

EMV-Messverfahren zur Unterstützung des Designs von Schirmkonzepten für Elektrofahrzeuge

Referent: Dipl.-Ing. Karsten Kreisch, EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str. 76, 44227 Dortmund, Deutschland, kreisch@emc-test.de

Co-Autor: Dipl.-Ing. Jörg Bärenfänger, EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str. 76, 44227 Dortmund, Deutschland, baerenfaenger@emc-test.de

Co-Autor: B.Ing. Ramzi Hasni, EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str. 76, 44227 Dortmund, Deutschland, hasni@emc-test.de

1 Einleitung

Elektrofahrzeuge mit ihren hohen elektrischen Leistungsdichten und ausgeprägten Emissionsspektren stellen in vielerlei Hinsicht hohe Anforderungen an das ihren elektrischen Antriebsstrang umgebende Schirmkonstrukt. Die kurze Distanz zwischen effizienter Hochvolt(HV)-Leistungselektronik als Störquelle und elektromagnetisch sensitiven Verbrauchern, wie beispielsweise Rundfunkempfängern, erfordert hohe Schirmdämpfung an allen Komponenten des Schirms, namentlich den Gehäusen, Hochvoltsteckern und –kabeln.

Gehäuse von Hochvoltkomponenten in Elektrofahrzeugen müssen neben der Schirmwirkung eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen: niedrige Gestehungs- und Entsorgungskosten sind ebenso Faktoren, wie auch niedriges Gewicht bei gleichzeitiger Robustheit. Auch die Verarbeitbarkeit, möglicherweise sogar im 3D-Druck, mit den Bestreben optimaler Raumausnutzung, sei hier als Beispiel genannt.

Um den Prozess der Vorselektion effizienter zu gestalten, können in unterschiedlichen Stadien der Produktreife verschiedene Messverfahren zur Bestimmung der Schirmeigenschaften eingesetzt werden. Die folgenden Messverfahren werden näher auf ihre Eignung für entwicklungsbegleitende Messungen und Abnahmeprüfungen an Schirmmaterialien und –komponenten untersucht: zu Beginn die Messung der intrinsischen Schirmdämpfung von Materialien für den Gehäusebau in der TEM-Zelle [1]. Es folgt eine Einführung in die Messung der Gehäuseschirmdämpfung mit dem Antennenverfahren zur Validierung kompletter Gehäusegeometrien [2]. Es wird auf die Messung der Transferimpedanz von Kabeln, Steckern und Kleingehäusen mit dem Paralleldrahtverfahren [3] eingegangen, zuvor jedoch einige Überlegungen zur Messung der gestrahlten Hochvolt-Niedervolt-Einkopplung getätigt. Letzteres ist in relativ junges Prüfverfahren aus der Automotive-Welt, das die Störstromspeisung (Bulk Current Injection, BCI) mit der (gestrahlten) Emissionsmessung kombiniert [4].

2 Theorie der Schirmdämpfung

Vor der Vorstellung der Messverfahren im Detail soll eine kurze Einführung in die Theorie der elektromagnetischen Schirmdämpfung die Grundlage bilden. Zur weiteren Vertiefung seien beispielsweise die Werke von Kaden [5] und Wolfsperger [6] empfohlen. Eine

Schirmkonstruktion (Schirm) soll in einem Elektrofahrzeug eine Barriere für die in seinem Inneren von der Hochvolt-Elektronik erzeugten hochfrequenten elektromagnetischen Wellen zur Außenwelt darstellen. Als eine Störquelle kann die Motor-PWM genannt werden, die ein ausgeprägtes Oberwellenspektrum erzeugt. Im Allgemeinen wird, wie in (01) zu sehen, die elektromagnetische Schirmdämpfung a_s als Verhältnis zwischen der auf der einen Seite eines Schirms existierenden elektrischen Leistung P_{in} und deren anteilig auf der anderen Seite des Schirms emittierten Leistung P_{out} dargestellt [6]:

$$a_s = \left| \frac{P_{in}}{P_{out}} \right|. \quad (01)$$

Schirmdämpfung ist eine frequenzabhängige Materialeigenschaft. Unterschiede in Messergebnissen sind somit verfahrensbedingt, beispielsweise durch Geometrie- oder Materialänderungen oder das Messverfahren selbst.

