

Messverfahren zur Beurteilung des Emissionsverhaltens von geschirmten Energiekabeln für KFZ-Hochvoltbordnetze

Dipl.-Ing. Jens Hohloch, Dr.-Ing. Wolfgang Köhler, Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen,
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart
Dr.-Ing. Martin Aidam, Dr.-Ing. Thomas Krauß, Daimler AG, Stuttgart

1 Kurzfassung

Aufgrund der hohen Zahl von elektrischen und elektronischen Baugruppen und Komponenten auf engstem Raum hat die EMV in Kraftfahrzeugen eine große Bedeutung. Durch die Übertragung von hohen elektrischen Leistungen über das KFZ-Bordnetz, wie es bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen notwendig ist, wird das elektromagnetische Störpotential wesentlich gesteigert. Eine Maßnahme der Entstörung besteht in der Verwendung von geschirmten Komponenten wie z.B. Energieleitungen und Steckverbindern. Zur Bewertung des EMV-Verhaltens geschirmter Hochvolt-Bordnetzkabel werden das aus der Kommunikationstechnik bekannte Triaxial- und das Paralleldrahtverfahren untersucht.

2 Einleitung

Beim Einsatz von elektrischen Fahrantrieben in Kraftfahrzeugen nimmt die Leistung, die über das Bordnetz übertragen werden muss sehr stark zu. Im Vergleich zu herkömmlichen KFZ-Bordnetzen werden für elektrisch angetriebene Fahrzeuge höhere Bordnetzspannungen im Bereich von 120 bis 1100 V verwendet. Das Auftreten großer Strom- und Spannungsänderungen, hervorgerufen durch taktende Leistungshalbleiter, verursacht elektromagnetische Störungen, durch die andere Fahrzeugkomponenten beeinflusst werden können. Durch variable parasitäre Impedanzen der Antriebsmaschinen und transiente Vorgänge bei Last- und Drehzahlwechseln wird die EMV-Problematik zusätzlich verschärft.

Die Ausbreitung von elektromagnetischen Störungen erfolgt unter anderem über die im Fahrzeug verlegten Hochvolt-Leitungen, die aufgrund der hohen EMV-Anforderungen häufig geschirmt ausgeführt werden müssen. Zur reproduzierbaren Qualifizierung der Schirmwirkung dieser Leitungen werden geeignete Messverfahren benötigt, von denen das Triaxialmessverfahren sowie das Speisedrahtverfahren näher auf ihre Eignung für HV-Kabel untersucht werden. Die beiden betrachteten Messverfahren sind für die Kommunikationstechnik bereits genormt und werden dort angewendet [1], [2], [3].

Beide Verfahren beruhen auf der Messung des Kopplungsverhaltens zweier Systeme, die aus den Kabelinnenleitern, einem äußeren Leiter der Messvorrichtung und dem Kabelschirm als gemeinsame Impedanz gebildet werden.

3 Grundlagen der Kabelschirmung

3.1 Transferimpedanz und Transferadmittanz

Der Kopplungswiderstand (Transferimpedanz) Z_T ist definiert als Verhältnis der Spannung U_{St1} zwischen Innenleiter und Schirm am Kabelanfang zum Strom I_{St1} auf dem Schirm bei kurzgeschlossenem Kabelende [4].

