

Messtechnische Detektion von Schirminhomogenitäten und Aperturen an Hochvoltleitungen in Elektro- und Hybridfahrzeugen mittels der normativen Speisedraht- und Triaxialverfahren im praktischen Vergleich

Dipl.-Ing. Christian Hofmeister, Dipl.-Ing. Karsten Kreisch, Dipl.-Ing. Marc Maarleveld, Dipl.-Ing. Jörg Bärenfänger, Geschäftsführung, EMC Test NRW GmbH, 44227 Dortmund, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch, Universität Duisburg-Essen, Fachgebiet Energietransport und -speicherung, Bismarckstr. 81, 47048 Duisburg

1. Einleitung

Elektrofahrzeuge gewinnen vor dem Hintergrund der schwindenden Erdölreserven und den damit verbundenen steigenden Primärenergiepreisen zunehmend an Bedeutung [1]. Neben dem Fahrkomfort stellen sich auch hohe Funktionalitätsanforderungen an Multimediasysteme (z.B. Navigationssysteme, Fahrerassistenzsysteme, Audio- und Videoanwendungen). Alle Systeme müssen im Fahrzeug nebeneinander und miteinander einwandfrei funktionieren. Die Hochvoltebene (Antriebsstrang, Ladekreis) ist im Fahrzeug als geschirmtes System ausgeführt. Hierdurch wird ein IT Netz realisiert, welches die Funktion eines Berührungsschutzes übernimmt. Des Weiteren findet die Schirmung Verwendung um ein Hochfrequenzübersprechen eventueller Störungen im HV System in die 12 V-Niedervoltebene zu minimieren. Bild 1 zeigt exemplarisch die unterschiedlichen Spannungsebenen sowie die mögliche Verkopplung der Systeme.

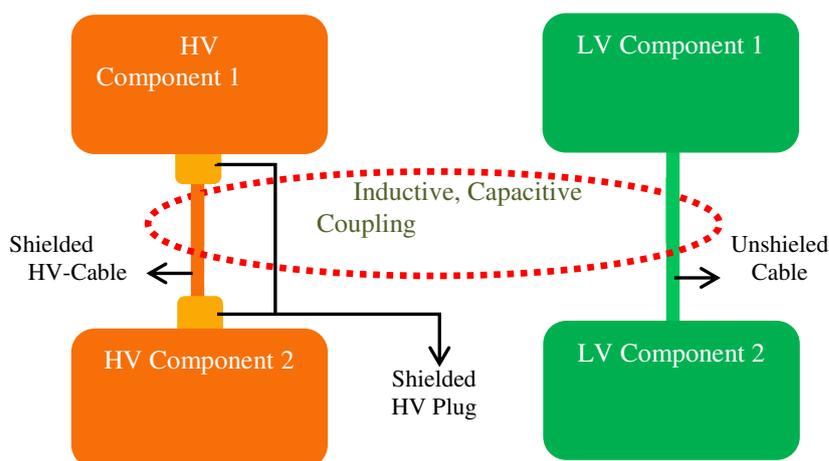


Bild 1: Schirmkonzept in einem Elektrofahrzeug

Produktionsbedingte Schirmdefekte (Löcher in Leitungsschirmen, schlecht geschirmte Leitungen) reduzieren die Schirmwirkung und können somit den Fahrkomfort erheblich reduzieren bzw. auch die Fahrsicherheit beeinträchtigen (z.B. gestörte Sensorik von Fahrerassistenzsystemen oder Busleitungen) [2]. Neben produktionsbedingten Schirm -

inhomogenitäten können auch durch den alltäglichen Fahrzeugbetrieb Schirmdefekte durch Umwelteinflüsse entstehen [4]. (Reibung der Leitungen an Kanten hervorgerufen durch Vibrationen). Fahrzeug- und Steckverbinderhersteller stellen im Allgemeinen einen störungsfreien Betrieb von Antriebssystemen und Niedervoltkomponenten durch vordefinierte Schirmkonzepte sicher.

Im Rahmen dieser Messreihe wird ein vertikales Triaxialverfahren und Speisedrahtverfahren bezüglich der Detektion von Schirminhomogenitäten und künstlich erzeugten Aperturen verglichen und bewertet. Nach ersten Erkenntnissen sind Aperturen und herstellungsbedingte Inhomogenitäten im Kabelaufbau mit dem Paralleldrahtverfahren einfacher zu detektieren.

