

Analyse der Schirmungseigenschaften von Kabel-Stecker-Systemen für elektrische Fahrzeuge

M.Sc. Abid Mushtaq, Technische Universität Dortmund, Dortmund

M.Sc. Alexander Zeichner, Technische Universität Dortmund, Dortmund

Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, Technische Universität Dortmund, Dortmund

1 Einleitung

Die Forschung der vergangenen Jahre bezüglich der EMV von geschirmten Kabeln und Steckern wurde hauptsächlich durch die Kommunikationstechnik vorangetrieben. Die dort eingesetzten Systeme arbeiten in der Regel bei niedrigen Spannungspegeln. Moderne Fahrzeuge, wie Hybrid- oder Elektroautos nutzen elektrische Antriebssysteme, die bei Spannungen von 300 V bis etwa 1 kV arbeiten und zur Leistungsübertragung HV-Kabel verwenden. Auf Grund der hohen Leistungen sind neue Probleme bei der elektromagnetischen Verträglichkeit von solchen HV-Kabel-Stecker-Systemen entstanden. Zur Charakterisierung der EMV-Eigenschaften werden Messmethoden, wie das Paralleldraht-Verfahren (engl. Line Injektion Method, LIM) bzw. das Triaxial-Verfahren verwendet. Damit wird die Schirmeffektivität von HV-Kabeln ermittelt. Für die Analyse von HV-Kabel-Stecker-Systemen gibt es im Kfz-Bereich noch keine etablierten Methoden. Häufig wird ein modifiziertes Line-Injection-Verfahren verwendet. Aufgrund der voluminösen HV-Stecker ist dieses Verfahren jedoch mit vielen Freiheitsgraden verbunden und es ist schwer, reproduzierbare Ergebnisse zu bekommen. Die Autoren haben vor kurzem eine neuen Methode, die Ground Plate Method (GPM) [1], vorgeschlagen. Damit kann die Transferimpedanz Z_T von HV-Kabeln und HV-Kabel-Stecker-Systemen in ähnlichen Aufbauten gemessen werden. Diese Methode wird hier kritisch mit dem Triaxial-Verfahren und LIM verglichen. Die Analysen zeigen, dass die GPM ähnliche Ergebnisse für HV-Kabel und HV-Kabel-Stecker-Systeme liefert.

2 Verfahren zur Messung der Transferimpedanz (Z_T)

Die Transferimpedanz Z_T [2] ist definiert durch:

$$Z_T = \frac{1}{I_{Shield}} \frac{dV_{Shield}}{dl} \text{ (}\Omega/\text{m)} \left. \vphantom{\frac{1}{I_{Shield}} \frac{dV_{Shield}}{dl}} \right\} \text{ Transferimpedanz} \quad (1)$$

Z_T kann als eine Übertragungsfunktion betrachtet werden, wo ein Strom auf einer Seite des Schirms eine Spannung auf der anderen Seite des Schirms erzeugt. Wie in beispielsweise [3,4] erläutert, entspricht sie bei niedrigen Frequenzen dem Kupferwiderstan. Bei höheren Frequenzen setzt die Stromverdrängung ein, die für eine Entkopplung zwischen der Innenseite und Außenseite des Schirms sorgt. Bei noch höheren Frequenzen wird die Transferimpedanz bei Geflechschirmen durch den Aufbau des Geflechts bestimmt. Allgemein verwendete Methoden, um Z_T zu messen, sind das Triaxial-Verfahren und LIM. Beide Messmethoden wurden grundsätzlich entworfen, um Kommunikationskabel zu prüfen, werden zurzeit aber auch verwendet, um die Transferimpedanz von HV-Kabel und HV-Kabel-Stecker-Systemen zu messen. Abb. 1 zeigt die Basis für beide Messmethoden [5], die als zwei Stromkreise mit dem Schirm als der verbindenden Komponente nachgebildet werden können. Sowohl NWA-Ports als auch die Widerstände (R_{1P} und R_{2P}) sind 50 Ω .