Die frequenzabhängige Veränderlichkeit der Schirmwirkung eines Schirms kann gut anhand des Transferimpedanzverlaufs eines Koaxialkabelschirms erläutert werden, schematisch dargestellt in Bild 1a). Die Transferimpedanz Z'_T [mΩ/m] errechnet sich aus dem Spannungsabfall U zwischen Kabelschirminnenseite und Innenleiter, der einen (Wechsel-)Strom I_{st} erzeugt, welcher über den Kabelschirm der Länge l_k fließt. Der gebildete Quotient entspricht dem Ohm'schen Gesetz als Belag und ist in Formel (02) dargestellt [5].

$$Z'_T = \frac{U}{I_{st} \cdot l_k}. \quad (02)$$

So wie die Schirmdämpfung beschreibt die Transferimpedanz den Effekt eines äußeren elektromagnetischen Feldes auf das Innere des Schirms, ist allerdings eher für elektrisch kurze Aufbauten gebräuchlich.

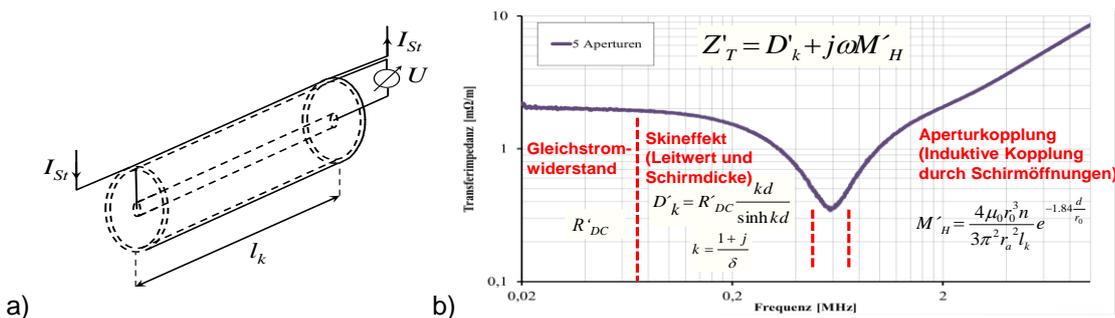


Bild 1: a) Strom und Spannungsabfall über einem Kabelschirm b) Charakteristischer Verlauf der Transferimpedanz eines Kupfervollmantelkabelschirms mit 5 Löchern zu je 1mm Durchmesser

Wie sich die Transferimpedanz eines Kabelschirms in Abhängigkeit von der Frequenz ändert, ist in Bild 1b) und in Formel (03) gezeigt. Bei tiefen Frequenzen entspricht die Transferimpedanz dem Gleichstromwiderstandsbelag eines Kabelschirms, bis seine Wanddicke groß gegenüber der Skineindringtiefe des elektromagnetischen Feldes wird. In Bild 1b) setzt diese Stromverdrängung in den Außenbereich des Schirms bei ca. 50kHz ein. Die Diffusionskopplung D'_k genannte Komponente der Transferimpedanz nimmt also ab. Um 1 MHz herum nimmt die Transferimpedanz dann wieder sichtbar zu, die

Schirmwirkung verschlechtert sich also, da nun die Löcher im Kabelschirm eine Induktion einer Spannung von den den Schirm umgebenden Magnetfeldern in den Innenraum des Kabels zulassen. Diese Kopplungsart M'_H wird Aperturkopplung genannt und steigt proportional zur Frequenz [7].

$$Z'_T = D'_k + j\omega M'_H. \quad (03)$$

Diese Kopplungsmechanismen werden auf den nächsten Seiten in verschiedenen Messungen vorkommen. Es sind allerdings nicht die einzigen, da Kopplungsmodelle ein weites Feld der Simulation von Schirmdämpfungseigenschaften bilden.

3 Messung der intrinsischen Schirmdämpfung von Materialproben mit der TEM-Zelle nach ASTM D4935-10

Dieses Verfahren stellt als einzige Anforderung an das Schirmmaterial, dass man es schneiden und mit Löchern versehen kann. Allzu poröse oder weiche Materialien sind schwer integrierbar, auch sollte die Dicke maximal im Zentimeterbereich liegen. Dass die fertigungstechnischen Anforderungen ansonsten gering sind, erklärt sich mit der Simplizität des Messaufbaus: man stelle sich ein 50Ω -Koaxialkabel vor, das einen Sender und einen Empfänger direkt miteinander verbindet. In seiner Mitte wird es nun über eine Länge von ca. 20cm der Durchmesser auf 10cm proportional vergrößert und in der Mitte geteilt. In diesen entstandenen Querschnitt durch den Koaxialleiter kann nun die Materialprobe eingebracht werden. In Bild 2 ist der Messaufbau nebst seinen stark vereinfachten Ersatzschaltbildern zu sehen [1].

