

Einfluss der Kontaktierung auf die Schirmdämpfung von Gehäusen

M. Eng. Michael Kühn, AUDI AG, I/EE-25, 85045 Ingolstadt

B. Eng. Marcel Messer, AUDI AG, I/EE-25, 85045 Ingolstadt

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel, FAU Erlangen, Lehrstuhl Technische Elektronik, Cauerstrasse 9, 91058 Erlangen

1 Einleitung

Nach Ansicht der Bundesregierung ist die Elektromobilität ein elementarer Baustein für eine zukunftsweisende und emissionsarme Mobilität. Außerdem bietet die Elektromobilität die Möglichkeit, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu minimieren. Ein Elektrofahrzeug benötigt einen Energiespeicher (HV-Batterie), eine Leistungselektronik sowie eine elektrische Maschine respektive Antriebseinheit inklusive Getriebe. Die Leistungselektronik fungiert hierbei als Pulswechselrichter und erzeugt aus der Gleichspannung der HV-Batterie einen 3-phasigen-Sinusstrom für den Antrieb der elektrischen Maschine. Die Spannungslage des HV-Bordnetzes bzw. des Traktionsnetzes (DC-Seite) bewegt sich zwischen 300V bis 800V. Das nachfolgende Bild 1 stellt die Dramaturgie der Elektromobilität und der EMV dar.

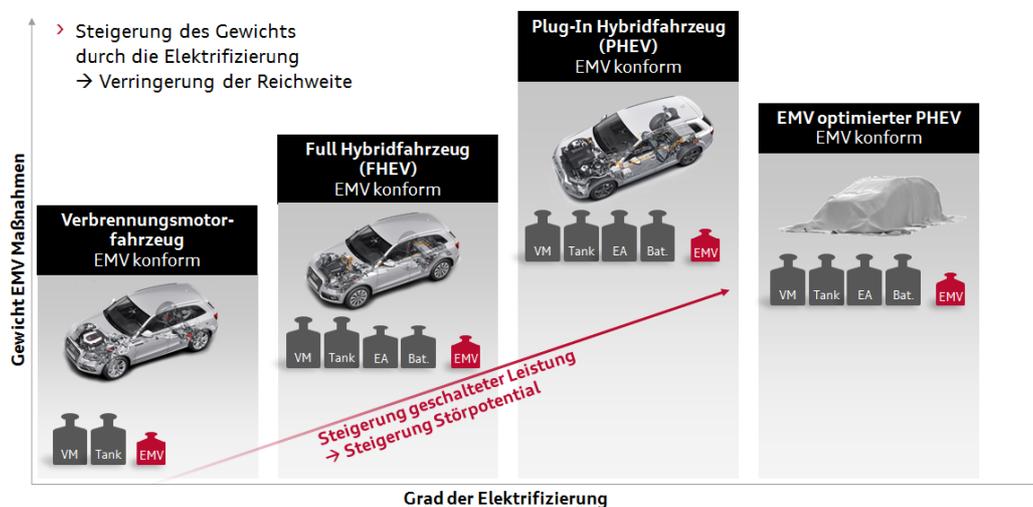


Bild 1: Gewicht der EMV-Maßnahmen in Abhängigkeit der Elektrifizierung

Es ist offensichtlich, dass zwischen einem konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und einem Plug-In Hybridfahrzeug (PHEV) ein deutlicher Gewichtsunterschied besteht. Dies ist einerseits den zusätzlichen HV-Komponenten geschuldet, andererseits aber auch den EMV-Maßnahmen. Diese EMV-Maßnahmen sind beispielsweise für Sicherheitsanforderungen, aber auch für die Entstörung der Rundfunk- und Datendienste erforderlich. Auch das HV-Bordnetz sowie sämtliche HV-Komponenten sind vollständig geschirmt ausgeführt. Dabei stellt sich häufig die Frage, wie bestehende Anforderungen bezüglich der Schirmdämpfung umzusetzen sind und welchen Einfluss die

Parameter haben. Oder anders gesagt, wie können EMV-Anforderungen in mechanische Werte übersetzt werden.