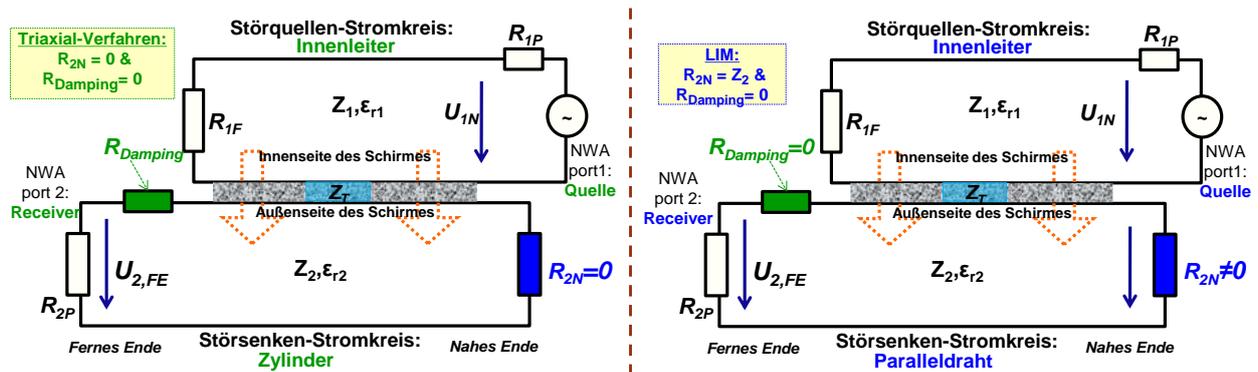


Abbildung 1: Schematischer Aufbau von Triaxial-Verfahren und LIM

Wie in [5] gezeigt wurde, können die Quell- und Empfängerseite vertauscht werden, weil das System reziprok ist.

2.1 Triaxial-Verfahren

Wie in Abb. 1 für das Triaxial-Verfahren [6] dargestellt, wird über Port 1 der innere Stromkreis (Störquellen-Stromkreis) gespeist, der Spannungsabfall über dem Außenschirm wird an Port 2 des Außenstromkreises (Störensenken-Stromkreis) mit Hilfe von dem Parameter S_{21} gemessen.

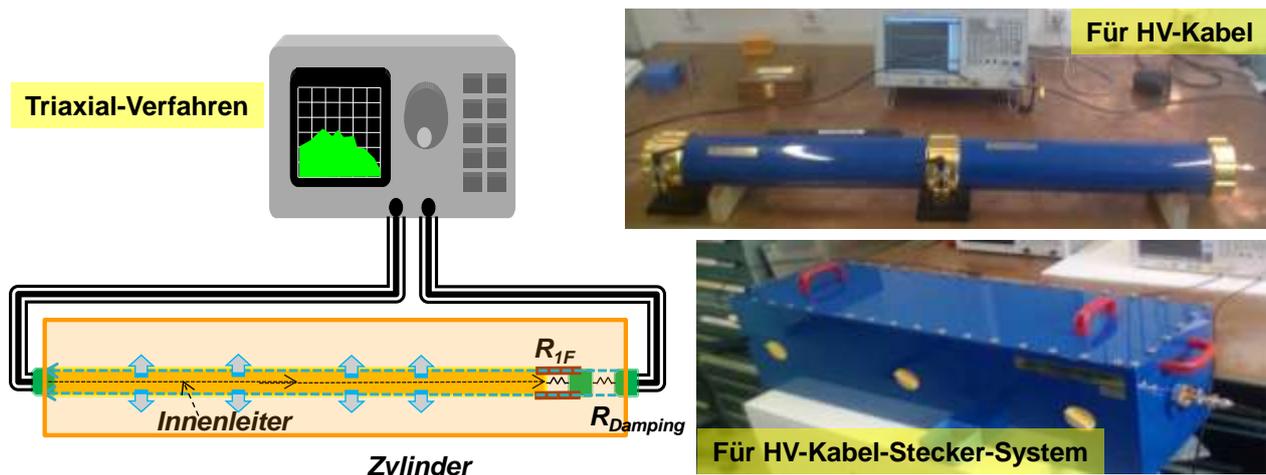


Abbildung 2: Messaufbau des Triaxial-Verfahrens für HV-Kabel und HV-Kabel-Stecker-Systeme

Abb. 2 zeigt die Geometrie des Aufbaus. Z_T kann berechnet werden mit:

$$Z_T = \frac{1}{l} \left(\frac{R_{1P} + R_{1F}}{2} \right) \left(\frac{R_{2P} + R_{Damping}}{R_{2P}} \right) 10^{\left[\frac{S_{21}(dB)}{20} \right]} \quad (2)$$

Die maximale Frequenz, mit der Z_T gemessen werden kann, die als „**cut-off-Frequenz**“ ($f_{cut-off}$) bezeichnet wird, hängt von den Abschlusswiderständen, der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Kabel und der Länge des Systems ab [5,6]. Kommt die Kabellänge in den Bereich von etwa 10% der Wellenlänge, machen sich Resonanzen störend bemerkbar. Verzichtet man auf eine optimale Anpassung der Abschlüsse, bedeutet dies, dass ein 1 m langer Aufbau ab etwa 20 bis 30 MHz keine verlässlichen Ergebnisse mehr liefern kann.