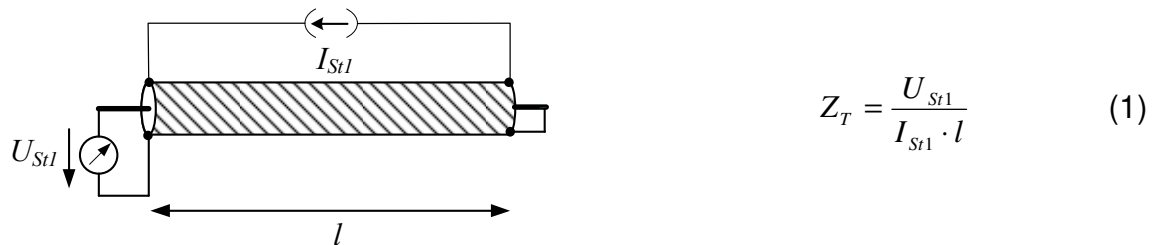


Abb. 1: Definition der Transferimpedanz

Die Transferimpedanz berücksichtigt einerseits den ohmschen Spannungsabfall am Schirm der durch den Schirmstrom I_{St} verursacht wird. Zum anderen wird durch einen zeitlich veränderlichen Störstrom I_{St} eine Spannung am Kabelinnenleiter induziert. Der Kopplungswiderstand umfasst daher die galvanische sowie die induktive Kopplung zwischen Innenleiter und Schirm. Aufgrund der Abhängigkeit von der Kopplungslänge l wird er als längenbezogene Größen definiert. Bei niedrigen Frequenzen, bei denen die induktive Kopplung vernachlässigt werden kann, entspricht der Kopplungswiderstand dem Gleichstromwiderstand des Kabelschirms. Die mathematische Berechnung von Z_T ist schwierig, weil bei höheren Frequenzen verschiedene Effekte wie magnetische Kopplung und Stromverdrängung (Skinneffekt) gleichzeitig wirken.

Zwischen Kabelinnenleiter, Kabelschirm und Leiter eines äußeren Bezugssystems wirken jeweils unterschiedliche Kapazitätsbeläge. Die Kapazität zwischen Innenleiter und äußerem Leiter tritt auf bei Geflechtsschirmen, die keine vollständige Bedeckung aufweisen. Sie wird als Durchgriffskapazität [4] bezeichnet. Die Definition der Transferadmittanz Y_C erfolgt in Analogie zur Transferimpedanz als längenbezogener Quotient aus Störstrom und Störspannung [5]. Die Spannung U_{St2} zwischen Schirm und einem äußeren System influenziert Ladungen auf dem Innenleiter des Kabels, was zu einem Ausgleichstrom I_{St2} führt. Die Kopplungsadmittanz ist abhängig von den Dielektrizitätskonstanten und der Geometrie der Anordnung.

