

Vereinfachte Methode zur Einschätzung der Schirmdämpfung von metallischen Gehäusen mit Hilfe der Nahfeldkopplung auf eine Leitung

Dipl.-Ing. Steffen Schulze, Würth Elektronik eiSos GmbH, Waldenburg, Deutschland
Saad Al-Hamid, O.-v.-G.-Universität Magdeburg, Deutschland

1 Einleitung

Der Beitrag beschäftigt sich mit einer alternativen Messmethode, um die Schirmdämpfung eines leeren Standard 19-Zoll-Gehäuses abzuschätzen. Als Versuchsobjekte dienten zwei Gehäuse der Serie EuropacPRO [1]; eines mit 3 Höheneinheiten (HE) und eines mit 6 HE. Das vorgestellte Verfahren nutzt einfache Drähte für die Aussendung und den Empfang der HF-Signale, einen Netzwerkanalysator (NWA) und einen geschirmten Raum für die Ermittlung der Schirmdämpfung und ist nicht normativ beschrieben. An die Drähte selbst werden keine besonderen Anforderungen gestellt. Ein Draht muss von der Länge her in das Gehäuse passen und für die Zuführung der Signale muss an einer Stelle der Gehäusewand eine Öffnung vorgesehen werden. Dies ist aber auch für andere (normative) Verfahren notwendig, es sei denn, es wird ein autark betriebener Sender/Empfänger verwendet. Für die Bestimmung der Schirmdämpfung von Gehäusen in einem weiten Frequenzbereich gibt es z.B. folgende Standards:

- IEEE 299 [2] für Kabinen und Gehäuse mit einer Kantenlänge größer/gleich 2 m, 9 kHz bis 18 GHz
- IEEE 299.1 [3] für Kabinen und Gehäuse mit einer Kantenlänge zwischen 10 cm und 2 m, 9 kHz bis 18 GHz
- MIL-STD-285 [4], mittlerweile ersetzt durch [2], 9 kHz bis 18 GHz
- NSA 94-106 [5], 1 kHz bis 10 GHz
- DIN EN 50147-1 [6], 9 kHz bis 40 GHz
- DIN EN 61587-3 [7], 30 MHz bis 3 GHz

Die zuvor genannten Normen basieren zumeist auf dem Substitutionsverfahren, d.h. es werden zwei Teilmessungen durchgeführt; einmal ohne zu bewertendes Prüfobjekt und einmal mit. Dieses Verfahren wurde für die hier präsentierte Methode ebenfalls angewendet.

Die Grenze der messtechnischen Bestimmung von Schirmdämpfungswerten liegt bei ca. 120 dB. Besonders im unteren Frequenzbereich ist eine hohe Messdynamik wünschenswert. Daher kommen oftmals HF-Verstärker auf der Senderseite und rauscharme Vorverstärker auf der Empfängerseite zum Einsatz. Eine weitere Möglichkeit bietet sich durch die Verwendung eines Netzwerkanalysators. Neben einer großen Frequenzbandbreite ist auch der Dynamikbereich hoch, so dass auf einen HF-Verstärker verzichtet werden kann. Für die Untersuchungen in diesem Beitrag kam der 4-Tor-Netzwerkanalysator R&S ZNB 8 zum Einsatz.

2 Testobjekte

Die verwendeten Einschubgehäuse bestehen im Originalzustand aus Aluminium. Das kleinere der beiden hat die Abmaße (L×B×H) 43,5 cm×36 cm×13,5 cm und das größere die Abmaße 43,5 cm×23 cm×27 cm. Abbildung 1 zeigt die beiden Einschubgehäuse. Einige der Seitenwände sind eloxiert und nicht umlaufend elektrisch mit den übrigen Seitenwänden verbunden. Bei dem kleineren Gehäuse sind die vordere und hintere Seitenwand eloxiert und nur an 6 Punkten über Schrauben mit dem Grundrahmen verbunden, wobei die Schrauben in Kunststoffassungen sitzen.

Dadurch entstehen zwei umlaufende Schlitze, die die Schirmwirkung reduzieren. Beim größeren Gehäuse besteht die vordere Wand aus zwei Teilflächen, die in der Mitte einen durchgehenden Schlitz offen lassen. Dieser Schlitz wurde später als Modifikation mit Aluminiumklebeband elektrisch geschlossen.

Auch beim kleinen Gehäuse wurde künstlich ein über die gesamte Breite gehender Schlitz eingebracht, indem die Deckfläche nach hinten verschoben wurde, so dass an der vorderen oberen Kante die 3 mm breite Apertur entsteht.