2.2 Paralleldraht-Verfahren (Line Injection Method - LIM)

Wie in Abb. 1 zu sehen, bilden bei der LIM der Paralleldraht und die Kabelschirmung den Störquellen-Stromkreis. Der Innenleiter und der Schirm des Kabels stellen den Störsenken-Stromkreis dar. Die jeweiligen Stromkreise sind mit Terminierungen abgeschlossen, so dass die Leitungen angepasst sind und möglichst wenige Reflexionen (S_{11}) auftreten. Aus der Sicht des Ersatzschaltbildes ist der Hauptunterschied zwischen den Methoden, dass bei dem Triaxial-Verfahren der Störsenken-Stromkreis (äußeres Rohr) am nahen Ende mit dem Kabelschirm kurzgeschlossen, also $R_{2N} = 0$ ist, wohingegen bei der LIM der Störsenken-Stromkreis nicht kurzgeschlossen ist.

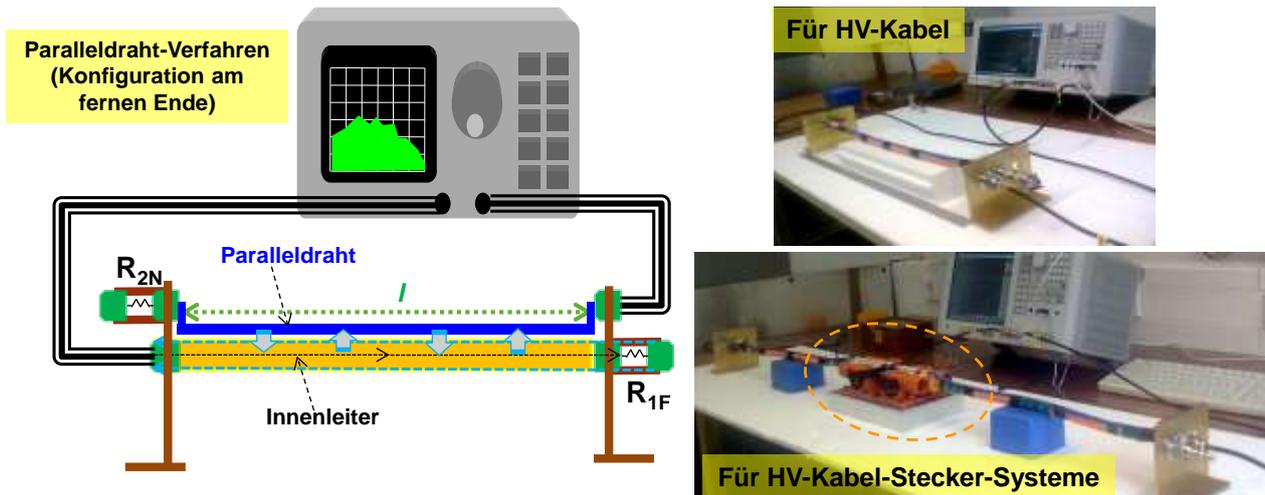


Abbildung 3: Messaufbau nach LIM für ein HV-Kabel und ein HV-Kabel-Stecker-System

Wenn der Netzwerkanalysator wie in Abb. 3 angeschlossen ist, kann die Transferimpedanz des Kabels, mit der Kabellänge l , aus den experimentell bestimmten S_{21} -Parametern berechnet werden:

$$Z_{TE_f} = \frac{2\sqrt{R_{1F}R_{2N}}}{l} 10^{\left(\frac{S_{21}(dB)|_{n,f}}{20}\right)}; \quad (3)$$

Die Breite des parallelen Drahtes wird so gewählt, dass der Wellenwiderstand des Störquellen-Stromkreises ungefähr 50Ω entspricht. Damit kann der Störquellen-Stromkreis mit 50Ω und der Störsenken-Stromkreis mit dem Wellenwiderstand des Kabels abgeschlossen werden. Um eine höhere Genauigkeit bei Frequenzen oberhalb von 100 MHz zu erzielen, ist zu empfehlen für die Terminierung mehrere SMD Widerstände parallel zu verwenden, um parasitäre induktive Effekte zu minimieren. Je höher die Anzahl der parallelen Widerstände, desto niedriger ist die parasitäre Induktivität.

2.3 Ground Plate Method (GPM)

2.3.1 Motivation

In der Automobilindustrie werden HV-Kabel-Stecker-Systeme verwendet, die meist asymmetrisch und relativ groß sind. In solchen Steckern ist die Stromverteilung nicht gleichmäßig [9], was bei der LIM zu schlecht reproduzierbaren Messergebnissen führt. Eine weitere Anforderung ist es, die Effekte des HV-Kabels und des HV-Steckers zu separieren. Ein Vergleich von HV-Kabeln mit und ohne Stecker mit Hilfe der etablierten Verfahren ist schwierig. Verfahren sind wünschenswert, die es erlauben, HV-Kabel und

HV-Kabel-Stecker-Systeme in einer ähnlichen Art und Weise und mit demselben Messaufbau zu vermessen, so dass die Messergebnisse vergleichbar werden. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, die Effekte des HV-Kabels und des HV-Steckers zu trennen und für Verbesserungen der Schirmung separat zu analysieren.