2. Messverfahren und Randbedingungen

Die Parameter Koppelimpedanz sowie Schirmdämpfung einer Leitung lassen sich generell durch verschiedene Messverfahren sowie zugehörige Berechnungen bestimmen[3]. Im diesem Kapitel werden die Messverfahren näher vorgestellt sowie die Bestimmung der Parameter bzw. Berechnung der Werte näher erläutert.

2.1 Messparameter und Messaufbauten zur Bestimmung der Schirmgüte

Im Allgemeinen bestehen Messverfahren zur Bestimmung der Schirmwirkung von koaxialen Kabeln aus einem speisenden Kreis (Generator, Prüfling, Abschlußwiderstand) und einem empfangenden Kreis (Messempfänger, Schirmoberfläche des Prüflings, gegebenenfalls Abschlußwiderstand). In Kapitel 2.2 werden die verwendeten Verfahren dargestellt. In der Literatur sind im Wesentlichen zwei Messparameter (Schirmdämpfung, Kopplungsimpedanz) zur Bestimmung der Schirmwirkung von Koaxialkabeln bekannt. Die Schirmdämpfung ist das logarithmische Verhältnis von in das System eingespeister Leistung zu maximal abgestrahlter Leistung (siehe Formel 1)

$$a_s = 10 \log_{10} \left| \frac{P_{feed}}{P_{rad,max}} \right| \quad (1)$$

Eine weitere Maßeinheit für die Schirmwirkung ist die Koppelimpedanz. Sie ist definiert als Quotient der Längsspannung, welche im äußeren Kreis induziert wird zum Strom des inneren Kreises oder umgekehrt, bezogen auf die Längeneinheit (siehe Formel 2).

$$Z_T = \left| \frac{U_2}{I_1 \cdot L} \right| \quad (2)$$

U₂: Spannung im äußeren Kreis

I₁: Strom im inneren Kreis

L: Kopplungslänge

In der praktischen Messtechnik werden Netzwerkanalyzer eingesetzt und mittels des Streuparameters S₁₂ die Koppelimpedanz rechnerisch direkt ermittelt. In der Literatur

sind verschiedene Umrechnungsformeln bekannt. Im Rahmen der Messreihe werden die Formeln aus [5] angewendet.

2.2 Aufbau der Messverfahren zur Detektion von Aperturen und Schirminhomogenitäten

In der Literatur werden zwei Messverfahren (Speisedrahtverfahren, Triaxialverfahren) zur Bestimmung der Schirmgüte von KFZ-Hochvoltleitungen angegeben. In der folgenden Tabelle 1 werden die Verfahren beschrieben.

Speisedrahtverfahren	Triaxialverfahren
Das Verfahren besteht aus 2 Kreisen (innerer und äußerer Kreis). Der innere Kreis ist der Prüfling. Der Äußere (in Bild 2 rot dargestellt) besteht aus dem auf dem Prüfling aufgebrauchten Speisedraht. Der Schirm des zu prüfenden Kabels ist gemeinsamer Bestandteil beider Kreise. Sowohl der Prüfling als auch der Speisekreis werden mit seiner Wellenimpedanz abgeschlossen (Aufbau des Verfahrens siehe Abbildung 2).	Dieses Messverfahren ist ein Rohr-in-Rohr Verfahren. Der innere Kreis besteht aus dem wellenimpedanzmäßig richtig abgeschlossenen Prüfling (im Allgemeinen ein Koaxialkabel). Der äußere Messkreis besteht aus der Oberfläche des Schirmes und dem Messrohr, der auf der Messempfänger entfernten Seite einen Kurzschluss bildet (Messaufbau siehe Bild 3).
Vorteile:	
<p>Alle Empfangs- und Sendekreise sind impedanzmäßig richtig angepasst.</p> <p>Ermöglicht wird theoretisch ein frequenzmäßig weiter Messbereich (Abhängig von den verwendeten Abschlussimpedanzen)</p> <p>Einfacher, unkomplizierter Messaufbau Erweiterbar auf zu prüfende Steckverbinder mit großen geometrischen Abmessungen</p>	<p>Messverfahren ist in jeder Industriehalle aufgrund des geschlossenen koaxialen Aufbaus verwendbar (keine hochfrequenten Störungen durch Rundfunk, etc.)</p> <p>Alle Raumrichtungen (x,y,z) des Prüflings werden mittels einer Messung einfach und reproduzierbar erfasst</p>
Nachteile	
<p>Normativ müssen 4 Winkelpositionen vermessen werden</p> <p>Kein koaxiales geschlossenes Messverfahren (erfordert bei hohen äußeren Störpegeln eine geschirmte Halle)</p>	<p>Komplizierter, aufwändiger Messaufbau aus einzelnen Modulen (Aufnahmekopf, Messrohr, Spannvorrichtung)</p> <p>Der äußere Messkreis besteht aus einem Kurzschluss zwischen Prüfling und Messrohr, das theoretisch zu niedrigen Grenzfrequenzen führt (destruktive und konstruktive Interferenzen durch Reflexionen)</p> <p>Je nach Klemmvorrichtung Beschädigung des Kabelmantels (Prüfling) möglich</p>

