

Leitungsdurchführung von ungeschirmten Versorgungs- und Signalleitungen in einen geschirmten Raum mittels EMV-Filterelementen - eine quantitative Analyse der Schirmeffektivität unter Berücksichtigung von Hohlraumresonanzen

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

Dr.-Ing. Ronald Rambousky.
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien - ABC-Schutz (WIS), Munster

1 Abstract

Zur Sicherstellung der Schirmwirkung von geschirmten Räumen, Anlagen und Geräten sind Leitungsdurchführungen ein wichtiges Konstruktionselement. Ohne besondere Vorkehrungen an der Durchführungsstelle der Leitung in den Raum kann die Schirmeffektivität (SE) signifikant reduziert werden, besonders wenn Hohlraumresonanzen angeregt werden. Zwar wird die Problemstellung der Leitungsdurchführung in der Literatur behandelt [1], [2], [3], [4] und es werden qualitative Abhilfemaßnahmen vorgestellt wie z. B. eine 360°-Leitungsschirmauflegung oder der Einsatz von EMV-Filtern (Abb. 1), jedoch fehlen quantitative Untersuchungen, die das Phänomen der Hohlraumresonanzen einschließen. Die in dieser Arbeit vorgestellten quantitativen Ergebnisse greifen einerseits auf die Erkenntnisse aus [5] zurück und andererseits werden Messungen an einem praktischen Modell durchgeführt. Der Hintergrund dieser Arbeit liegt in der Verbesserung der Störsicherheit von elektronischen Systemen in metallischen Schiffsräumen in einer IEMI-Umgebung (Intentional Electromagnetic Interference).

2 Einleitung

Bei der elektromagnetischen Anregung eines metallischen Schirms über Aperturen und/oder Leitungen sind im Innern des Schirms im Resonanzfall hohe Feldstärken zu erwarten. Dabei lassen sich die Resonanzfrequenzen eines quaderförmigen, metallischen Hohlraums mit der folgenden Gleichung berechnen:

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

mit a , b und d : Abmessungen des Raums, c : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, m , n und p : positive ganze Zahlen, von denen maximal eine Null sein darf [4].

Es treten theoretisch unendlich viele Resonanzfrequenzen auf, die auch entartete Moden beinhalten können. Wichtig für die Schirmungstechnik ist die Kenntnis der ersten Hohlraumresonanz. Für den in dieser Arbeit verwendeten leeren Schirmraum (100 cm x 80 cm x 80 cm) liegt die erste Resonanzfrequenz bei ca. 240 MHz.

Zur Quantifizierung der Feldeinkopplung in einen geschirmten Raum wird in der Regel die Schirmeffektivität (SE) verwendet. Je nach Problemstellung existieren mehrere Methoden

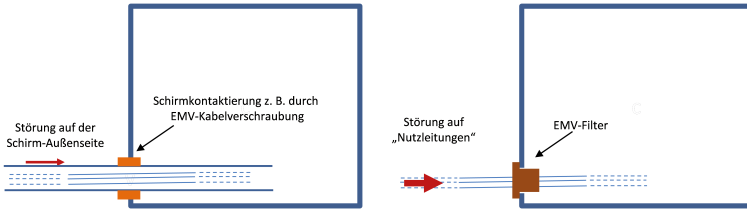


Abbildung 1: Unterschiedliche Möglichkeiten für Leitungsdurchführungen

und Definitionen [4], [6], [7]. In dieser Arbeit wird die Raummittelpunktmethode gemäß Gl. (2) zur Bestimmung der elektrischen Schirmeffektivität (SE_{el}) angewandt, wobei E_0 die Feldstärke ohne und E_1 die Feldstärke mit Schirm darstellen. Die Messungen wurden in Anlehnung an die VG-Norm 95373-15 KS04G durchgeführt. Als Empfangsantenne wurde eine dreiaxige E-Feldsonde in dem Raummittelpunkt des geschirmten Raums platziert.