2.3.2 Implementierung der Ground Plate Method (GPM) und Vergleich mit anderen Verfahren

In Anbetracht der Einschränkungen der LIM und des Triaxial-Verfahrens, speziell bei der Analyse der Eigenschaften von HV-Steckern, wird eine neue Methode namens Ground Plate Method (GPM) vorgeschlagen. In Abb. 4 ist ein Vergleich der GPM mit LIM und dem Triaxial-Verfahren dargestellt, wobei die jeweilige Konfiguration des Störquellen-Stromkreises hervorgehoben wird. In der GPM ersetzt die Kupferplatte das Rohr des Triaxial-Verfahrens und sorgt für einen niederimpedanten Rückstrompfad. Der Kabelschirm wird mit Schraubschellen an den Metallwinkeln fixiert und muss niederimpedant mit der Masseplatte verbunden sein. Hier wird kein Dämpfungsglied verwendet, kann aber am fernen Ende eingebaut werden, um die Anpassung einfach zu verbessern.

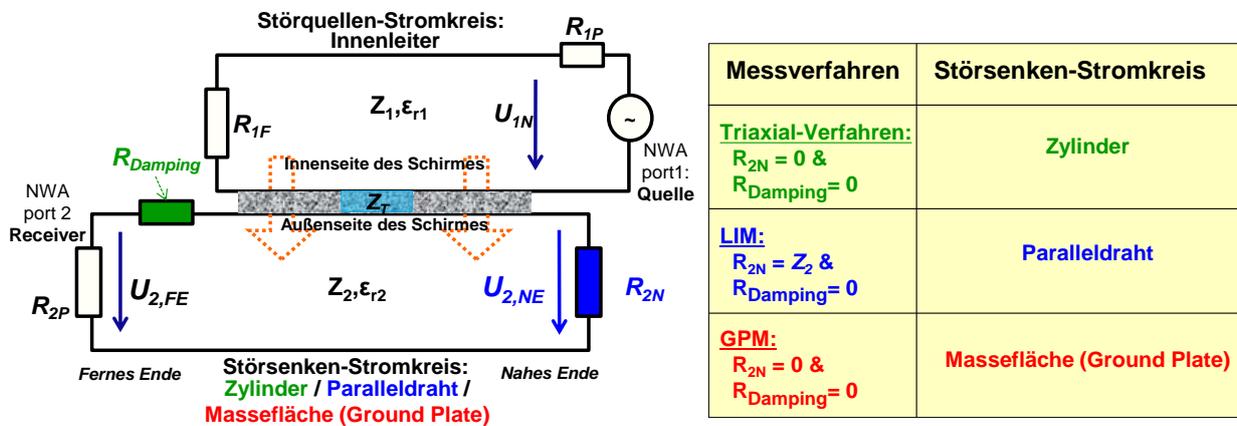


Abbildung 4: Ersatzschaltbild und ein Vergleich der GPM mit der LIM und dem Triaxial-Verfahren

Wie in Abb. 4 und Abb. 5 zu sehen, wird der Störquellen-Stromkreis (Innenleiter, R_{1F} und Innenseite des Schirmes) von der Quelle gespeist, genauso wie bei dem Triaxial-Verfahren. Im Gegensatz zu der Triaxial Methode wird aber bei der GPM der Störquellen-Stromkreis durch die Masseplatte geschlossen, anstatt durch das Rohr. Diese Veränderung im geometrischen Aufbau erlaubt es, beliebig geformte Stecker zu vermessen. Die Transferimpedanz kann aus den gemessenen S_{21} -Parametern, für ein Kabel der Länge l , folgendermaßen berechnet werden:

$$Z_T = \frac{U_{2,FE}}{I_{Immershield} l} = \frac{1}{l} \left(\frac{R_{1P} + R_{1F}}{2} \right) 10^{\frac{[S_{21}(dB)]}{20}} \quad (4)$$

Messungen der Transferimpedanz für ein HV-Kabel und ein HV-Kabel-Stecker-System können, wie in Abb. 5 zu sehen, durchgeführt werden.

In Abb. 5 wird ein Szenario gezeigt, bei dem ein HV-Kabel durch zwei HV-Stecker verbunden wird. In diesem Aufbau war es notwendig, die Stecker in Reihe und in entgegengesetzten Richtungen anzubringen, um den Messaufbau möglichst einfach zu realisieren. Damit kann am fernen Ende eine Terminierung und am nahen Ende eine Quelle angeschlossen werden. An beiden Seiten wird der Schirm mit Schraubschellen an den Metallwinkeln fixiert. Dieser Aufbau ermöglicht einen Vergleich zwischen dem HV-Kabel und dem HV-Kabel-Stecker-System.