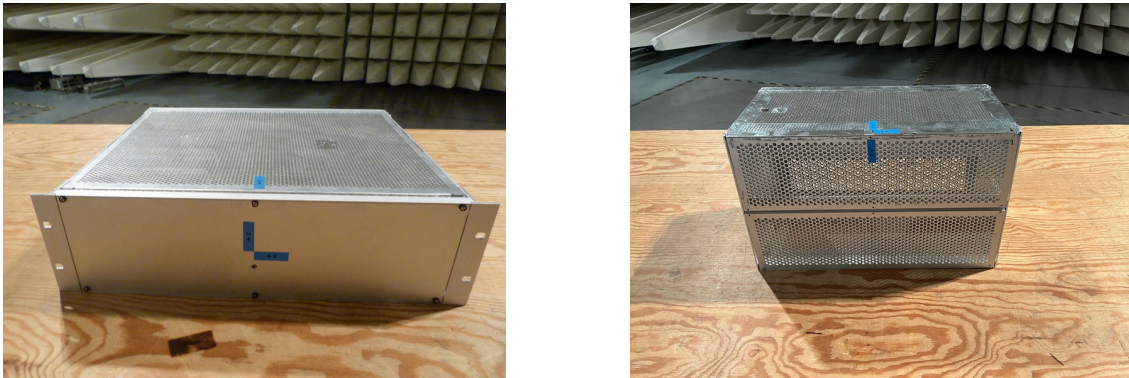


Abbildung 1: Foto der untersuchten Gehäuse. Links: 3 HE. Rechts: 6 HE.

3 Messaufbau der Leitungskopplungsmethode

Als Sendestruktur wurde ein Kupferdraht mit 46 cm Länge und 3 mm Durchmesser verwendet. Er ist auf der Speiseseite an den Innenleiter eines koaxialen Flanschadapters angeschlossen, welcher masseseitig mit der Deckplatte der Einschubgehäuse verbunden war. Dafür musste ein Loch in die Deckplatte gebohrt werden. Aufgrund der Geometrie der Gehäuse und der Länge des Drahtes wurde in 7,5 cm Entfernung vom Flansch ein 90° Knick eingefügt. Die Sendeleitung war am Port 1 des NWA angeschlossen. Der als Empfänger dienende Draht der Länge 93 cm wurde horizontal zwischen zwei Metallwinkel gespannt und in 5 cm Abstand parallel am Gehäuse entlang geführt. Abbildung 2 zeigt den schematischen Messaufbau und Abbildung 3 den realen.

Die gesamte Struktur war auf einer Metallplatte mit den Abmaßen 187 cm \times 100 cm angeordnet, welche gleichzeitig als Rückleiter für die Empfängerleitung diente. Alle Untersuchungen erfolgten in der Halbabsorberhalle der Universität Magdeburg. Die Masseplatte war zusätzlich niederinduktiv mit dem Hallenboden verbunden. Auch die Schirmgehäuse waren immer geerdet.

Auf der Senderseite wurden zwei Konfigurationen untersucht. Zum einen war der Draht am Ende offen. Dies erzeugt ein dominantes elektrisches Feld. Zum anderen wurde das Drahtende leitfähig mit der Innenseite einer Seitenwand verbunden. Die so entstandene Stromschleife erzeugt ein dominantes magnetisches Feld im Innern. Die gleiche Konfiguration war für die Empfängerleitung vorgesehen. Während ein Ende mit Port 2 des NWA verbunden war, konnte am anderen Ende die Abschlussimpedanz variiert werden (Leerlauf, Kurzschluss, 50 Ω).

Um die Substitutionsmethode für die Bestimmung der Schirmdämpfung anwenden zu können, muss eine Referenzmessung ohne Gehäuse durchgeführt werden. Der Abstand zwischen Sender- und Empfängerleitung sowie die Orientierung zueinander muss dabei dem der Messung mit Gehäuse entsprechen. Als Beispiel ist in Abbildung 3 links die Referenzmessung für das Gehäuse mit 3 HE zu sehen. Dieses Gehäuse wurde nur in der Standardorientierung verwendet. Für das Gehäuse mit 6 HE wurde zusätzlich die Orientierung in Bezug auf die Empfängerleitung geändert, um verschieden starke Kopplungen nachzubilden. Dabei wurde die Position der Empfängerleitung beibehalten. Die drei orthogonalen Orientierungen zeigt Abbildung 4. Gemessen wurde im Frequenzbereich von 1 MHz bis 5 GHz.