$$SE_{el} = 20 \cdot \log_{10} \frac{|\vec{E}_0|}{|E_1|} \text{ in dB} \quad (2)$$

3 Leitungsdurchführung mittels Leitungsschirmauflegung

Da die Ergebnisse aus [5] in dieser Arbeit eine wichtige Rolle spielen, erfolgt an dieser Stelle eine Zusammenfassung davon. Ausgehend von dem linken Analysemodell aus Abb. 1 wurde die Schirmeffektivität für einen Schirmraum (100 cm x 80 cm x 80 cm) in einem Frequenzbereich von 200 bis 1000 MHz mittels Simulationen und Messungen untersucht. Dabei ist die Durchführungsstelle kritisch, da auf die Außenseite des Leitungsschirms eingeprägte Störströme, z. B. durch externe Felder verursacht, in dem Schirmraum zur Abstrahlung führen und damit Resonanzen anregen können. Wie stark die Anregungen sind, hängt von der Art und Ausführung des Durchführungselementes (z. B. einer EMV-Leitungsschirmverschraubung) ab. Dieses soll eine niederimpedante Verbindung zwischen Leitungsschirm und der Schirmwand herstellen. In dem elektrischen Ersatzschaltbild gemäß Abb. 2 kann das Durchführungselement als eine Impedanz (Transferimpedanz Z_T) gegen Masse aufgefasst werden. Durch den komplexen Stromteiler teilt sich der Störstrom I_1 an der Durchführungsstelle in zwei Teilströme auf. Der Teilstrom I_2 fließt über das Durchführungselement auf die Wandaußenseite und der Teilstrom I_3 führt über den inneren Abschnitt des Leitungsschirms zur elektromagnetischen Anregung des Schirmraumes. Z_1 kann, wie in der Antennentechnik üblich, als Strahlungsimpedanz aufgefasst werden.

Im Beiblatt 1 der VG-Norm 95375-30 wird die Güte eines Durchführungselementes durch die frequenzabhängige Transferimpedanz Z_T definiert:

$$Z_T = \frac{U_i}{I_a} \quad (3)$$

mit der Spannung U_i zwischen Leitungsschirm und Schirmwand im Inneren des Schirmraumes und dem Strom I_a , der außerhalb des Schirmraumes vom Leitungsschirm über die

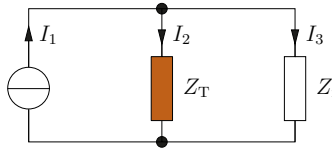


Abbildung 2: Elektrisches Ersatzschaltbild des Analysemodells aus Abb. 1

Kontaktierung zur Wand fließt. Diese Definition erfolgt in Anlehnung an die Transferimpedanz eines Kabels. Bei niedrigen Frequenzen (<10 KHz) entspricht die Transferimpedanz dem Gleichstromwiderstand. Bei höheren Frequenzen (>1 MHz) wird sie durch ihre Induktivität bestimmt. Daher wurde die Transferimpedanz als Netzwerkmodell (Abb. 3) in Form einer Reihenschaltung aus einem ohmschen Widerstand R_T und einer Induktivität L_T betrachtet.



Abbildung 3: Netzwerkmodell der Transferimpedanz Z_T

Da die Induktivität L_T maßgebend die Transferimpedanz bestimmt, wurde eine simulative Parametervariation dieser Größe durchgeführt. Der ohmsche Anteil R_T der Transferimpedanz wird auf einen Wert von $1 \text{ m}\Omega$ festgelegt.

Der Zusammenhang zwischen der Induktivität L_T und der SE_{el} für die erste Resonanzfrequenz ($f = 240$ MHz) wird in Abb. 4 dargestellt. Man erkennt, dass die SE_{el} mit zunehmender L_T zunächst mit einer Steigung von 20 dB/Dekade abfällt. Oberhalb von $L_T = 1 \text{ nH}$ findet eine Sättigung statt, sodass die SE_{el} den Grenzwert von ca. -20 dB nicht unterschreitet. Dieser Grenzwert stellt den Worst-Case dar, wenn keine elektrische Leitungsschirm-Schirmwand-Kontaktierung besteht, und wurde durch Messungen an einem Nachbau des Simulationsmodells bestätigt.