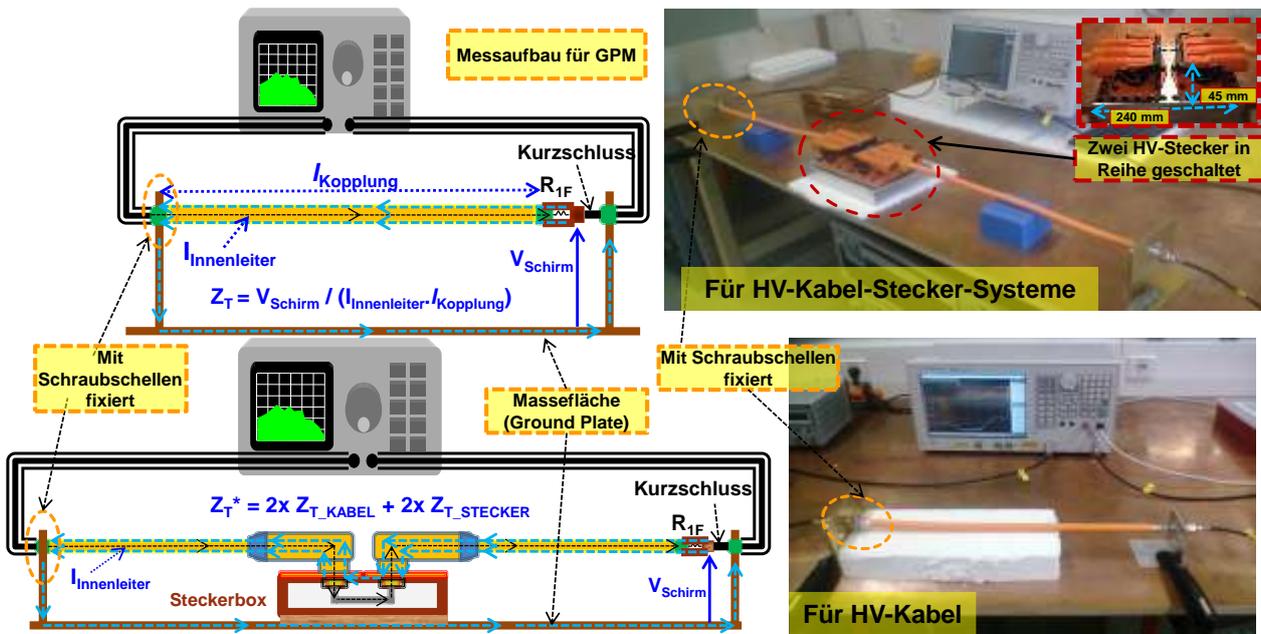


Abbildung 5: Messaufbau der GPM für ein HV-Kabel und HV-Kabel-Stecker-System

3 Ergebnisanalyse und Diskussion

3.1 Messergebnisse für ein HV-Kabel und ein HV-Kabel-Stecker-System

Die Abb. 6 zeigt die Messergebnisse einer Transferimpedanzmessung mit allen drei Messmethoden.