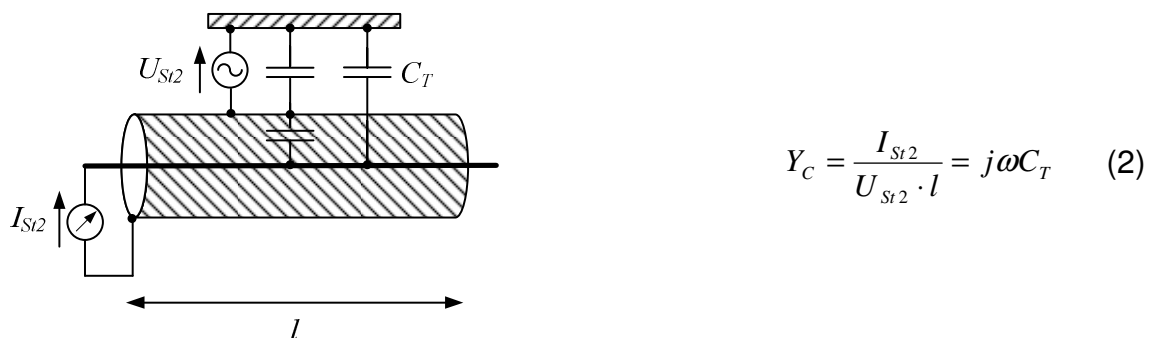


Abb. 2: Definition der Transferadmittanz

3.2 Schirmdämpfung

Bei den bisher beschriebenen Kopplungen handelt es sich um leitungsgebundene Kopplungsarten. Sie gelten nur im Bereich elektrisch kurzer Kopplungslängen. Im höheren Frequenzbereich, in dem die Leitungslänge größer als ein Viertel der zugehörigen Wellenlänge ist (elektrisch lange Kopplungslängen), ist die feldgebundene Kopplung für das elektromagnetische Verhalten ausschlaggebend. Die Schirmwirkung wird durch die Schirmdämpfung a_s ausgedrückt. Sie ist definiert als logarithmisches Verhältnis der ins Kabel eingespeisten Leistung zur maximal abgestrahlten Leistung. Die Schirmdämpfung ist abhängig von den Dielektrizitätskonstanten, den Wellenwiderständen und den Ausbreitungsgeschwindigkeiten sowohl des Kabels als auch der gestörten Umgebung [6].

$$a_s = 10 \cdot \log \left| \frac{P_{feed}}{P_{rad,max}} \right| \quad (3)$$

4 Messaufbau

Ziel ist eine Messanordnung, mit Hilfe derer die Schirmwirkung sowohl im elektrisch kurzen, als auch im elektrisch langen Bereich gemessen werden kann. Zum einen muss also ein Störstrom auf dem Kabelschirm injiziert, zum anderen auch HF-Leistung in den Prüfling eingespeist werden können.

4.1 Prüfling

Als Prüfling (CUT) wird eine Leitung des Herstellers Gebauer & Griller (41206) verwendet, die aus zwei PVC-isolierten massiven Aluminiumdrähten mit einem Nennquerschnitt von ca. 59 mm² besteht. Die optische Bedeckung des Schirmgeflechts, das aus verzinnnten Cu-Drähten besteht, wird vom Hersteller mit 90 % angegeben. Zur Kontaktierung der Kabelinnenleiter werden in die massiven Leiterdrähte Gewinde geschnitten und über ein Blechstück mit angelötetem Kontaktstift oder Widerstand verbunden. Durch die parallele Anregung beider Innenleiter (Common-Mode) kann die Leitung als quasikoaxiales System betrachtet werden.

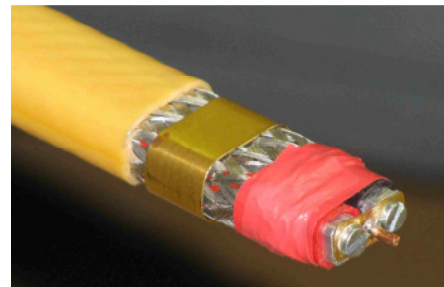


Abb. 3: Innleiterkontaktierung am HV-Kabel

4.2 Triaxialverfahren

Beim triaxialen Messverfahren wird der Prüfling zentriert in ein Metallrohr eingebracht. Der Wellenwiderstand des äußeren Systems ist festgelegt durch den Durchmesser des Rohrs sowie den geometrischen Abmessungen des Kabels. Als Messrohr dient ein 102 cm langes Kupferrohr mit einem Durchmesser von 39 mm,

die zentrierte Ausrichtung des Prüflings erfolgt mit Hilfe von Distanzstücken aus 1 mm dickem Plexiglas. Auf der Speiseseite wird das Kabel in einer Hülse montiert, die später auf das Messrohr gesteckt werden kann. Zur sicheren Verbindung zwischen Kabelschirm und Hülse wird um den Schirm ein gebogenes Messingblech gelegt, das von Madenschrauben großflächig angepresst wird. Die HF-dichte Verbindung zwischen Abschlusshülse und Kupferrohr wird durch Kontaktfedern sichergestellt. Auf der Hülse wird anschließend eine N-Buchse befestigt, deren Innenleiter den Stift kontaktiert. Auf der Messseite des Rohrs befindet sich der Abschlusswiderstand des Prüflings, der in einer separaten Schirmhülse im Rohr untergebracht wird und Reflexionen verhindern soll. Neben einem bedrahteten Kohleschichtwiderstand kommen SMD-Widerstände in coaxialer Anordnung zum Einsatz. Die Isolierung der Hülse des Abschlusswiderstandes vom Rohr erfolgt durch einen Kunststoffeinsatz. Der Abschluss des Rohrs erfolgt wie auf der Speiseseite über eine aufgeschobene Hülse mit eingebauter N-Buchse.