Tabelle 1: Vergleich der Messverfahren

Es wird deutlich dass sich die beiden Verfahren hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile deutlich unterscheiden.
Die folgenden Abbildungen zeigen das äquivalente Ersatzschaltbild sowie den realen Messaufbau beider Messverfahren.

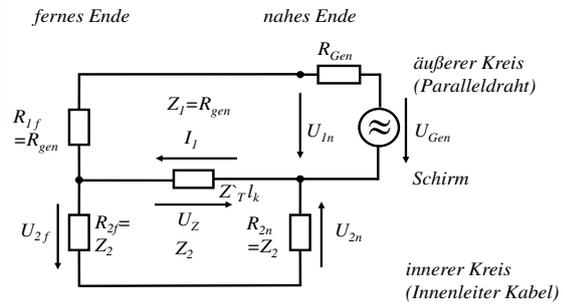


Bild 2 Realer Aufbau sowie ESB des Speisedrahtverfahrens

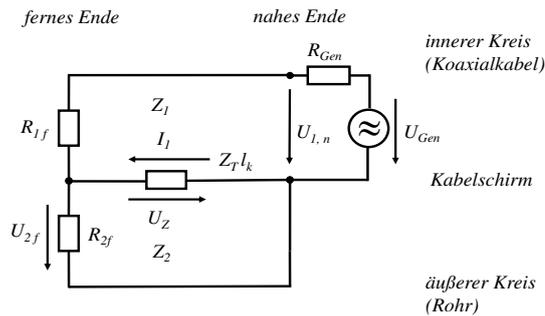
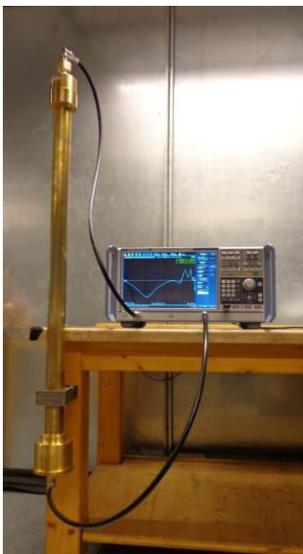


Bild 3 Realer Aufbau sowie ESB des Triaxialverfahrens

So ähnlich sich die beiden Verfahren in ihren ESBs sind, so unterschiedlich sind ihr realer Aufbau sowie die einzuhaltenden Randbedingungen. In wie weit dies Auswirkungen auf die Messergebnisse, vor allem bei Existenz von Aperturen und/oder Inhomogenitäten hat, wird im folgende Kapitel näher untersucht.

3. Messtechnische Untersuchungen

Die Detektion von Schirminhomogenitäten (Schirmdefekte, Aperturen) ist signifikant wichtig für die Produktqualität von Hochvollleitungen und Steckverbindersysteme. In diesen Messreihen werden beide Verfahren auf die Empfindlichkeit zur Erkennung von Schirmqualitätsänderung hervorgerufen und durch künstliche Aperturen und Biegeversuche untersucht.

3.1 Detektion von Schirminhomogenitäten und Aperturen mittels Triaxial- und Speisedrahtverfahren

Um die Rückwirkung einer Apertur auf das Messergebnis des jeweiligen Messverfahrens zu erproben, wird künstlich eine Aperturfläche von 70 mm² erzeugt. Diese Aperturfläche ist in Bild 4 zu sehen.



Bild 4: künstlich erzeugte Apertur

Die so modifizierte Koaxialleitung wird für die folgenden Untersuchungen herangezogen. Die Abbildung 5 zeigt den Kurvenverlauf bei der entsprechenden Aperturfläche für die beiden Messverfahren.

