3, S. 240–248. <http://dx.doi.org/10.1109/15.709422>. – DOI 10.1109/15.709422. – ISSN 0018–9375
- [5] CHEN, L. F. ; ONG, C. K. ; NEO, C. P. ; VARADAN, V. V. ; VARADAN, V. K.: *microwave electronics measurement and materials characterisation*. John Wiley & Sons, Ltd, 2004. – 175–178 S.
- [6] IHSAN, Zainul ; LUBKOWSKI, Grzegorz ; ADAMI, Christian ; SUHRKE, Michael: Characterization of the absorbing material used in EMC experiments. In: *Proc. EMC Europe 2011 York*, 2011, S. 774–777
- [7] NICOLSON, A. M. ; ROSS, G. F.: Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques. In: *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 19 (1970), Nr. 4, S. 377–382. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.1970.4313932>. – DOI 10.1109/TIM.1970.4313932
- [8] PARR, S. ; DICKMANN, S. ; RAMBOUSKY, R.: Damping resonances of a screened enclosure using absorbing material. In: *Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2012 International Symposium on*, 2012. – ISSN 2325–0356, S. 1 –5
- [9] CLEGG, J. ; ALEXANDER, M. ; DAWSON, L. ; DAWSON, J.F. ; JEE, I. ; MARVIN, A.C. ; LOADER, B. ; PORTER, S.J.: A method of reducing the number of ferrite tiles in an absorber lined chamber. In: *Electromagnetic Compatibility, 1999. EMC York 99. International Conference and Exhibition on (Conf. Publ. No. 464)*, 1999. – ISSN 0537–9989, S. 59 –64