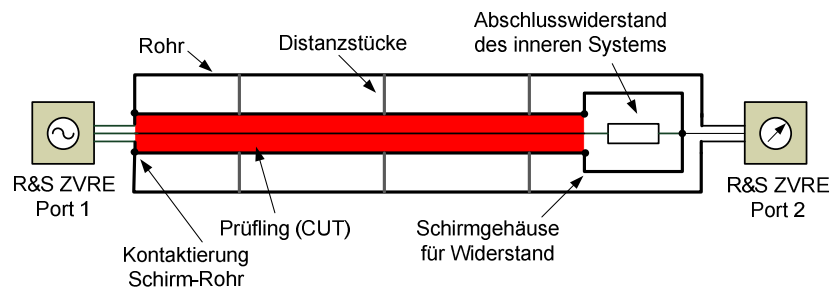


Abb. 4: Triaxiales Messverfahren - Aufbau

Die Einspeisung von HF-Leistung erfolgt ins innere System, d.h. zwischen Innenleiter und Schirm des zu prüfenden Kabels. Auf der Speiseseite ist das Messrohr mit dem Kabelschirm verbunden, die Messung der Störspannung erfolgt am entfernten Ende zwischen Kabelschirm und Rohr am äußeren System.

Für die beschriebene Messanordnung kann nach Abb. 4 ein vereinfachtes Ersatzschaltbild angegeben werden. Dabei sind die beiden Systeme über die Impedanz Z_T und die Admittanz Y_T gekoppelt. Für die feldgebundene Kopplung bei höheren Frequenzen sind die Wellenwiderstände und die relativen Dielektrizitätskonstanten beider Systeme von Bedeutung.

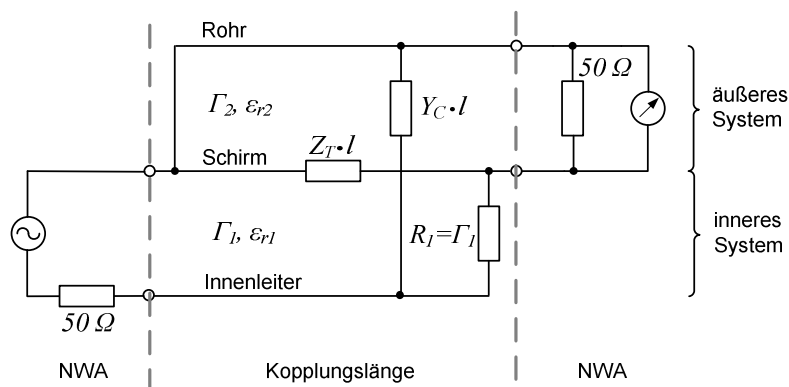


Abb. 5: Ersatzschaltbild des triaxialen Messverfahrens

4.2 Speisedrahtverfahren

Im Gegensatz zum Triaxialverfahren weist das Speisedrahtverfahren kein von der Umgebung abgeschlossenes, äußeres System auf. Stattdessen wird auf dem Mantel des zu untersuchenden, geschirmten Kabels ein Injektionsdraht bzw. -leitung angebracht. Dieser bildet zusammen mit dem Schirm des Kabels das äußere System, welches einen möglichst konstanten Wellenwiderstand aufweisen sollte.