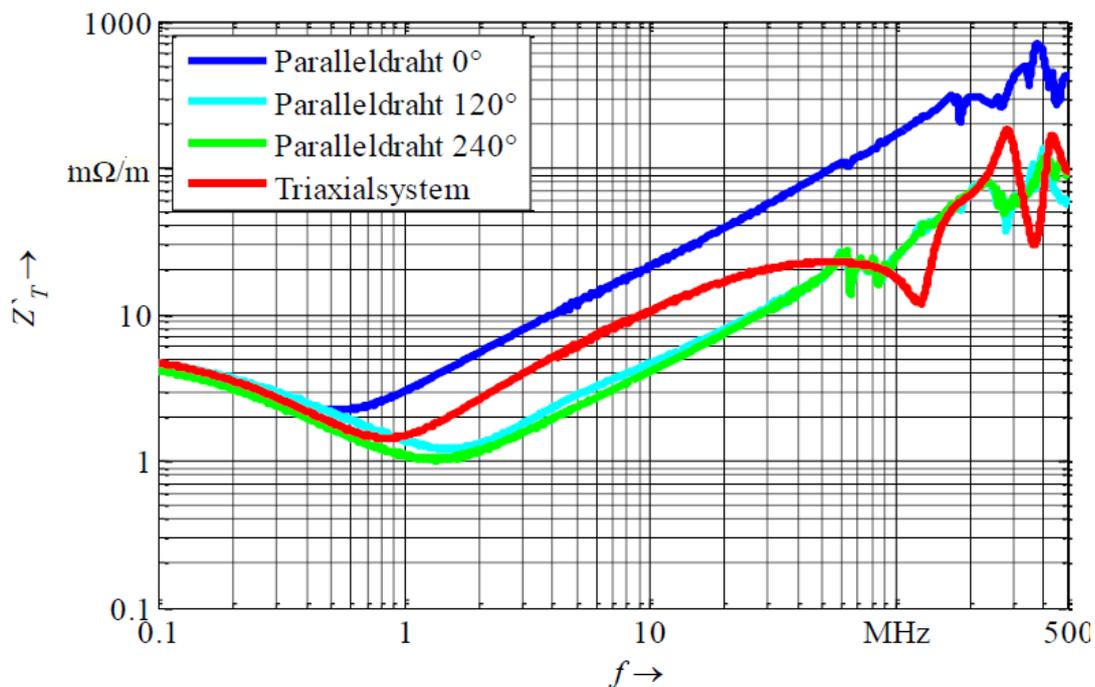


Bild 5 Vergleich beider Messverfahren zur Detektion von Schirmaperturen (Apertur 0° Position)

Zum einen ist deutlich zu erkennen, dass sich ab einer Frequenz von etwa 800 kHz die ermittelten Werte der Koppelimpedanz bei den verschiedenen Messverfahren unterscheiden. Des Weiteren kann die Winkelposition der eingebrachten Apertur bei Betrachtung der Messergebnisse erkannt werden. Die Kurve für die Winkelposition 0° unterscheidet sich deutlich von den Messergebnissen des Paralleldrahtverfahrens für einen Winkel von 120° bzw. 240° .

Neben der Sensitivität gegenüber Aperturen soll abschließend auch die Auswirkung von Biegevorgängen auf das Messergebnis abhängig von verwendeten Messverfahren untersucht werden. Die folgende Abbildung zeigt die gemessene Koppelimpedanz vor und nach dem Biegen des Kabelprüflings für beide Messverfahren.