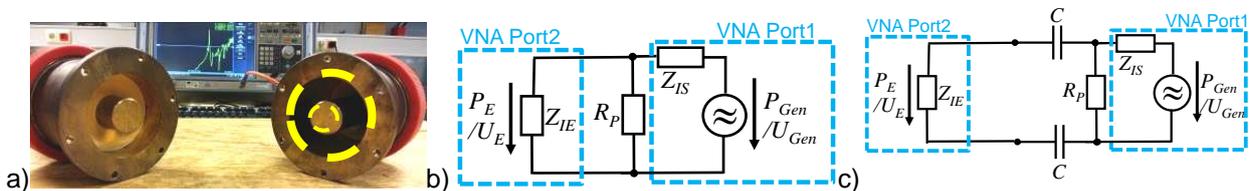


Bild 2: a) Messaufbau mit Netzwerkanalysator und geöffneter TEM-Zelle b) Vereinfachtes Ersatzschaltbild (ESB) des Messaufbaus mit homogener leitfähiger Probe und c) mit Probe mit nichtleitender Oberfläche

Besteht die Probe aus einem durchgehend leitfähigen Material, so schließt sie die beiden Hälften der TEM Zelle sowie deren Innen- und Außenleiter gegeneinander kurz. R_P stellt im Ersatzschaltbild in Bild 2b) die Probe dar. In Längsrichtung werden die Übergangswiderstände aufgrund der großen Kontaktflächen vernachlässigbar klein, zumindest ist dies für dünne Proben mit hohen Leitwerten und großen Oberflächen der Fall. Die Systemeinfügedämpfung des Messaufbaus (Beispielsweise der Streuparameter S_{21} bei einem Netzwerkanalysator) wird aufgenommen. Nimmt man eine Kupferscheibe von 0,5mm als Probe, so geht ihre Schirmdämpfung für hohe Frequenzen gegen Unendlich. In Bild 3a) ist dies die „S21 Vollmaterial“ genannte Messung. Nur bis ca. 0,5 MHz ist die Skineindringtiefe groß genug, um ein nicht verrauschtes Signal am Empfänger zu erzeugen. Diese Messung entspricht bereits bis auf einen kleinen Fehler der Schirmdämpfung „as Kupferscheibe“. Der Fehler entsteht durch die Messung auf der 0dB-Linie, „S21 leer“. Ihre Bedeutung wird anhand des nächsten Beispiels verdeutlicht. Bei einer makroskopisch betrachtet homogenen Probe mit geringerem Leitwert, wie zum Beispiel aus leitfähigen Polymeren, wird diese Kurve nach oben rechts expandiert (blauer Pfeil).

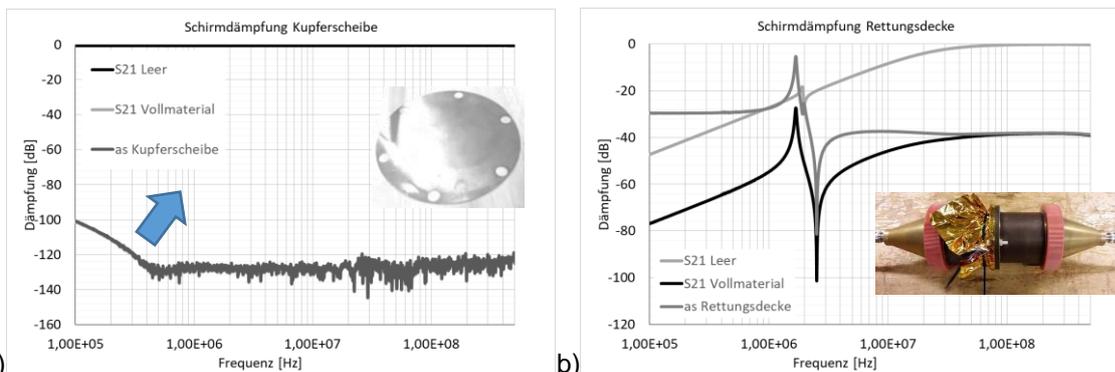


Bild 3: a) Schirmdämpfungsmessung an 0,5mm-Kupferscheibe b) Schirmdämpfungsmessung an Rettungsdecke