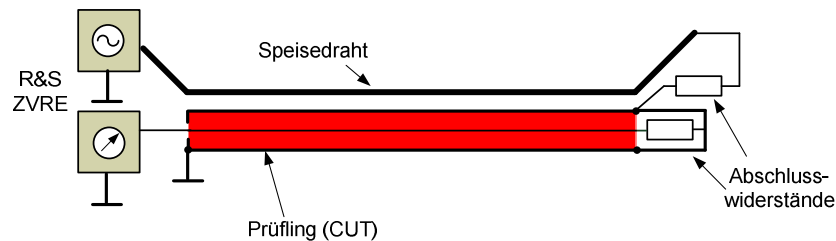


Abb. 6: Aufbau des Paralleldrahtverfahrens

Der Speisedraht, der aus vier parallel geschalteten Adern eines Flachbandkabels besteht, wird mittels Klebeband und Kabelbinder auf dem Mantel befestigt. Die Anzahl der Adern ist so gewählt, dass sich zwischen Speisedraht und Kabelschirm ein Wellenwiderstand von 50Ω ergibt.

Das innere System, an dem die Störspannung gemessen wird, setzt sich aus den Innenleitern des Energiekabels und dessen Schirm zusammen. Beide Systeme sind damit über den Schirm galvanisch gekoppelt. Durch Einspeisung von HF-Leistung ins äußere System kann die frequenzabhängige Einkopplung in das innere System gemessen werden. Die Leitung wird 5 cm über einer Kupferplatte, die als Referenzmasse dient, zwischen Winkeln mit N-Einbaubuchsen eingespannt. Ein Durchhängen des Prüflings wird durch unterlegte Styrodurblöcke verhindert. Zur Abschirmung wird über die Anschlussstellen eine Messinghülse geschoben, die das Schirmgeflecht kontaktiert.

Im Ersatzschaltbild ist zu erkennen, dass sowohl der äußere als auch der innere Kreis durch Abschluss mit ihrem Wellenwiderstand angepasst sind. Der als gemeinsame Impedanz wirkende Kabelschirm und die kapazitive Admittanz, die durch die Durchgriffskapazität hervorgerufen wird, sind gemäß ihrer Definition als diskrete Elemente eingezeichnet.

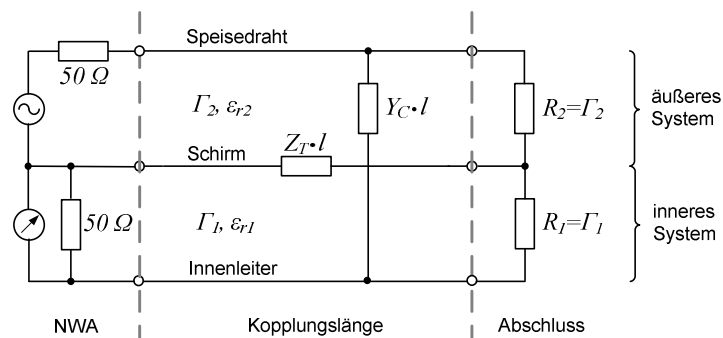


Abb. 7: Ersatzschaltbild des Speisedrahtverfahrens mit Messempfänger am nahen Ende

5 Messergebnisse

5.1. Impedanzbeläge

In den Diagrammen Abb. 8 ist der Verlauf der Impedanzbeträge im Frequenzbereich von 10 kHz bis 500 MHz für die inneren Systeme beider Messanordnungen dargestellt.