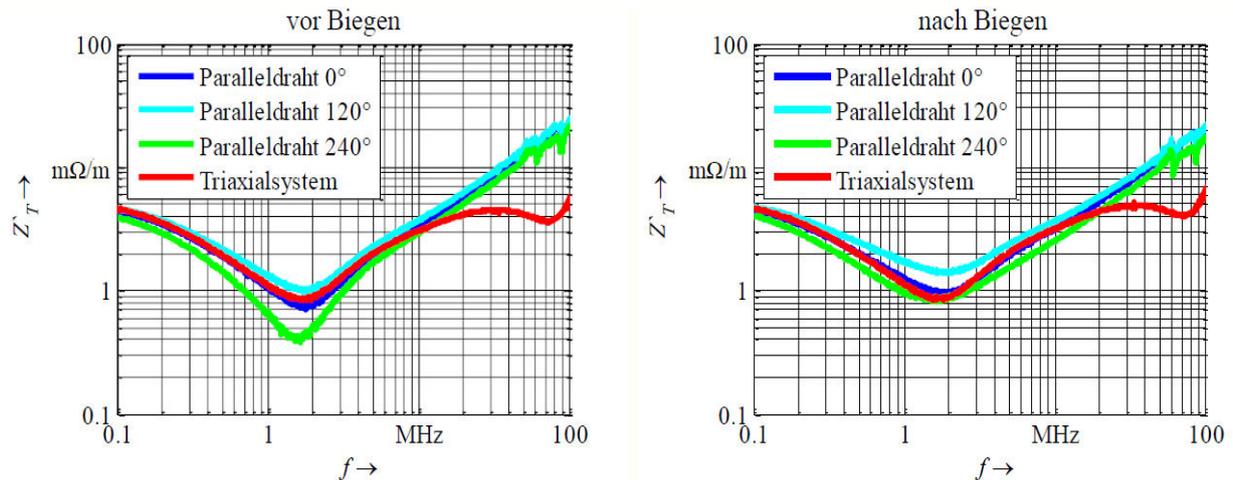


Bild 6 Koppelimpedanzen von Hochvollleitungen vor und nach dem Biegen

Ein Vergleich der beiden Messkurven des Triaxialsystems zeigt, dass die Messergebnisse vor und nach dem Biegevorgang keinen nennenswerten Unterschied zeigen. Bei Verwendung des Paralleldrahtverfahrens zeigt sich jedoch eine Auswirkung der mechanischen Beanspruchung durch den Biegevorgang. Vor allem das Messergebnis für die Winkelposition von 240° zeigt vor und nach dem Biegen unterschiedliche Ergebnisse. Dies ist am deutlichsten im Frequenzbereich zwischen 1 MHz und 3 MHz ersichtlich.

3.2 Analyse und Diskussion der Ergebnisse

Bei beiden Messreihen (Aperturen, Biegeversuch) wurde das Speisedrahtverfahren und Triaxialverfahren auf die Empfindlichkeit bezüglich der Änderung der Schirmwirkung des Materials verglichen. Die Messkurve des Triaxialsystems verändert sich nach dem Biegeversuch (Bild 6) nicht wesentlich, wohingegen insbesondere sich der Wert der Koppelimpedanz beim Speisedrahtverfahren deutlich verschlechtert (bei 2 MHz steigt der Wert von ca. $0,6 \text{ }\Omega/\text{m}$ auf $1 \text{ }\Omega/\text{m}$ an). Bei dem Triaxialverfahren verändert sich der Anstieg der Koppelimpedanz bei Aperturen nur geringfügig. Das Verfahren ermöglicht somit keine mikroskopische Sicht auf richtungsabhängige Aperturen. Ein weiterer Nachteil des Triaxialverfahrens sind die Reflexionen (Verflachung der Messkurve ab 10 MHz), die für einen niedrigen, künstlichen Transferimpedanzverlauf sorgen. Ziel des Messverfahrens sollte aber die Bestimmung der höchsten Koppelimpedanz (worst-case) sein.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Messreihe wurden zwei gebräuchliche Verfahren zur Bestimmung der Schirmwirkung von Koaxialkabeln verglichen. Tabelle 1 gibt eine Zusammenfassung über die Vorteile und Nachteile beider Messverfahren. Praktische Messungen zeigen beim Triaxialverfahren bei höheren Frequenzen einen flacheren Kurvenverlauf und früher einsetzende Systemresonanzen im Gegensatz zum Paralleldrahtverfahren. Die Empfindlichkeit zur Detektion von Inhomogenitäten und Aperturen ist bei dem Speisedrahtverfahren offensichtlich ausgeprägter.

In weiteren Messreihen soll die Detektierbarkeit von Aperturen in Abhängigkeit von verschiedenen Parametervariationen (Apertur, -länge, -breite, -lage) an einem Kupfer-Vollmantelmaterialmantelkabel mittels der vorgestellten Verfahren untersucht werden.

5. Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): *Leitstudie 2008. Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas*, Berlin, Oktober 2008.
- [2] Hans A. Wolfspenger: *Elektromagnetische Schirmung*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008
- [3] Adolf J. Schwab, Wolfgang Kürner.: *Elektromagnetische Verträglichkeit*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [4] Günter Vogel: *Umweltsimulation für Produkte, Zuverlässigkeit steigern, Qualität sichern*, Würzburg, Vogel Verlag 1999,
- [5] EN50289-1-6:2002: *Kommunikationskabel Spezifikationen für Prüfverfahren*