Besitzt eine Materialprobe eine nichtleitende Oberfläche, wie beispielsweise den Kunstharzlack auf einem Faserverbundwerkstoff (GFK, CFK) so sind die beiden Hälften der TEM-Zelle nicht mehr satt kurzgeschlossen. Auch bei metallisierten Kunststoffen ist dieser Effekt zu beobachten, da die einzelnen Partikel voneinander isoliert sind. Dieses Verhalten, das keine Schirmeigenschaft darstellt, muss herauskalibriert werden. Dazu wird eine identische Probe vermessen, die im Bereich des Querschnitts der TEM-Zelle, wo sich der Isolator des Koaxialleiters befindet, ausgespart ist. Es wird also nur die gelb gestrichelt markierte Fläche in Bild 2a) abgedeckt. Somit kann die Probe quasi direkt mit der Schirmdämpfung von Luft verglichen werden. Bei der Kupferprobe stellt die Leerprobe nur einen satten Kurzschluss ohne nennenswerte Dämpfung dar. „S21 Leer“ zeigt deren Messergebnis in Bild 3a).

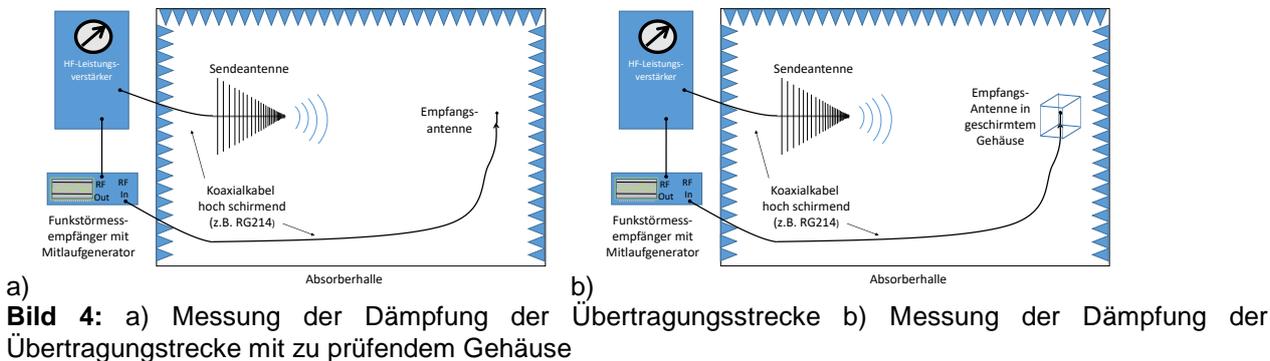
Anders verhält es sich, wenn stattdessen eine Rettungsdecke aus aluminiumbeschichtetem Kunststoff stellvertretend für einen Verbundwerkstoff gemessen wird: durch die Kunststoffolie entsteht die in Bild 2c) dargestellte kapazitive Kopplung von der einen auf die andere Hälfte der TEM-Zelle. Das Messergebnis ist in Bild 3b) zu sehen: neben einer starken Resonanz, die eine Eigenschaft des Aufbaus darstellt, um 1 MHz ist außerdem ab 100kHz der für einen Hochpass 1.Ordnung charakteristische Pegelanstieg um 20dB/Dekade zu sehen. Hier handelt es sich nicht um Schirmdämpfung sondern schlicht um Dämpfung. Im Gegensatz zur Kupferscheibe ist hier ein Unterschied zwischen der durch die Kalibrierung errechneten Schirmdämpfung „as“ und der Systemeinfügedämpfung „S21 Vollmaterial“ erkennbar.

4 Messung der Gehäuseschirmdämpfung mit der Antennenmethode gemäß DIN EN 610005-7

Hat man nun das geeignete Material für ein Gehäuse oder Gehäuseteil gefunden, ist möglicherweise das nächste Ziel, dessen Schirmwirkung in einem Komplettgehäuse zu prüfen. Hier erhöht sich die Komplexität des Prüfverfahrens gegenüber dem in der TEM-Zelle erheblich.