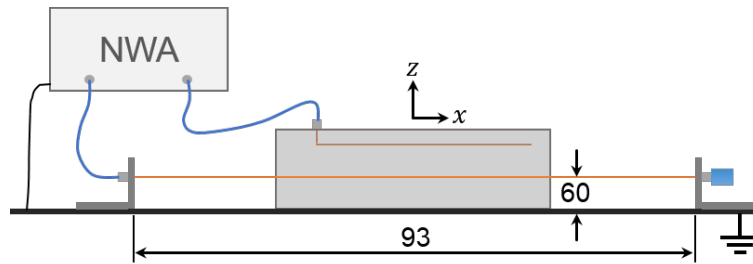


Abbildung 2: Schematischer Messaufbau der Leitungskopplung für das Gehäuse mit 3 HE.

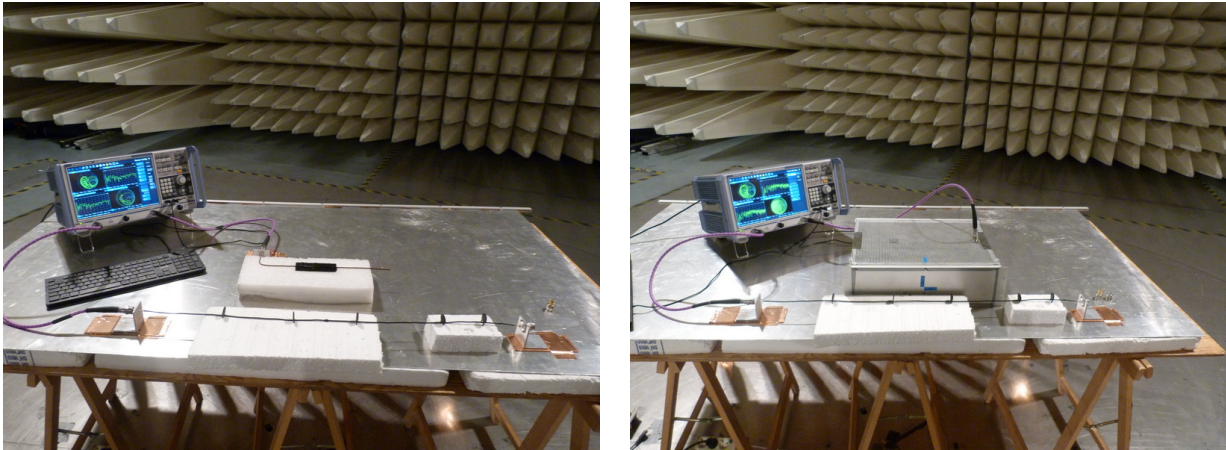


Abbildung 3: Realer Messaufbau der Leitungskopplung. Links: Referenzmessung mit offener Senderleitung. Rechts: Messung mit Gehäuse (3 HE).

4 Ergebnisse der Leitungskopplungsmethode

4.1 Gehäuse mit 3 HE

Zunächst werden die Teilergebnisse vom Gehäuse mit 3 HE gezeigt. Den Transferparameter S_{21} der Referenzmessung mit offener Senderleitung und variabler Abschlussimpedanz der Empfängerleitung zeigt Abbildung 5 links. Auf der rechten Seite ist das Ergebnis für die kurzgeschlossene Senderleitung zu sehen. Deutlich sichtbar sind die Resonanzen aufgrund der unterschiedlichen Drahtlängen. Die Kopplung wird zu hohen Frequenzen hin erwartungsgemäß stärker. Vergleicht man beide Diagramme, so kann man bis ca. 100 MHz einen deutlichen Unterschied in den Messkurven feststellen. Bei offener Sender- und Empfängerleitung dominiert die Kopplung über das elektrische Feld und bei kurzgeschlossener Sender- und Empfängerleitung die Kopplung über das

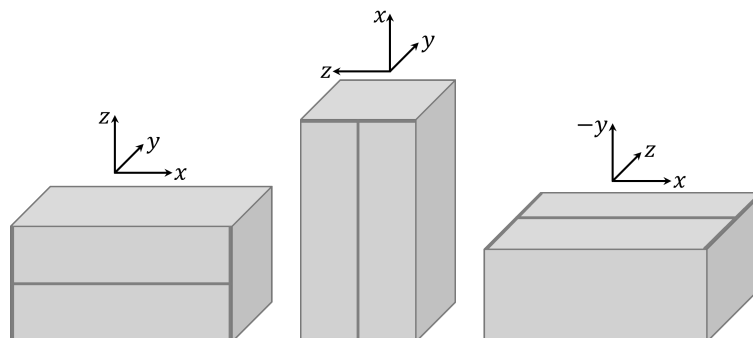


Abbildung 4: Die drei orthogonalen Orientierungen des Gehäuses mit 6 HE.