2 Schirmdämpfungsanforderung für Gehäuse im Automobilbereich

Die gute Nachricht ist, dass es sowohl eine Anforderung als auch ein Messverfahren für die Schirmdämpfung von Gehäusen im Automobilbereich gibt. Leider muss auch in diesem Fall genau geschaut werden, wie die Anforderung messtechnisch zu erfüllen ist. Die Schirmdämpfungsanforderung ist die sogenannte 70/40dB Dämpfungskurve im Frequenzbereich $100\text{kHz} < f < 120\text{MHz}$ gültig ist. Die nachfolgende Gleichung liefert die Berechnungsvorschrift:

$$a[\text{dB}] = 70\text{dB} - 30\text{dB} \frac{f}{\frac{100\text{kHz}}{120\text{MHz}}}$$

Diese Dämpfungskurve deckt beispielsweise die folgenden Funkdienste ab: Langwelle (LW), Mittelwelle (MW) und Ultrakurzwelle (UKW). Dem gegenüber steht die DIN EN 61000-5-7 (siehe [1]), welche Kennzeichnungen, Prüfanforderungen und –verfahren für das elektromagnetische Schirmverhalten von leeren Gehäusen bietet. Weiterhin unterteilt die Norm drei Frequenzbereiche:

- Niederfrequenzbereich: $10\text{kHz} < f < 30\text{MHz}$
- Mittelfrequenzbereich: $30\text{MHz} < f < 1\text{GHz}$
- Hochfrequenzbereich: $1\text{GHz} < f < 40\text{GHz}$

Speziell interessant für diesen Beitrag sind der Nieder- und Mittelfrequenzbereich, da dort auch die 70/40dB Dämpfungskurve (teilweise) gültig ist. Die Norm sieht für den Niederfrequenzbereich eine Messung mit der Rahmenantenne, also eine Messung des magnetischen Feldes vor. Die Anforderung sieht bei 100kHz eine Schirmdämpfung von 70dB vor, was für die Schirmung von magnetischen Feldern nur mit hochleitfähigen Material sowie entsprechender Materialdicke zu erreichen ist. Daher stellt sich die Frage, woher kommt die 70/40dB Dämpfungsanforderung bzw. wie wurde es hergeleitet. Die 70/40dB Dämpfungskurve wurde aus der Differenz der gestrahlten Störaussendung nach CISPR 25 (ALSE-Methode) einer 12V- und einer HV-Komponente bestimmt. Dies bedeutet ferner, dass die Anforderung auf Basis einer E-Feld Messung mit der Stabantenne basiert, folglich muss auch im Niederfrequenzbereich mit der Stab- anstelle der Rahmenantenne gemessen werden. Sämtliche Messergebnisse in diesem Beitrag basieren auf dieser Argumentationskette und verwenden die Stabantenne im Niederfrequenzbereich.

3 Einflussfaktoren auf die Schirmdämpfung

Sicherlich einer der größten Einflussfaktoren auf Gehäuseebene ist die Kontaktierung der Gehäuseteile (z.B. Deckel- und Bodenteil). Beispielsweise funktioniert ein Faraday'scher Käfig nur bei adäquater Verbindung der beiden Platten, was sich auch auf das zweiteilige Gehäuse übertragen lässt (siehe [2] für tiefergehende Informationen). Die einfachste Art der Kontaktierung sowohl aus mechanischer, als auch aus elektrischer Perspektive ist die Schraubverbindung zwischen den beiden Gehäuseteilen. Eine Schraubverbindung ist

natürlich nur eine punktuelle Verbindung und garantiert keine flächige Verbindung. Sollte sich zusätzlich noch eine Dichtung aus nicht leitfähigem Kunststoff zwischen Deckel- und Bodenteil befinden, ist eine Feldeinkopplung durch die so entstehenden Schlitzte möglich. In diesem Beitrag soll aber ein anderer Effekt im Vordergrund stehen, welcher sich auf Basis des nachfolgenden Bild 2 beschreiben lässt.