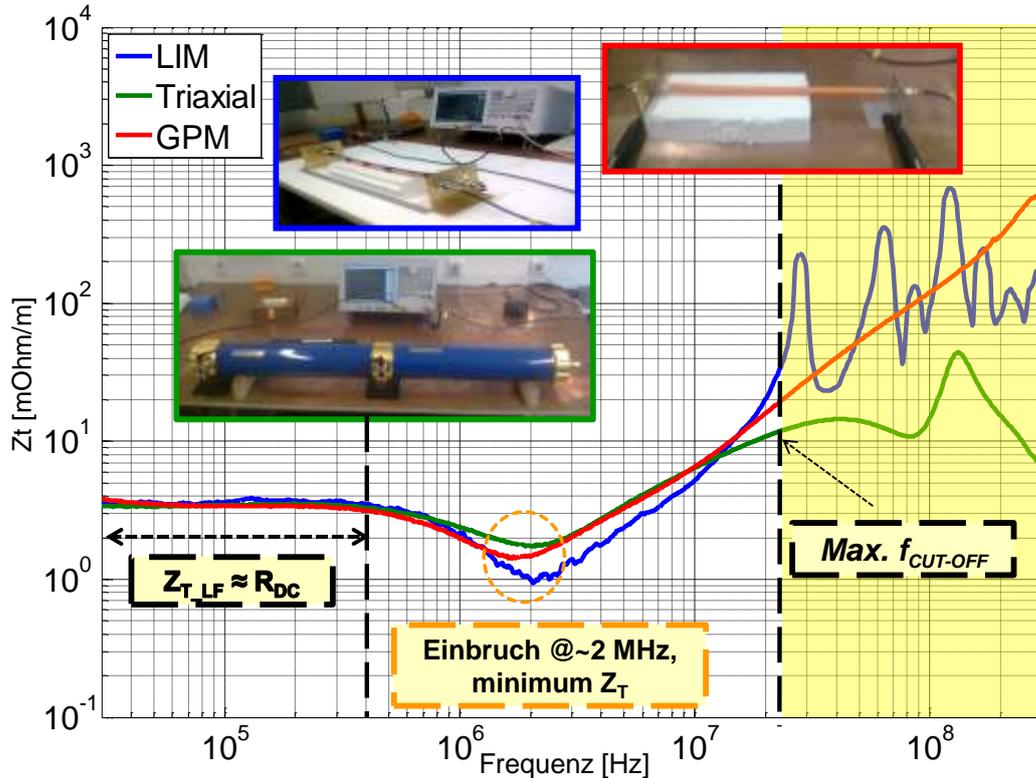


Abbildung 6: Transferimpedanz eines HV-Kabels mit LIM, Triaxial und GPM

Bei niedrigen Frequenzen sind die Messergebnisse der drei Methoden ähnlich und entsprechen dem DC-Widerstand des Schirmes ($Z_{T-LF} = R_{DC}$). Alle drei Kurven weisen einen Einbruch der Transferimpedanz im mittleren Frequenzbereich (~2 MHz) auf.

Dieser Einbruch wird durch Wirbelströme bzw. den Skin-Effekt im Schirmgeflecht verursacht [3-5]. Bei Frequenzen über 2 MHz (in Abb. 5 als Übergangspunkt bezeichnet) steigt Z_T an, hervorgerufen durch die direkte Transmission von elektromagnetischen Feldern durch die Aperturen [9]. Grundsätzlich wird angestrebt, Z_T möglichst niedrig zu halten, weil eine niedrige Transferimpedanz gleichzeitig eine hohe Schirmeffektivität bedeutet [5]. In den Messergebnissen ist zu erkennen, dass die LIM, das Triaxial-Verfahren und die GPM ähnliche Ergebnisse im Frequenzbereich von 10 kHz bis 20 MHz liefern. Bei Frequenzen über 25 MHz ist die Messung nicht mehr verlässlich, weil Ausbreitungseffekte höherer Ordnungen die Ergebnisse beeinflussen. Ähnlichkeiten im Kurvenverlauf bis 20 MHz gibt es auch bei der Z_T Messung eines HV-Kabel-Stecker-Systems bei Anwendung der drei Methoden, dargestellt in Abb. 7. Ein Vergleich der Ergebnisse aus Abb. 6 und Abb. 7 zeigt, dass die induktiven Effekte in einem HV-Kabel-Stecker-System deutlich dominieren. Auf Grund dessen gibt es auch keinen Einbruch der Transferimpedanz bei 2 MHz. Stattdessen fängt Z_T bereits bei ~ 300 kHz an zu steigen.

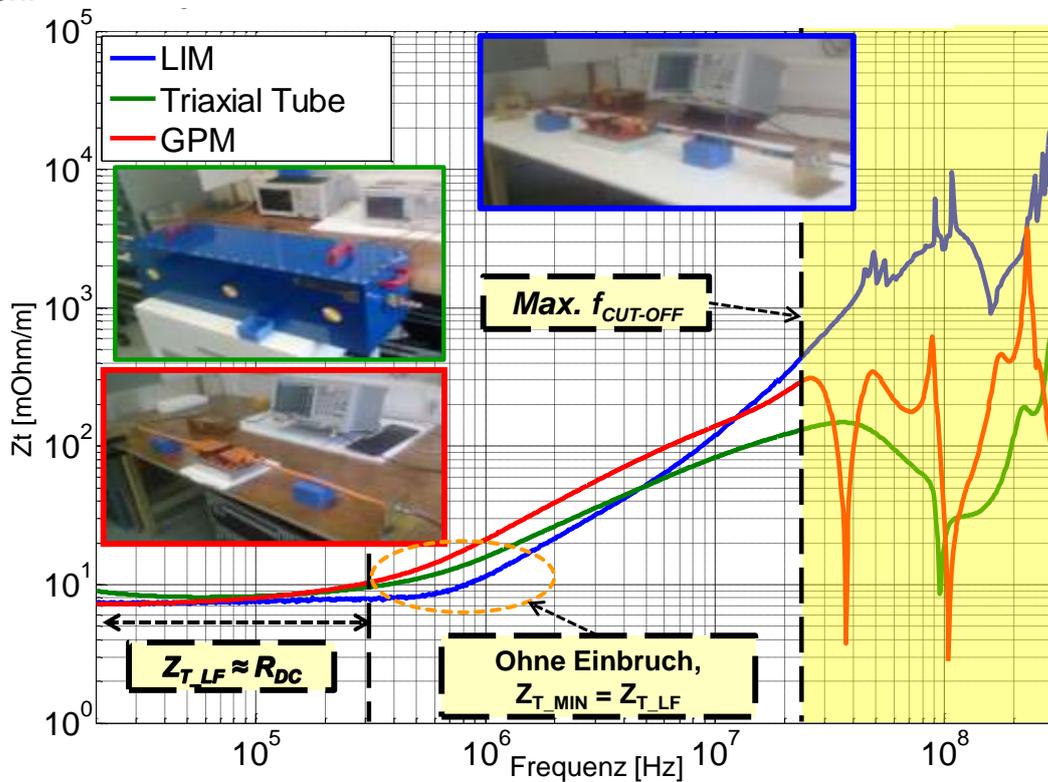


Abbildung 7: Transferimpedanz eines HV-Kabel-Stecker-Systems mit LIM, Triaxial und GPM