magnetische Feld. Im Resonanzbereich nähern sich die Kurven einander an. In Abbildung 6 sind

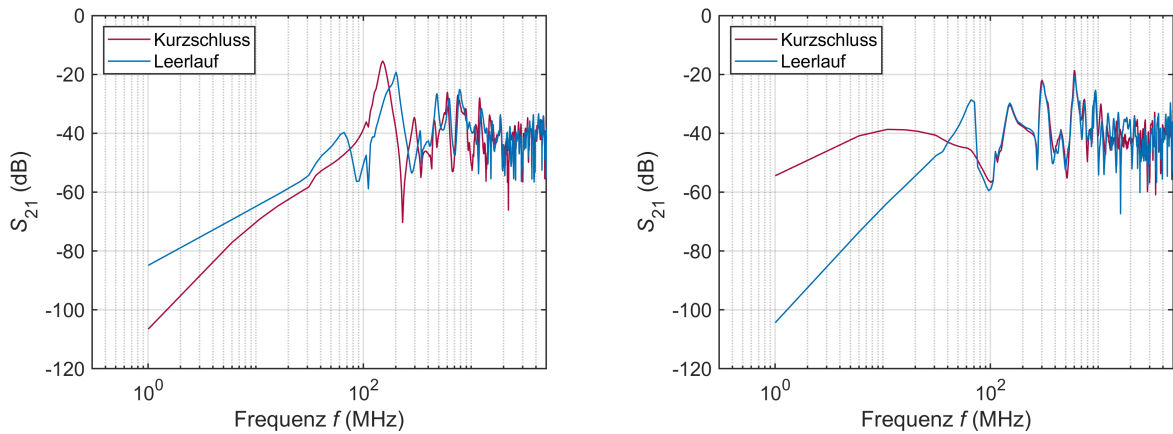


Abbildung 5: Pegel der Referenzmessung mit variabler Abschlussimpedanz der Empfängerleitung. Links: Senderleitung offen. Rechts: Senderleitung kurzgeschlossen.

die Ergebnisse der Messung mit Gehäuse in zwei Konfigurationen gegenübergestellt. Erwartungsgemäß sind die Pegel im unteren Frequenzbereich deutlich niedriger als bei der Referenzmessung. Durch zusätzliche Hohlraumresonanzen nimmt die Modendichte im oberen Frequenzbereich zu. Die $\lambda/2$ -Resonanz des Schlitzes liegt bei 349 MHz. Die Auswirkung des Schlitzes ist erst oberhalb von 100 MHz zu sehen. Die maximale Schirmdämpfung pro Frequenz kann berechnet werden,

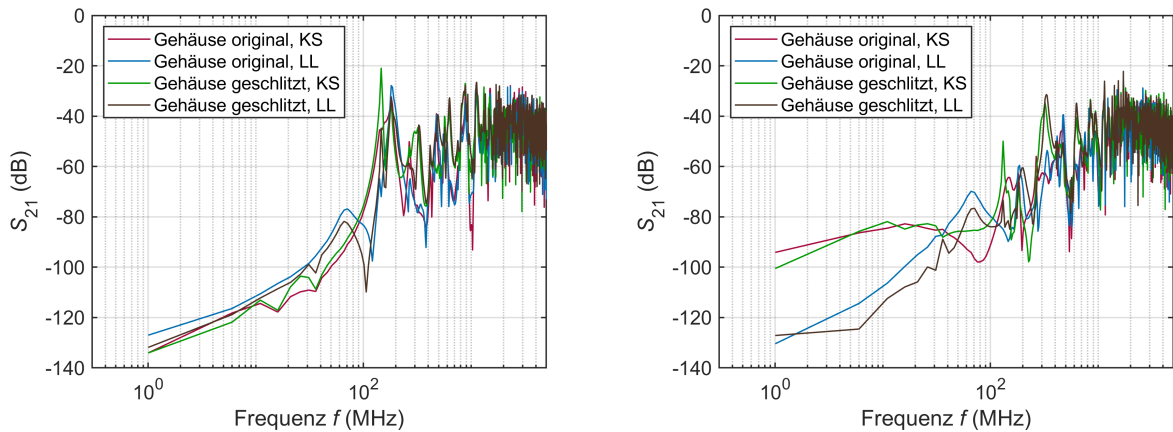


Abbildung 6: Pegel der Messung mit Gehäuse (3 HE) und variabler Abschlussimpedanz der Empfängerleitung. Links: Senderleitung offen. Rechts: Senderleitung kurzgeschlossen.