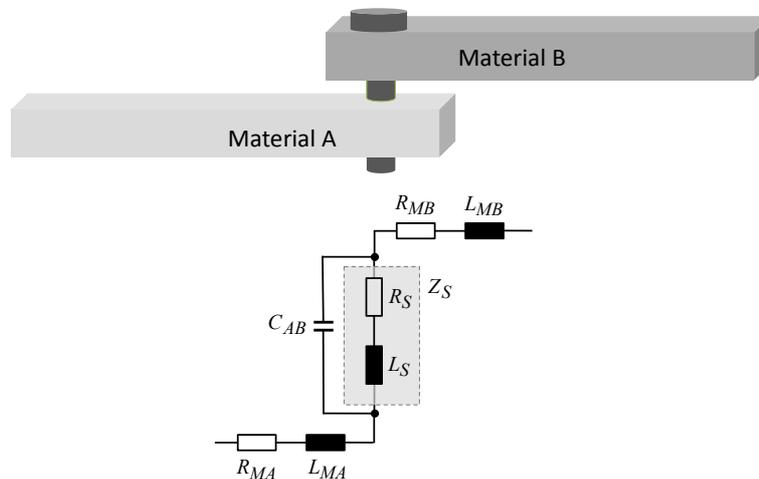


Bild 2: Elektrisches Ersatzschaltbild einer Schraubverbindung

Die Abbildung 2 zeigt eine singuläre Schraubverbindung von zwei elektrisch leitfähigen Materialien mit dem dazugehörigen elektrischen Ersatzschaltbild. Die Materialien werden modelliert durch eine Reihenschaltung eines Widerstands und einer Induktivität, die Schraubverbindung ebenfalls durch eine solche Reihenschaltung und der Luftraum dazwischen ist mit einer Kapazität abgebildet. Hierbei fällt auf, dass diese Konstellation nichts Anderes als ein Parallelresonanzschwingkreis ist. Nun übertragen wir diesen Gedankengang auf ein Gehäuse bestehend aus Deckel- und Bodenteil mit n Schraubverbindungen (siehe Bild 3).

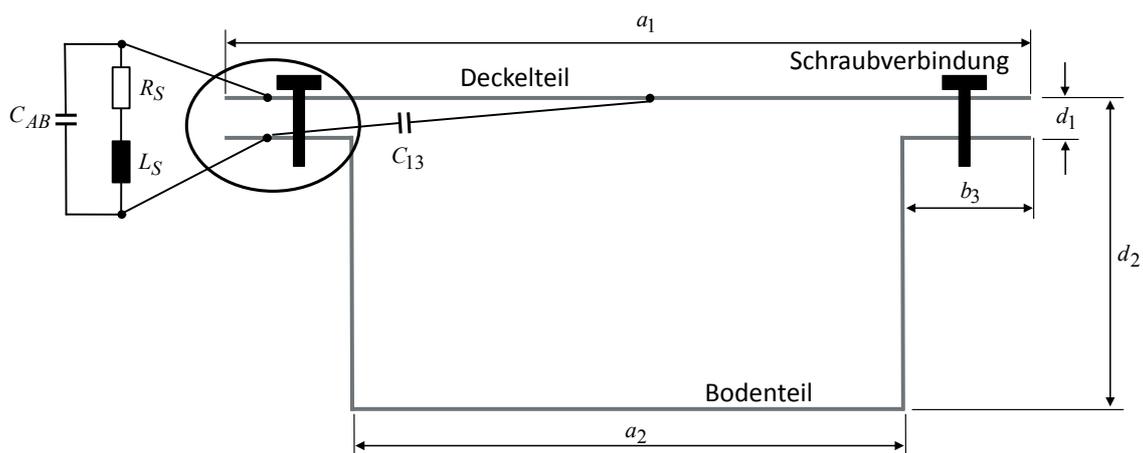


Bild 3: Übersicht elektrische Parameter auf Gehäuseebene

Auch hier ist offensichtlich, dass diese Parallelresonanzschwingkreis für jede Schraubverbindung existieren und eine analytische Abschätzung zeigte, dass die

Resonanzfrequenz im Mittelfrequenzbereich ($30\text{MHz} < f < 1\text{GHz}$) liegen muss. Offensichtlich ist, dass diese Schwingkreise erstens geometrieabhängig sind und zweitens von der Anzahl an Kontaktierungspunkten n abhängen.