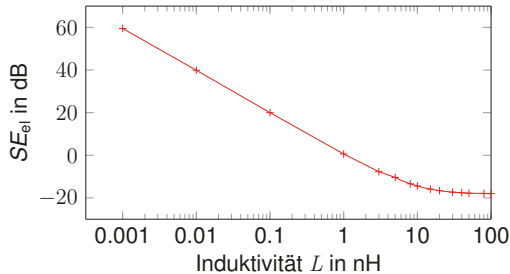


Abbildung 4: L_T - Parametervariation; $f = 240$ MHz

Zusammenfassend wird aus dieser Parametervariationsanalyse die Erkenntnis gewonnen, dass eine $SE_{el} > 0 \text{ dB}$ nur mit einem sehr nieder-induktiven 360° -Durchführungselement ($L_T < 1 \text{ nH}$) erzielt werden kann. Dieser Aspekt spielt im nächsten Abschnitt hinsicht-

lich des Filtereinbaus und der damit verbundenen Filterwirkung eine wichtige Rolle.

4 Leitungsdurchführung mittels Netzfilter

Die schematische Darstellung zur messtechnischen Analyse der Feldeinkopplung über die Versorgungsleitung zeigt die Abb. 5. Die Abmessungen des geschirmten Raumes betragen 100 cm x 80 cm x 80 cm.

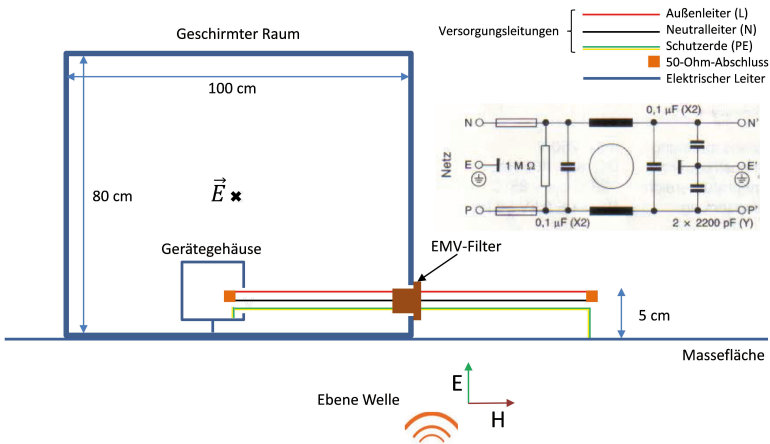
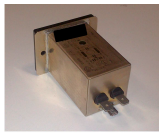


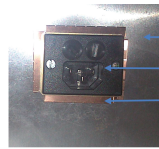
Abbildung 5: Schematische Darstellung des Messaufbaus

Die elektromagnetische Anregung erfolgt mittels einer Log-Per-Antenne. Eine simulatorische Parametervariation der Einfalls- und der Polarisationsrichtung hat gezeigt, dass bei einer Leitungsdurchführung ohne Durchführungselement die maximale Feldeinkopplung erreicht wird, wenn die ebene Welle, wie in Abb. 5 dargestellt, senkrecht zu der Leitung polarisiert ist. Diese Erkenntnis ist interessant, da man die maximale Feldeinkopplung bei einem zum Leitungsschirm tangential polarisierten E-Feldvektor erwarten würde. Die Begründung für die veränderte Worst-Case-Polarisation liegt im Vorhandensein der Massefläche.

An der Durchführungsstelle wurde das kostengünstige, einstufige und einphasige Netzfilter aus der Abb. 6 (links) angebracht. Um eine niederimpedante Verbindung zwischen dem Filtergehäuse und der äußeren Schirmwand herzustellen wurden zusätzliche EMV-Klemmfeder bei dem Einbau des Netzfilters angebracht (Abb. 6 (rechts)). Das Filtergehäuse selbst besitzt lediglich zwei Befestigungslöcher.