indem der Maximalwert des Betrages des Transferparameters aus allen Konfigurationen k bei der Referenzmessung auf den Minimalwert des Betrages des Transferparameters aus allen Konfigurationen k bei der Messung mit Gehäuse bezogen wird (siehe Gleichung 1).

$$\max(A_S) = 20 \cdot \log \left(\frac{\max |S_{21,Ref,k}|}{\min |S_{21,k}|} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

Die mittlere Schirmdämpfung pro Frequenz ergibt sich demnach mit Hilfe der Beträge der mittleren Transferparameter aus allen Konfigurationen (siehe Gleichung 2).

$$\langle A_S \rangle = 20 \cdot \log \left(\frac{\langle |S_{21,Ref,k}| \rangle}{\langle |S_{21,k}| \rangle} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Man erkennt, dass sich die Werte für beide Konfigurationen nicht signifikant voneinander unterscheiden; auch nicht im oberen Frequenzbereich. Der Grund dafür ist der umlaufende Schlitz an der vorderen (eloxierten) Seite des Gehäuses. Die zusätzlich eingebrachte lange Apertur auf der Oberseite verschlechtert die Schirmwirkung nur unwesentlich. Die mittlere Schirmdämpfung bis ca. 70 MHz beträgt 45 dB.

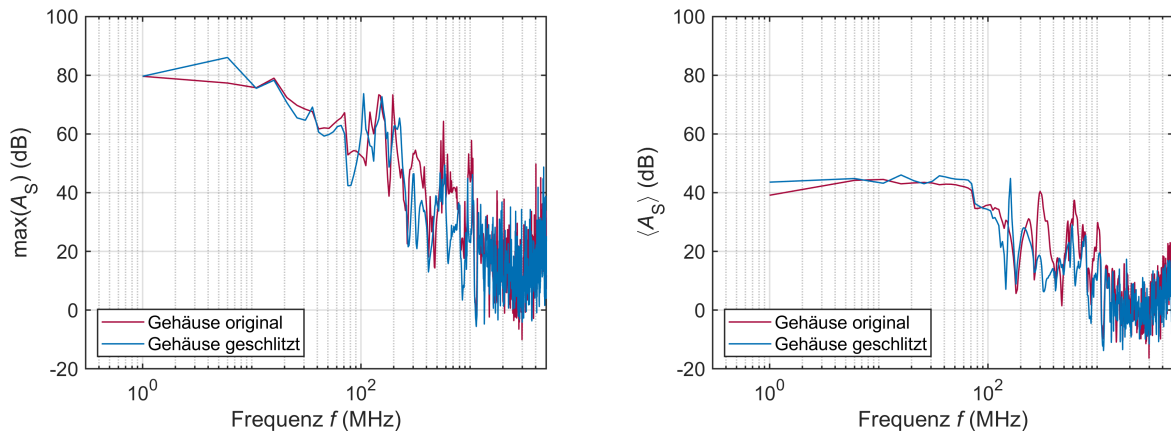


Abbildung 7: Schirmdämpfung für das 3 HE Gehäuse in verschiedenen Konfigurationen. Links: Maximalwert. Rechts: Mittelwert.

4.2 Gehäuse mit 6 HE

Die Kopplung am Gehäuse mit 6 HE wurde in 2 Konfigurationen (1: abgedichtet mit Aluminiumklebeband, 2: mit Schlitz) und 3 Orientierungen untersucht. Abbildung 8 rechts zeigt als Beispiel das abgedichtete Gehäuse in der Standardorientierung (z -Achse nach oben). Die dazugehörige Referenzmessung ist links zu sehen. Um den Außenleiter des N-Flanschadapters des Senders zu erden, wurde ein breites Kupferband verwendet. Für die Ermittlung der Schirmdämpfungswerte