4 Vorbereitung der Impedanz- und Schirmdämpfungsmessungen

Zunächst einmal wurde ein Demonstratorgehäuse benötigt, welches sich an der Geometrie des Gehäuses aus Abbildung 3 orientiert. Die Abmessungen (L, B, H) des Aluminiumgehäuses sind mit 0,3m, 0,3m und 0,2m bei einer Wandstärke von $t=1\text{mm}$ angegeben. Weiterhin verfügt das Gehäuse über einen 3cm breiten Kragen für die Kontaktierung sowie M3 Bohrungen im Abstand von 2,8cm. Das Deckelteil ist lediglich als Platte mit der Materialstärke t ausgeführt. Für eine Bestätigung der Überlegungen aus Kapitel 3 war es erforderlich Impedanzmessungen am Demonstratorgehäuse durchzuführen. Hierfür wurde ein Messverfahren verwendet, welches mittels eines einfachen 2-Port-Netzwerkanalyzer den niederohmigen Impedanzverlauf im Frequenzbereich korrekt messen kann. Das Messprinzip ähnelt einem 4-Leiter-Messverfahren, wobei Port 1 den Strom liefert und die Spannungsmessung via Port 2 erfolgt. Die Berechnung der Impedanz erfolgt dann durch kleinere Umformungen des gemessenen S_{21} Parameters. Das Messverfahren ist ausführlich in [3] beschrieben. Die Schirmdämpfungsmessungen wurden auf Basis von [1] durchgeführt, jedoch mit einer Stabantenne statt einer Rahmenantenne für den Niederfrequenzbereich (siehe Kapitel 2). Zusätzlich zu den Messungen wurden auch numerische Feldsimulationen mit CST Microwave Studio durchgeführt, um den Sachverhalt besser nachvollziehen zu können. Die nachfolgende Tabelle listet die im Rahmen dieses Beitrags durchgeführten bzw. vorgestellten Mess- und Simulationsergebnisse. Das Ziel soll es sein, dass durch die unterschiedlichen Parameterkonstellationen des Abstand d sowie der Anzahl an Kontaktierungspunkte n , die Resonanzstelle entsprechend im Spektrum wandert.

Setup	Abstand d [mm]	Anzahl Schraubverbindungen n
S ₂	1,5	1
S ₃	1,5	4
S ₄	1,5	12
S ₆	4,5	1
S ₈	4,5	12
S ₁₀	13,5	1

Tabelle 1: Übersicht Messungen/Simulationen am Demonstratorgehäuse

5 Mess- und Simulationsergebnisse

Das nachfolgende Bild 4 zeigt den Impedanzverlauf des Demonstratorgehäuses bei Variation der Anzahl von Kontaktierungspunkten n .