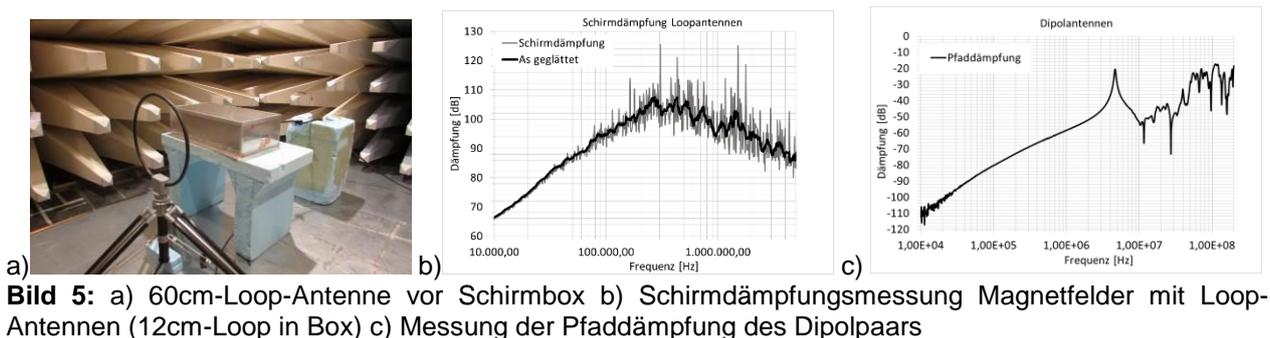
Die Vorgehensweise ist folgende: in einer (Teil-) Absorberhalle wird eine Sende- so auf eine Empfangsantenne ausgerichtet dass die Empfangsleistung optimiert wird, wie in Bild 4a) dargestellt. Nun wird eine definierte Leistung durch die Sendeantenne emittiert und der von der Empfangsantenne empfangene Pegel protokolliert. Anschließend wird die Empfangsantenne mit dem zu prüfenden Gehäuse umbaut, und erneut die bereits erwähnte Leistung gesendet. Bild 4b) zeigt den Aufbau. Der nun gemessene Pegel wird

vom zuvor gemessenen abgezogen, wenn die Leistungen in dBm angegeben sind. Mit dieser Methode wird der Aufbau mit all seinen Dämpfungsparametern herauskalibriert, übrig bleibt nur die Dämpfung des die Empfangsantenne umgebenden schirmenden Gehäuses. Die Ähnlichkeit zur Vorgehensweise bei der TEM-Zelle ist nicht zufällig [3].



Die Einfachheit der Datenauswertung ist ein Vorteil dieser Art von Prüfungen. Allerdings eine umfangreiche Prozedur der Geräteselektion und ein Austarieren ihrer Eigenschaften vorangegangen. Erstrebenswert ist ein maximaler Signal-Rauschabstand, beispielsweise wie in Bild 3a), wo über 120dB Schirmdämpfung messbar sind. Bild 3b) zeigt dann, wie die Messdynamik wegen der Messwerte der Leerprobe um bis zu 50dB bei 100kHz reduziert wird. Mit langen Zuleitungen und kleinen Antennen in großen Abständen zueinander sind 50dB Dynamikverlust auch keine Seltenheit.

Konkrete Problemstellung: eine Schirmbox mit mehreren Kammern, abgebildet in Bild 5a) und Bild 6b), soll auf eine Mindestschirmdämpfung von 80dB überprüft werden. Ab 30 MHz soll eine Dipolantenne zum Einsatz kommen, darunter eine Loop-Antenne. Allerdings hat die Vorkammer die Abmessungen von ca. LxBxH 30x40x25 cm. Es können also nur kleine Antennen verwendet werden, die eher im hohen 3-stelligen MHz oder GHz-Bereich zum Einsatz kommen. Dementsprechend niedrig ist ihr Wirkungsgrad oder Gewinn bei 30 MHz. Die Pfaddämpfung eines Dipolpaars mit 24dB-Vorverstärker in 3m Abstand ist in Bild 5c) zu sehen. Diese Pfaddämpfung muss überwunden werden, um valide Schirmdämpfungsergebnisse zu erhalten.