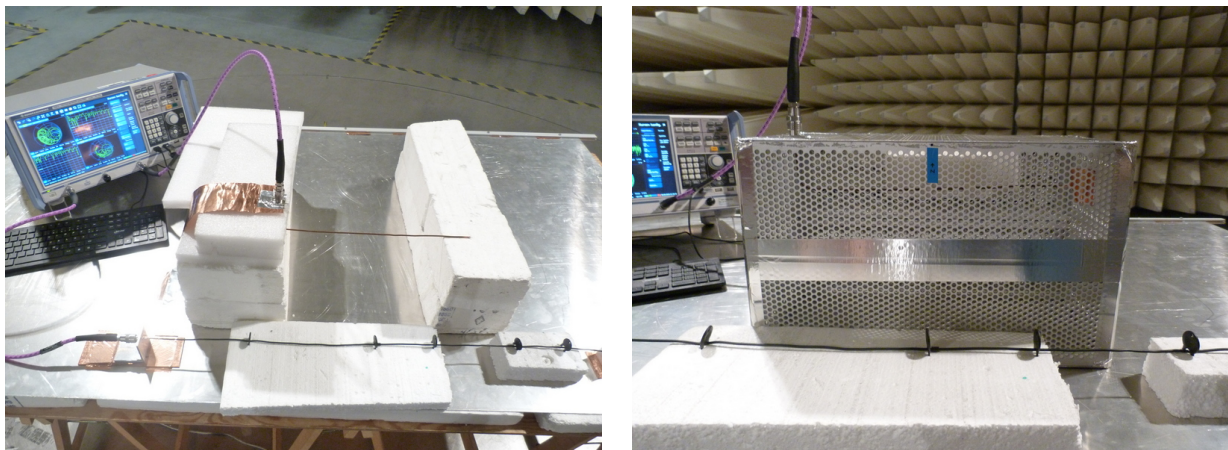


Abbildung 8: Messaufbau der Leitungskopplung. Links: Referenzmessung mit offener Senderleitung. Rechts: Messung mit abgedichtetem Gehäuse (6 HE).

wurden alle Konfigurationen und Orientierungen einbezogen. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 9. Bei diesem Gehäuse sieht man den Einfluss der Apertur auf der Vorderseite deutlich bei der mittleren Schirmdämpfung $\langle A_S \rangle$ über den gesamten Frequenzbereich. Bis ca. 80 MHz, wo der erste Einbruch auftritt, liegt der Wert bei 40 dB. Das elektrisch geschlossene Gehäuse erreicht mittlere Werte um die 55 dB bis 200 MHz.

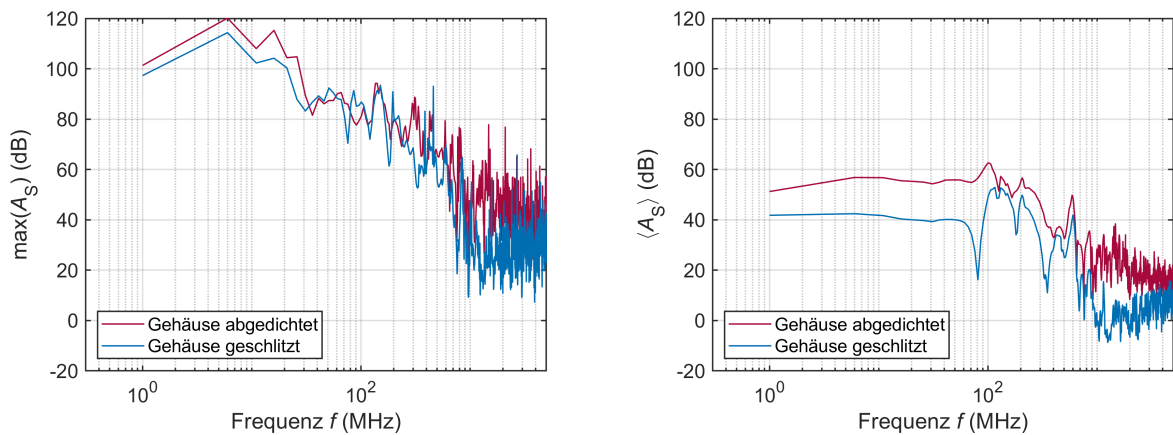


Abbildung 9: Schirmdämpfung für das 6 HE Gehäuse in verschiedenen Konfigurationen. Links: Maximalwert. Rechts: Mittelwert.