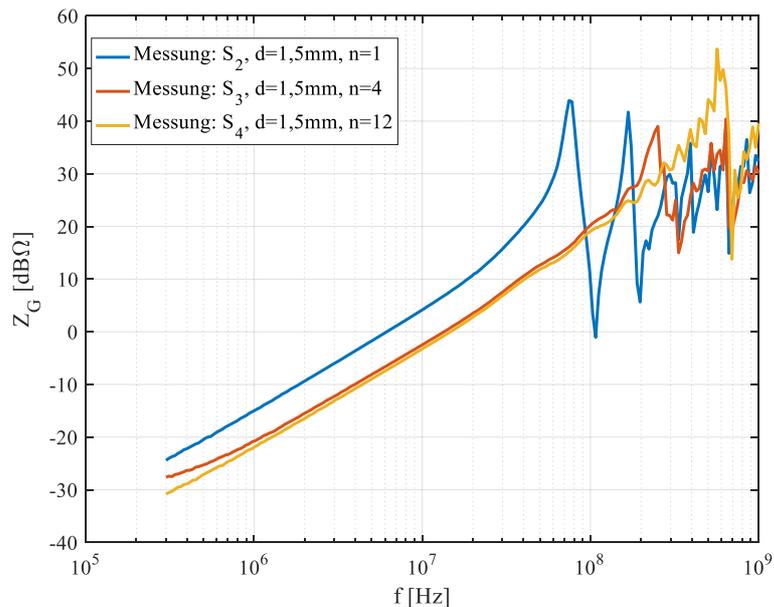


Bild 4: Impedanzmessung Demonstratorgehäuse, Variation der Kontaktierungspunkte

Es ist zu erkennen, dass die Resonanzstelle bei steigender Anzahl an Kontaktierungspunkten im Spektrum nach hinten wandert. Besonders interessant hierbei ist, dass die Resonanzstelle für $n=1$ im Frequenzbereich der 70/40dB Dämpfungsanforderung liegt. Das nächste Bild 5 zeigt den Impedanzverlauf für unterschiedliche Abstände d zwischen Deckel- und Bodenteil. Im Gegensatz zu Bild 4 ist hier die Verschiebung der Resonanzstelle nur leicht wahrnehmbar. Dennoch ist mit steigendem Abstand auch eine Verschiebung der Resonanzstelle nach oben erkennbar.

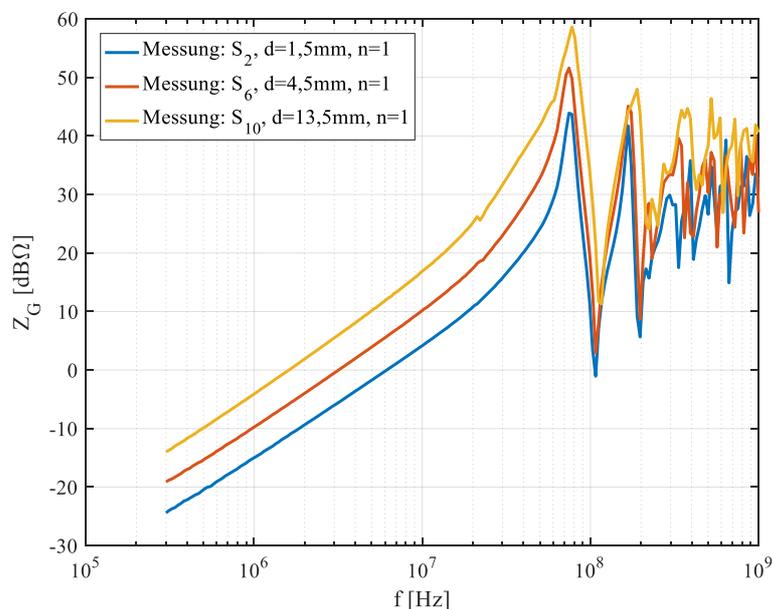


Bild 5: Impedanzmessung Demonstratorgehäuse, Variation des Abstands

Das nachfolgende Bild 6 zeigt einen Vergleich zwischen der Impedanzmessung, der korrespondierenden Simulation und einer analytischen Abschätzung. Es ist zu erkennen, dass die Messung und die Simulation eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen. Die

erste charakteristische Resonanz sowie die nachfolgenden Resonanzstellen wurden hinreichend gut durch die Simulation abgebildet.

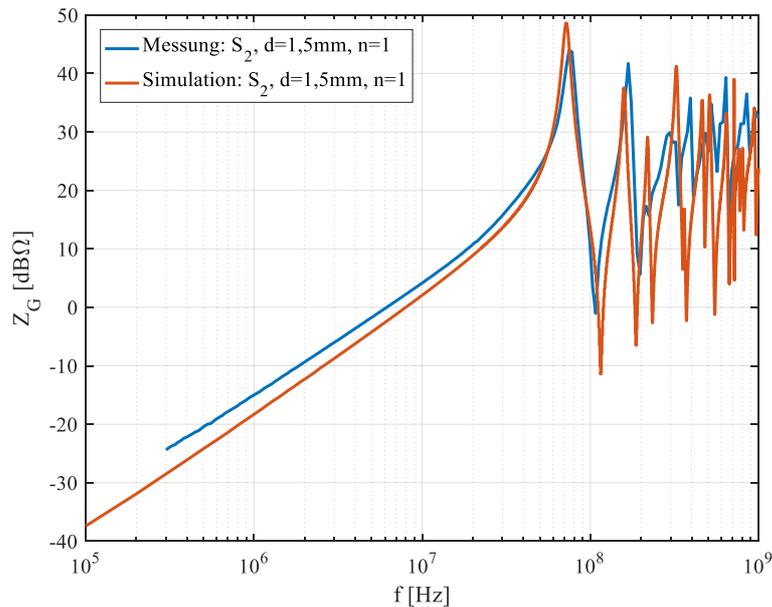


Bild 6: Vergleich Impedanzmessung und Simulation für S2

Das nächste Bild 7 zeigt abschließend das Ergebnis der Schirmdämpfungsmessung und -simulation für Setup S8. Hier ist die 70/40dB Dämpfungsanforderung im Plot visualisiert.