Gut zu sehen ist in Bild 5b), wie mit den Schleifenantennen die Wanddicke der Aluminiumbox messbar ist. Als Plausibilitätskontrolle genügt ein Blick in die Schirmdämpfungstabellen in [6]. Für einen Wandabstand von 10cm und 10kHz Frequenz werden 2,7mm Wandstärke für 60dB Schirmdämpfung für Aluminium angegeben, bei 100kHz 1,8mm für 100dB. Bei einer Wanddicke von 2mm und einem Wandabstand von 40 cm kann man von einer guten Übereinstimmung sprechen. Über 500kHz ist die

Schirmdämpfung der Box größer als die Messdynamik, die bei minimal 80dB liegt. Somit ist sie als Peripherie für die gestrahlte Hochvolt-Niedervolt-Koppeldämpfung geeignet. Auch wäre ihre Schirmdämpfung hoch genug, um sie als Träger für Werkstoffproben zu verwenden. Diese könnten in Form von Deckeln oder als Füllmaterial gefertigt werden, theoretisch wären auch Schirmdämpfungsmessungen an leitfähigen Flüssigkeiten möglich.

5 Messung der gestrahlten Hochvolt-Niedervolt-Koppeldämpfung gemäß CISPR25, 4. Edition

Hintergrund dieses Prüfverfahrens ist die Notwendigkeit, das Emissionsverhalten des Hochvolt-Systems, beziehungsweise dessen potentiellen Einfluss auf die Niedervolt-Kreise des Elektrofahrzeugs zu bestimmen. Das schließt auch eine Bestimmung der Performance des Schirms ein. Dazu muss die Komponente in einem repräsentativen, Betriebszustand laufen, der vor der Prüfung in der Prüfspezifikation zu definieren ist. Dies bedeutet beispielsweise, dass die HV-Kreise aktiv sind. Der prinzipielle Aufbau gemäß CISPR25-4th Ed. ist in Bild 6a) dargestellt, in Bild 6b) die Schirmbox aus dem vorherigen Kapitel im Einsatz.

Nun geschieht folgendes: in den Hochvolt-Kabelbaum wird mit einer BCI-Zange, also galvanisch getrennt, ein hochfrequenter Strom eingepreßt, der an der Hochvolt-Netznachbildung eine Spannung erzeugt, die den Grenzwerten für die Störspannung an der Hochvolt-Netznachbildung entspricht. An der Antenne wird gemessen, ob die Abstrahlung des Signals aus dem Hochvolt-Kabelbaum die Emissionsanforderungen an das Gesamtsystem erfüllt [4].

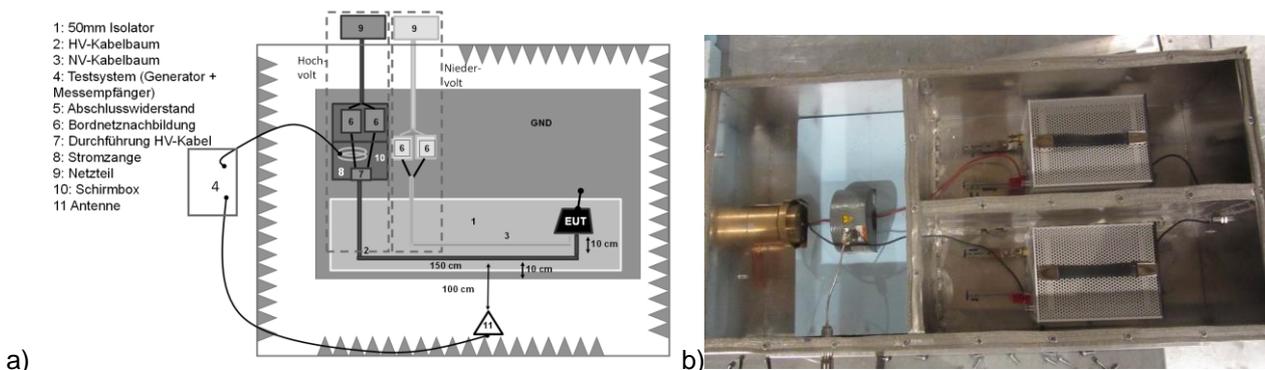


Bild 6: a) Schematischer Prüfaufbau b) Schirmbox mit Bordnetznachbildungen und BCI-Zange um HV+