Abmessungen: 7 x 5 x 4 cm
Gewicht: 140 g
Max. Nennstrom: 5 A
Preis: 15 €



— Schirmwand
— Netzfilter
— EMV-Klemmfeder

Abbildung 6: Verwendetes Netzfilter

Die Messergebnisse in Abb. 7 zeigen, dass

- die Mindest- SE_{el} des geschirmten Raumes ohne durchgeführte Leitungen (grüne Kurve) bei ca. 35 dB liegt. Dies entspricht laut der VG-Norm 95375-40 einem Schirm mit einer mittleren Qualität.
- bei Leitungsdurchführungen ohne Filter (rote Kurve) die SE_{el} stark reduziert ist.
- bei Leitungsdurchführungen mit Filter und einer niederimpedante Verbindung zwischen dem Filtergehäuse und der äußeren Schirmwand (blaue Kurve) die mittlere SE_{el} bei ca. 35 dB liegt. An einigen Resonanzfrequenzen wird die SE_{el} stärker reduziert. Allerdings liegt die Mindest- SE_{el} bei ca. 12 dB und damit um ca. 25 dB höher als ohne Filter.
- die niederimpedante Verbindung zwischen dem Filtergehäuse und der äußeren Schirmwand, wie im Abschnitt 3 beschrieben, sehr wichtig ist. Die schwarze Messkurve zeigt, wenn das Filtergehäuse keinen elektrischen Kontakt mit der äußeren Schirmwand besitzt, das Filter nahezu wirkungslos wird. Der Grund liegt darin, dass die Störströme auf der Erdleitung nicht auf die Schirmwand abgeleitet werden, sondern sich auf der Erdleitung ausbreiten. Als Abhilfemaßnahme können Klappferrite an der richtigen Position, wie in Abb. 8 dargestellt, angebracht werden. Diese verhindern, dass die Störströme nicht in den Schirmraum abgeleitet werden. Weitere Messungen haben gezeigt, dass durch diese Maßnahme die Mindest- SE_{el} um 15 dB gesteigert werden kann.

5 Leitungsdurchführung mittels Durchführungskondensatoren

Eine weitere, einfache und kostengünstige Abhilfemaßnahme zur Ableitung der Störströme auf einzelnen Leitungen besteht in der Verwendung von Durchführungskondensatoren. Die Messergebnisse in der Tabelle. 1 zeigen, dass die Einfüge-Dämpfung und damit die SE_{el} von der richtigen Auswahl des Kapazitätswertes abhängt. Dieser muss an die erste Resonanzfrequenz des Schirmraumes angepasst sein. Je größer der Kapazitätswert ist, desto höher fällt die Dämpfung der Störung aus. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass das Nutzsignal nicht unzulässig gedämpft bzw. verzerrt wird. Außerdem sind die parasitären Induktivitäten, die in der Regel (je nach Qualität des Bauelementes) mit steigendem Kapazitätswert ansteigen, zu beachten.