Mit allen drei Methoden ist beim HV-Kabel-Stecker-System der Einbruch nicht vorhanden, was darauf hindeutet, dass hier zusätzliche Effekte auftreten, im Gegensatz zum HV-Kabel. Das Problem kann mit dem Modell von Tyni [4] erklärt werden:

$$Z_{T_Tyni} = \begin{cases} Z_{DIFFUSION} + j\omega(L_{HOLE} - L_{BRAID}) & ; \text{For } \alpha < 45^\circ \\ Z_{DIFFUSION} + j\omega(L_{HOLE} + L_{BRAID}) & ; \text{For } \alpha > 45^\circ \end{cases} \quad (5)$$

Für das HV-Kabel zeigt Z_T bis 2 MHz, dass es sich um ein optimiertes Schirmgeflecht handelt, bei dem die Geflecht-Induktivität (L_{BRAID}) des Schirmes der Loch-Induktivität (L_{HOLE}) entgegenwirkt. Bei Anwesenheit von HV-Steckern sinkt L_{BRAID} , weil die Schirmung im Stecker aus einem massiven Schirm besteht. Die Transferimpedanz Z_T steigt in diesem Fall, weil L_{BRAID} klein wird und die Loch-Induktivität L_{HOLE} dominiert.

3.2 Analyse des Niederfrequenz-Widerstandes

Wie bereits beschrieben, entspricht Z_T bei niedrigen Frequenzen dem DC-Widerstand R_{DC} des Schirmes. Um die Messergebnisse des Netzwerkanalysators im Niederfrequenzbereich zu verifizieren, wird ein LCR Meter verwendet. Der DC-Widerstand eines Schirmgeflechtes (nur HV-Kabel) kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$R_0 = \frac{4}{\pi d^2 n C \sigma \cos \alpha} \quad (6)$$

Mit dem Geflecht draht-Durchmesser ($d=0,2$ mm), der Anzahl an Schirmträger ($C=24$), der Anzahl an Drähten pro Schirmträger ($n=8$) und dem Webwinkel ($\alpha=30^\circ$) ergibt sich für das HV-Kabel ein Widerstand von $R_0 = 3,3$ mΩ/m. Mit dem LCR-Meter wurde ein Wert von $R_{LCR} = 3,27$ mΩ/m gemessen. Die Abweichung beträgt 0,9% und der Wert kann als zuverlässig angesehen werden. Tabelle 1 fasst die DC-Widerstandsmessung mit allen drei Methoden und dem LCR Meter zusammen.

Tabelle 1: Zusammenfassung von R_{DC} mit verschiedenen Messverfahren

Samples	Triaxial-Verfahren mΩ/m	LIM mΩ/m	GPM mΩ/m	LCR Meter @ 20Hz mΩ/m
Nur HV-Kabel	3,331	3,43	3,389	3,27
$\Delta R_{DC} = (R_{LCR} - R_{ZT})/R_{LCR}$	0,0187 bzw. 1,87%	0,0489 bzw. 4,89%	0,0364 bzw. 3,64%	-
HV-Kabel-Stecker-System	8,25 @ 100 kHz	7,76 @ 100 kHz	8,20 @ 100 kHz	8,176
$\Delta R_{DC} = (R_{LCR} - R_{ZT})/R_{LCR}$	0,00905 or 0,9%	0,0509 or 5,09%	0,0029 or 0.29%	-

Es gibt eine gute Übereinstimmung zwischen dem gemessenen Z_T mit allen drei Messmethoden (Tabelle 1). Die Abweichungen zwischen dem ermittelten Z_T mit dem Netzwerkanalysator und den Messergebnissen des LCR-Meters liegen bei unter 5%.