5 Vergleich mit der Fernfeldmethode

Die vorgeschlagene Methode zur Bestimmung der Schirmdämpfung wurde mit Hilfe einer weiteren Methode validiert. Dazu wurde der breitbandige Rauschgenerator CNE VI [8] mit hoher Ausgangsleistung und angeschlossener Monopolantenne benutzt, und dessen Abstrahlung im Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz in der Absorberhalle gemessen. Die Messentfernung zur Empfangsantenne betrug 3 m und es wurden Bodenabsorber verwendet. Die Höhe der Empfangsantenne betrug 1 m. Abbildung 10 zeigt beispielhaft den Aufbau für die Referenzmessung und für die Messung mit dem 6 HE Gehäuse. Die Schirmdämpfungswerte wurden ebenfalls über die Substitutions-

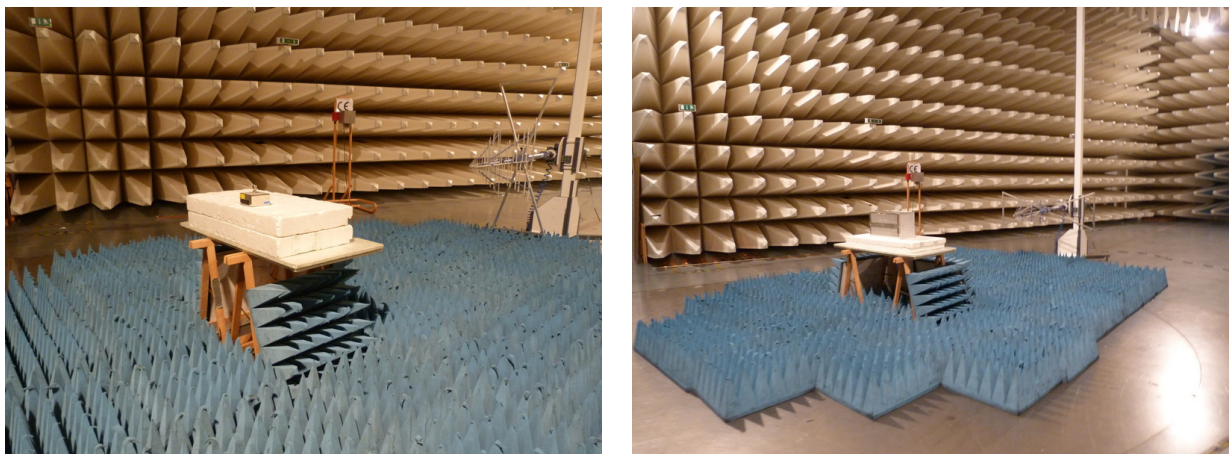


Abbildung 10: Messaufbau der Fernfeldmethode. Links: Referenzmessung mit Rauschgenerator. Rechts: Messung mit Gehäuse (6 HE).

methode ermittelt. Sowohl für die Referenzmessung als auch für die Messung mit dem Gehäuse wurde der maximale Wert pro Frequenz, gebildet aus den beiden Polarisierungen der Empfangsantenne, den vier Drehwinkeln (je 90°) und den drei Orientierungen des Gehäuses, berechnet. Durch Differenzbildung der Feldstärkepegel in $\text{dB } \mu\text{V m}^{-1}$ lässt sich auch für die Fernfeldmethode eine mittlere Schirmdämpfung angeben:

$$\langle A_S \rangle = [\max(L_{E,\text{Ref},k}) - \max(L_{E,k})] \text{ dB} \quad (3)$$

Den Vergleich mit den Ergebnissen der Leitungskopplungsmethode zeigt, getrennt nach den Gehäusegrößen, Abbildung 11. Eine gute Übereinstimmung der Werte ist oberhalb von 70 MHz zu

erkennen. Unterhalb ist die Messdynamik bei der Fernfeldmethode nicht ausreichend, um verlässliche Ergebnisse zu liefern. Der Rauschgenerator hat zwar eine hohe Ausgangsamplitude und auf der Empfängerseite wurde ein Vorverstärker verwendet, aber die Schirmwirkung der Gehäuse ist in diesem Frequenzbereich zu gut.