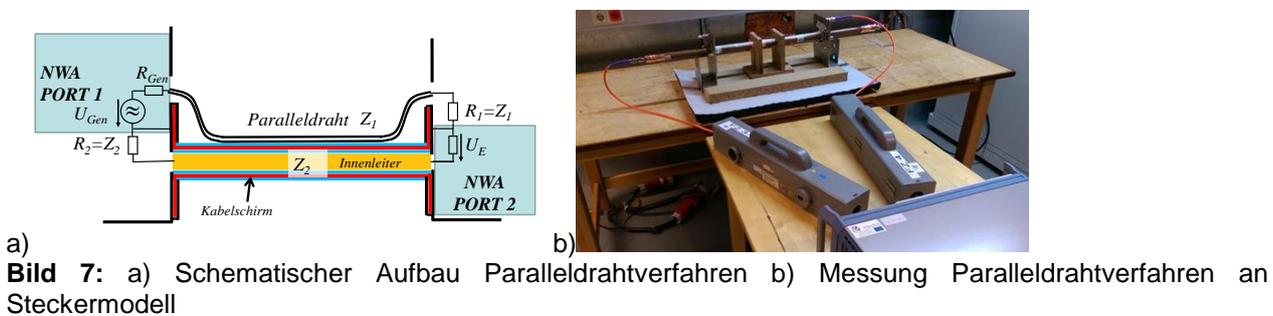
An dieser Stelle sollen in erster Linie einige Überlegungen zur Vorgehensweise gemacht werden. Das Verfahren liefert einige wichtige Informationen, die die Integration der Hochvoltkomponente in das Gesamtfahrzeug ermöglicht.

Eine Komponente, die keine hochfrequenten Anteile im HV-Bordnetz erzeugt, beispielsweise ein DC-Heizelement, kann ein fehlerhaftes Schirmkonzept besitzen, durch das andere sich im Schirm befindliche Baugruppen abstrahlen können, ohne dass dies vor der Fahrzeugprüfung auffallen würde. Somit ist die Prüfung zwar nicht direkt eine Schirmdämpfungsmessung, aber ein Nachweis, dass das Design des Schirms den Anforderungen an das Gesamtfahrzeugkonzept genügt. Es ist allerdings zu beachten, dass die Niedervoltebene keine Pegel über den Grenzwerten der gestrahlten Emission

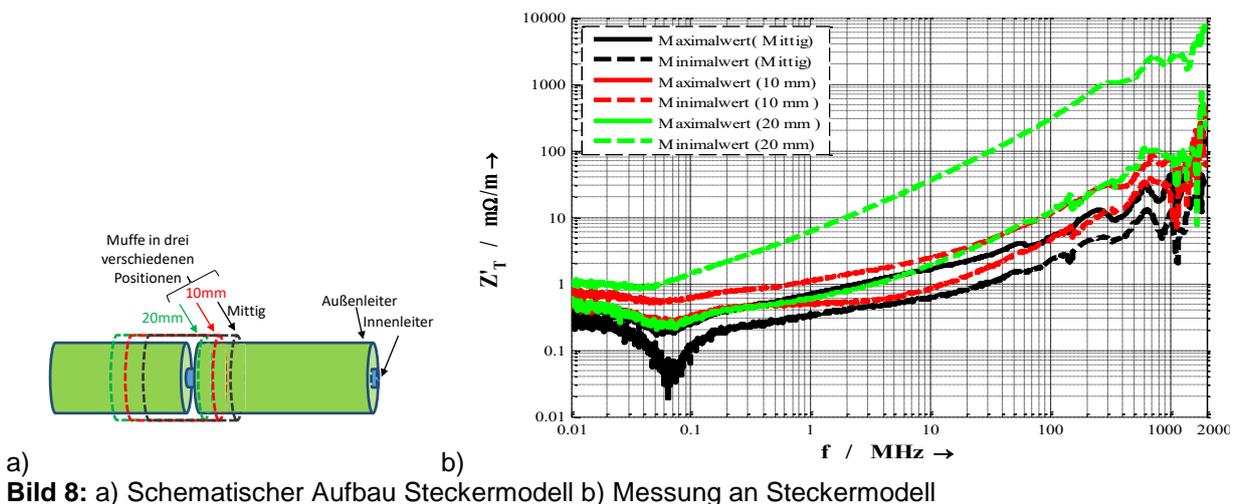
aussenden sollte, da an diesen Frequenzen keine Bewertung der Schirmperformance beziehungsweise des Abstrahlverhaltens des HV-Kreises erfolgen kann.