3.3 Diskussion der Ergebnisse

Die GPM liefert ähnliche Ergebnisse wie die Triaxial- Methode und LIM bei Frequenzen von 10 kHz bis 20 MHz, sowohl für das HV-Kabel, als auch für das HV-Kabel-Stecker-System. Der Anstieg der Transferimpedanz ab 1 MHz bis 20 MHz ist bei der GPM ähnlich, wie bei den anderen Methoden, jedoch etwas stärker. Die Messergebnisse der GPM bei höheren Frequenzen können damit erklärt werden, dass durch die nicht angepasste Terminierung mehr Probleme mit Reflexionen auftreten. Aber auch die Verbindung des Geflechtes mit den Metallwinkeln mit Hilfe von Schraubchellen kann zu Fehlern führen. Problematisch sind auch die Kontaktierungen mit den HF-Steckern. Eine Aufweitung des Schirmgeflechtes (am nahen Ende) führt zu einer Erhöhung von L_{HOLE} . Wie bereits erwähnt sind die Wirkungen durch die Geflecht-Induktivität und durch die Loch-Induktivität entgegengerichtet. Dennoch ist der Unterschied zu den anderen Methoden in einer gewissen Weise konstant und kann durch Verbesserung der Verbindung zwischen Schirm und Metallwinkel beeinflusst werden. Bei höheren Frequenzen sind die Ergebnisse auch bei der LIM und dem Triaxial-Verfahren stabiler. Mit der vorgestellte Methode (GPM) kann die Transferimpedanz Z_T von HV-Kabeln aber auch HV-Kabel-Stecker-Systemen von 1 m Länge bis zu einer Frequenz von 20 MHz gemessen werden. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, direkt Antennenmessungen mit den Aufbauten durchzuführen, was weitere Vorteile bieten kann.

4 Zusammenfassung

Üblicherweise werden Transferimpedanz-Messungen von HV-Kabeln und HV-Kabel-Stecker-Systemen mit dem Paralleldraht- (LIM) bzw. dem Triaxial-Verfahren durchgeführt. In Anbetracht der Limitierungen beider Verfahren wurde eine weitere Methode (GPM) entwickelt, die es ohne großen Aufwand ermöglicht, die Transferimpedanz von HV-Kabeln und HV-Kabel-Stecker-Systemen messtechnisch zu ermitteln. Messergebnisse zeigen, dass die Anwesenheit eines HV-Steckers in einem HV-Kabel-Stecker-System zu einem Anstieg von Z_T bereits im unteren Frequenzbereich führt. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass bei Frequenzen über 20 MHz die HV-Stecker in einem System die Schirmeffektivität stark reduzieren, im Vergleich zum HV-Kabel ohne Stecker. Die Ergebnisse im Niederfrequenzbereich wurden mit Hilfe von Messungen des DC-Widerstandes und einer analytischen Berechnung diskutiert. Der Vergleich zeigte geringe Fehler bei den NWA-Messungen. Die vorgestellte GPM liefert ähnliche Ergebnisse wie die standardisierten Messverfahren, sowohl für HV-Kabel als auch für HV-Kabel-Stecker-Systeme für 10 kHz bis 20 MHz. Die Ergebnisse können weiter verbessert werden, indem der mechanische Aufbau modifiziert und eine bessere Terminierung verwendet wird.

5 Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des CATRENE-Projekts CA310 EM4EM (Electromagnetic Reliability and Electronic Systems for Electro Mobility) durchgeführt. Diese individuelle Forschung wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter der Nummer 16 M3092 I gefördert. Die Autoren sind allein für den Inhalt verantwortlich.

6 Literatur

- [1] A. Mushtaq, K. Siebert, S. Frei, J. Bärenfänger, Analysis of Shielding Effectiveness of HV Cable and Connector Systems used for Electric Vehicles, EMC Europe Brugge, Belgium, 241-246, (September 2013).
- [2] S. A. Schelkunoff, Crosstalk between Coaxial Transmission Lines, Bell System Tech. J., 144-164, (1937).
- [3] Vance, E., Shielding Effectiveness of Braided-Wire Shields, Trans. on EMC, 17(2), IEEE, 71-77, (May 1975)
- [4] Tyni, M., The transfer impedance of coaxial cables with braided conductors, Proc. EMC Symp. Wroclaw, Poland, 410-418, (1976)
- [5] IEC 62153-4-1, Metallic communication cable test methods – Part 4-1: Introduction to Electromagnetic compatibility (EMC) Test methods
- [6] IEC 62153-4-3, Metallic communication cable test methods – Part 4-3: Electromagnetic compatibility (EMC) – Surface transfer impedance – Triaxial Method
- [7] IEC 62153-4-6, Metallic communication cable test methods – Part 4-6: Electromagnetic compatibility (EMC) – Surface transfer impedance – Line Injection Method
- [8] IEC 62153-4-15, Metallic communication cable test methods – Part 4-3: Electromagnetic compatibility (EMC) – Test method for measuring the transfer impedance and screening – or the coupling attenuation – with Triaxial Cell
- [9] Tesche, F., Ianoz M., Karlsson, T, EMC analysis methods and computational models, John Wiley & Sons, New York (1997)
- [10] Hoefl, L.O.; Hofstra, J.S., Transfer impedance of overlapping braided cable shields and hose clamp shield terminations, Symp. on EMC, IEEE, 49(1), 480-482, (1995)