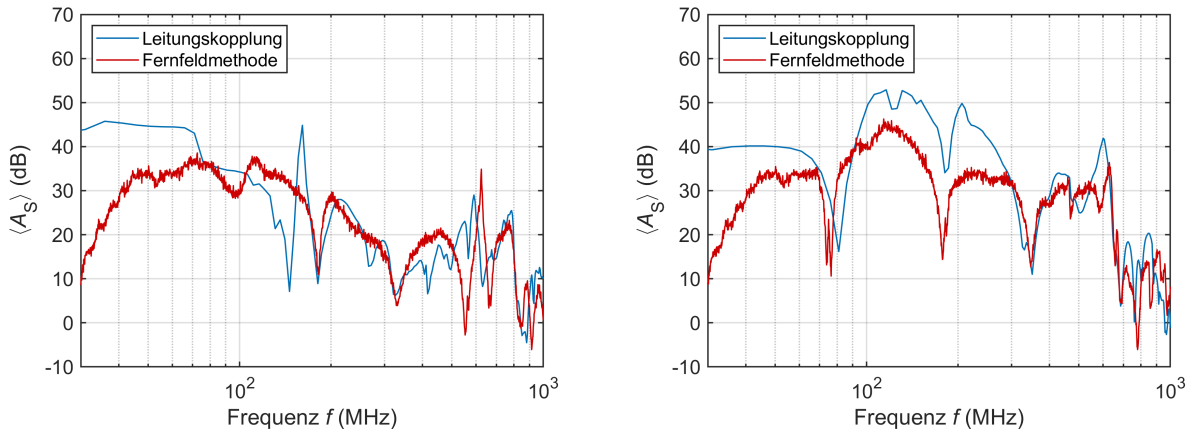


Abbildung 11: Vergleich der durch unterschiedliche Messmethoden ermittelten Schirmdämpfung. Links: Gehäuse mit 3 HE. Rechts: Gehäuse mit 6 HE.

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde eine neue vereinfachte Methode zur Ermittlung der Schirmdämpfung von metallischen Gehäusen vorgestellt. Das messtechnische Verfahren bringt einen Vorteil bei der Messzeit. Nach nur 2 Stunden kann man eine Aussage über die Schirmungswirkung treffen. Der Messaufbau benötigt nicht viel Platz und es genügt ein geschirmter Raum zur Durchführung der Tests. Es werden keine HF-Antennen und HF-Verstärker benötigt. Die Verwendung eines Netzwerkanalysators erlaubt eine hohe Messdynamik, welche bei guten Schirmgehäusen vorteilhaft ist.

Es konnte gezeigt werden, dass durch Variation der Orientierung zwischen Gehäuse und äußerer Leitung eine mittlere Schirmdämpfung berechnet werden kann. Durch Variation der Abschlussimpedanz von Sender- und Empfängerleitung (Leerlauf, Kurzschluss) lässt sich entweder ein dominantes elektrisches oder dominantes magnetisches Feld erzeugen und dementsprechend eine mittlere elektrische oder magnetische Schirmdämpfung angeben.

Das neue Verfahren wurde mit der Fernfeldmethode verglichen, bei der das von einem Sender abgestrahlte elektromagnetische Feld mit und ohne Gehäuse mit Hilfe einer breitbandigen Antenne gemessen wird. Hier zeigte sich allgemein eine sehr gute Übereinstimmung der Werte mit der Leitungskopplungsmethode und im Speziellen der Vorteil einer höheren Messdynamik bei Verwendung eines Netzwerkanalysators im Frequenzbereich bis 70 MHz.

Die untersuchten Gehäuse haben kompakte Abmaße. Eine Untersuchung der Wirksamkeit des neuen Verfahrens für größere Gehäuse ist noch offen.

Literatur

- [1] „nVent Schroff EuropacPRO 19“. (2023), Adresse: <http://schroff.nvent.com>.
- [2] „IEEE 299-2006 – Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures,“ IEEE Standards Association, Norm, Feb. 2007.
- [3] „IEEE 299.1-2013 – Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having all Dimensions between 0.1m and 2m,“ IEEE Standards Association, Norm, Jan. 2014.

- [4] „MIL-STD-285 – Military Standard: Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes,“ U.S. Government Printing Office, Washington, USA, Norm, Juni 1956.
- [5] „NSA 94-106 – Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures,“ National Security Agency, Fort Meade, MD, USA, Norm, Okt. 1994.
- [6] „DIN EN 50147-1 – Absorberräume – Teil 1: Schirmdämpfungsmessung,“ VDE Verlag, Berlin, D, Norm, Juli 1996.
- [7] „DIN EN 61587-3 – Mechanische Bauweisen für elektronische Einrichtungen – Prüfungen für IEC 60917 und IEC 60297 – Teil 3: Schirmdämpfungsprüfungen für Schränke und Baugruppenträger,“ VDE Verlag, Berlin, D, Norm, Nov. 2013.
- [8] „Eurofins York CNE VI.“ (2023), Adresse: <https://www.yorkemc.com/products/cne-comparison-noise-emitters/cne-vi/>.