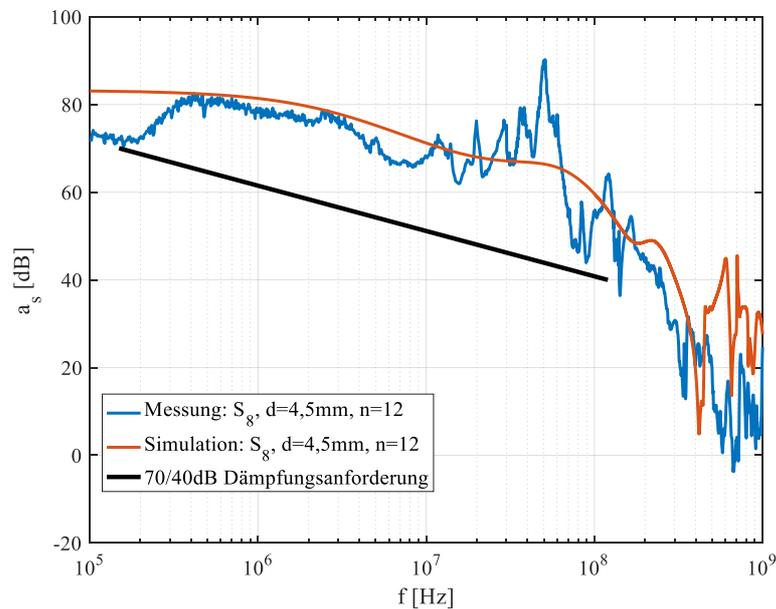


Bild 7: Vergleich Schirmdämpfungsmessung und Simulation für S8

Dieser Plot zeigt, dass die Einhaltung der Grenzwertkurve nicht unmöglich ist. Auch zeigt sich ein interessanter Verlauf der Schirmdämpfung, welcher durch die Theorie (siehe [2]) bestätigt wird. Die Simulation mittelt prinzipiell diesen Verlauf und weist eine Resonanzstelle bei ca. 400MHz auf. Hier gibt es eine leichte Abweichung zwischen der

Simulation der Messung, welche durch Inhomogenitäten im Demonstratorgehäuse (z.B. Luftspalte, Stauchungen) zu erklären ist.

6 Konklusion

In diesem Beitrag konnte gezeigt werden, dass jede Anforderung genau interpretiert werden muss, um somit keine falsche Erwartungshaltung zu erzeugen. Weiterhin wurde auf einen Effekt (Resonanzstelle) aufmerksam gemacht, welcher durch eine spezielle Parameterkonstellation der Kontaktierung entsteht und deutlich durch Impedanzmessungen nachzuweisen ist. Auch wurde durch eine Variation der charakteristischen Parameter, wie z.B. der Abstand oder die Anzahl an Kontaktierungspunkten, eine Verschiebung der Resonanzstelle bewirkt. Mittels numerischer Feldsimulation konnte der Verlauf der Impedanzkurve korrekt wiedergegeben werden. Zum Schluss wurden noch Schirmdämpfungsmessergebnisse präsentiert, wobei die Simulation hier kleinere Abweichungen aufweist, aber das physikalische Verhalten grundsätzlich korrekt darstellt.

Literaturangaben

- [1] Norm DIN EN 61000-5-7 2001. Elektromagnetische Verträglichkeit Teil 5-7: Installationsrichtlinien und Abhilfemaßnahmen - Schutzarten durch Gehäuse gegen elektromagnetische Störgrößen
- [2] Wolfsperger, H.A.: Elektromagnetische Schirmung: Theorie und Praxisbeispiele. Springer Berlin Heidelberg, 2008 (VDI-Buch)
- [3] Keysight Technologies: Application Note: Ultra-Low Impedance Measurements using 2-Port Measurements. 2014