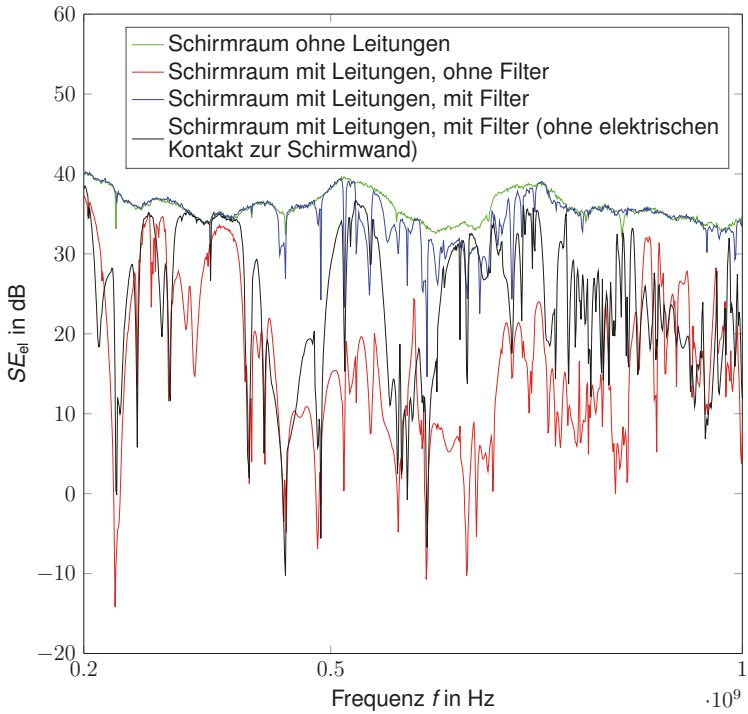


Abbildung 7: Messergebnisse zur Leitungsdurchführung mittels Netzfilter

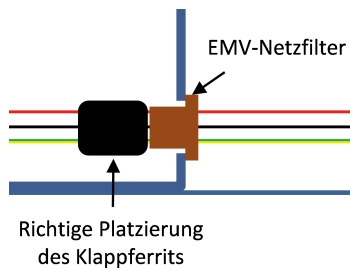


Abbildung 8: Richtige Platzierung von Klappferriten

Tabelle 1: Leitungsdurchführung mittels Durchführungskondensatoren

Kapazität des Durchführungskondensators	SE_{el} an der ersten Resonanzfrequenz
1 nF	32 dB
470 pF	24 dB
100 pF	8 dB
5 pF	-2 dB

6 Zusammenfassung

Durch einfache und damit kostengünstige Filterstrukturen wie z. B. einstufige Netzfilter oder Durchführungskondensatoren lassen sich leitungsgeführte Störeinkopplungen soweit reduzieren, dass andere Kopplungspfade z. B. vorhandene Türschlitze im Vergleich zu der Leitungskopplung signifikant die Schirmeffektivität (SE) im Resonanzfall bestimmen. Teure mehrstufige Filterstrukturen mit hohen Einfügedämpfungswerten wären dann überflüssig.

Erdleitungen in Kombination mit dem Filtereinbau stellen einen besonders kritischen Aspekt hinsichtlich der Filterwirkung dar. Klappferrite stellen bei richtiger Platzierung eine Abhilfe dar.

Literatur

- [1] MONROE, R. L.: EMP SHIELDING EFFECTIVENESS AND MIL-STD 285 / Harry Diamond Laboratories. 1973. – Forschungsbericht
- [2] VANCE, E. F. ; GRAF, W. ; NANEVICZ, J. E.: Unification of Electromagnetic Specification and Standards Part I - Evaluation of Existing Practices / SRI International. 1981. – Forschungsbericht
- [3] DION, M. ; SEREGELYI, J. S.: Design and Testing Considerations for Hardening a Figate Against EMP Threat / Defence Research Establishment Ottawa. 1994. – Forschungsbericht
- [4] WOLFSPERGER, H.A.: *Elektromagnetische Schirmung: Theorie und Praxisbeispiele*. Springer, 2008 (VDI-Buch). – ISBN 9783540769125
- [5] KARCOON, H. ; PARR, S. ; DICKMANN, S. ; RAMBOUSKY, R.: Shielding Effectiveness of Screened Rooms with Line Feed-Throughs - a Semi-Analytical Approach. In: *Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2015 International Symposium on* (2015), Aug.
- [6] KLINKENBUSCH, L.: On the shielding effectiveness of enclosures. In: *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on* 47 (Aug.), Nr. 3, S. 589–601. <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2005.853162>. – DOI 10.1109/TEMC.2005.853162. – ISSN 0018–9375
- [7] CELOZZI, S. ; ARANEO, R.: Alternative Definitions for the Time-Domain Shielding Effectiveness of Enclosures. In: *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on* 56 (2014), April, Nr. 2, S. 482–485. <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2013.2282713>. – DOI 10.1109/TEMC.2013.2282713. – ISSN 0018–9375