6 Transferimpedanzmessung mit dem Paralleldrahtverfahren gem. IEC 62153-4-6 (2017-08)

Das Paralleldrahtverfahren zur Bestimmung der Transferimpedanz von Kabeln und konfektionierten Steckverbindern, schematisch dargestellt in Bild 7a) und fotografisch in Bild 7b), besitzt im Wesentlichen 2 Vorteile: zum einen können fast beliebig komplexe Strukturen vermessen werden, falls ein Paralleldraht darüber gezogen werden kann, zum anderen können mit kompakten Messaufbauten valide Messergebnisse für die Schirmperformance im Mittelwellen- und UKW-Bereich gewonnen werden. Dank der Norm IEC 62153-4-6 von 2017 steht eine moderne Prüfgrundlage zur Verfügung, die die Anforderungen an das Messverfahren bei Messungen von Hochvoltkabeln und –steckern umgesetzt hat. So ist eine Messung ohne Impedanzkorrekturglied zwischen Prüfling (Z_2) und Empfängerport (50Ω) gestattet, was die Prüfung erheblich vereinfacht [3].



6.1 Messung der Transferimpedanz von Designmerkmalen eines Steckverbinders anhand eines Modells



Im Rahmen einer Bachelorarbeit [8] fand eine Untersuchung statt, wie sich der Formschluss eines Steckverbinders auf dessen Transferimpedanz auswirken kann, möglicherweise auch durch Verschleiß im Laufe eines Fahrzeuglebens. Ein Steckermodell ist als 50-Ohm-System aus handelsüblichen Kupferrohren aufgebaut, ein Foto ist in Bild 7b) zu sehen, als Steckerbinder dient eine dazu passende, verschiebbare

Muffe, deren Überlappung variiert wird. Sie ist in Bild 8a) abgebildet. Gemäß [3] kann die Transferimpedanz mit Formel (04) aus dem Streuparameter S_{21} in dB berechnet werden:

$$Z'_T = \frac{2}{l_k} \cdot R_1 \cdot 10^{\frac{S_{21,dB}}{20}} \quad (04)$$

R_1 ist die Terminierung des Paralleldrahtes, l_k die Koppellänge von 0,5m. Es wurden aus mehreren Wiederholungen der Messungen die Minimal- und Maximalwerte festgehalten.

Zu erkennen ist in Bild 8b), wie die Transferimpedanz von der Qualität der Fügestelle abhängt. Je weiter die Kante der Muffe aus der Mittenposition (Mittig) in Richtung des Spaltes zwischen den beiden Aufbauhälften wandert, desto höher werden die Transferimpedanzwerte. Bei minimaler Überlappung steigt die Streuung der Messwerte überproportional an. Der „Maximalwert (20mm)“ stellt somit die Vorstufe zum Wackelkontakt dar, ein kompletter Wegbruch der Schirmung wäre die Folge.

7 Zusammenfassung

Eine Gehäusekomponente für ein Elektrofahrzeug kann während ihres Entwicklungsprozesses mit verschiedenen Normprüfverfahren auf ihre Schirmperformance untersucht werden. Auch gealterte Stichproben, beispielsweise aus dem Feld, können in Prüfaufbauten implementiert werden. Die Materialzusammensetzung und die Geometrie der Proben kann vielleicht die Verfahren, die in Frage kommen einschränken, aufgrund der Vielfalt an Messmethoden ist aber praktisch ausgeschlossen, dass überhaupt keine Informationen über die Schirmwirkung eines Produkts gewonnen werden können.

Literaturangaben

- [1] ASTM D4935-10, Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials¹, 2012
- [2] DIN EN 61000-5-7, Installationsrichtlinien und Abhilfemaßnahmen – Schutzarten durch Gehäuse gegen elektromagnetische Störgrößen (EM Code), 2001
- [3] IEC 62153-4-6 ed 2.0 Metallic cables and other passive components test methods – Part 4-6: Electromagnetic compatibility (EMC) – Surface transfer impedance – Line injection method, 2017-08
- [4] CISPR 25 Ed. 4, Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers 2016-10
- [5] Kaden, Heinrich: Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik, Springer-Verlag / Berlin Göttingen Heidelberg J.F. Bergmann / München, 1959
- [6] Wolfesperger, Hans A.: Elektromagnetische Schirmung Theorie und Praxisbeispiele, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, ISBN 978-3-540-76912-5
- [7] Jung, Lorenz: Einfluß von Schirminhomogenitäten bei Mehrleiterkabeln auf die komplexe Transferimpedanz, Shaker Verlag Aachen, 2003
- [8] Hasni, Ramzi: Experimentelle Untersuchung der Einflüsse von Konstruktionsmerkmalen der in Hybrid-und Elektrofahrzeugen eingesetzten Hochvolt-Steckverbinder auf deren schirmdämpfenden Eigenschaften anhand eines Stecker-Modells, Dortmund, 2015