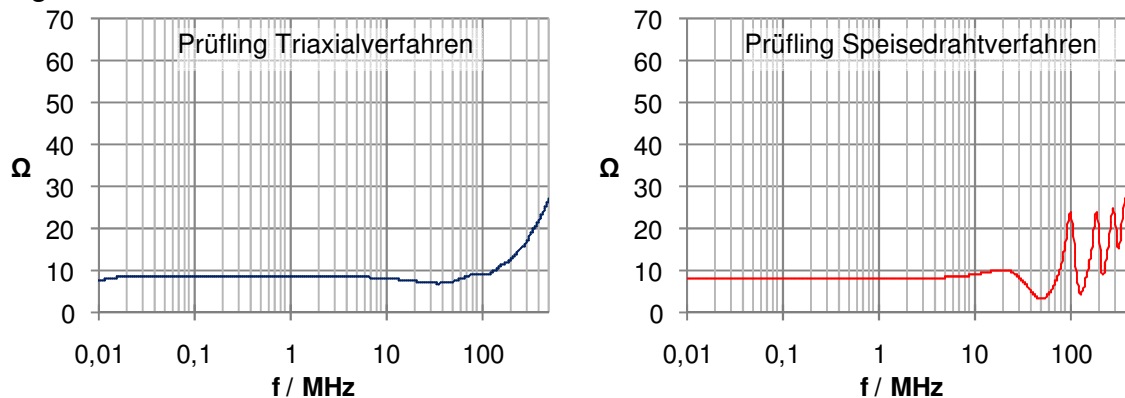


Abb. 8: Impedanzbeläge des konfektionierten Prüflings

Der Wellenwiderstand des verwendeten Leitungstyps liegt bei ca. 8 Ω . Bei höheren Frequenzen ab 10 MHz nehmen die Abweichungen zu, vor allem beim Speisedrahtverfahren treten Resonanzen auf. Der Unterschied kann durch die unterschiedliche Aufbauweise erklärt werden: Während sich der koaxiale Abschlusswiderstand bei der triaxialen Anordnung direkt am Kabelende befindet, liegt beim anderen Aufbau zwischen Prüfling und Abschluss das 50 Ω -Stecksystem, an dem schließlich der diskrete Abschlusswiderstand angeschlossen ist.

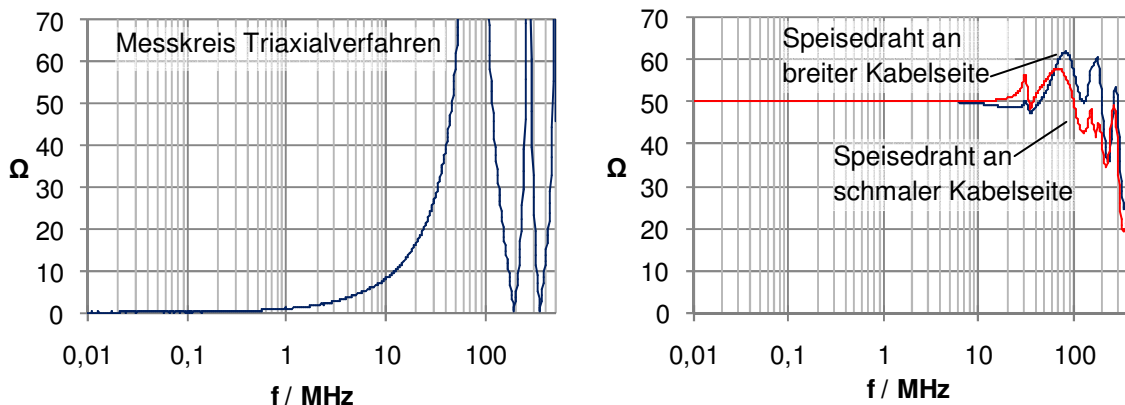


Abb. 9: Impedanzbeläge der Messkreise

Im Messkreis ist beim triaxialen Verfahren der Kurzschluss zwischen Rohr und Kabelschirm bis ca. 10 MHz wirksam, ab ungefähr 50 MHz treten deutliche Resonanzen auf. Beim Speisedrahtverfahren ist der Verlauf der Impedanzen im äußeren System stark abhängig von der Verlegung des Speisedrahtes. Die Impedanz liegt bis zur Frequenz von 10 MHz konstant bei 50 Ω . Großen Einfluss auf das Messergebnis haben Induktivitäten im Speisekreis, die durch Abheben des Speisedrahtes vom Schirm bzw. den Anschlusshülsen entstehen. Bei gleichmäßiger Anbringung des Flachbandkabels an der breiten bzw. schmalen Seite des Prüflings ergeben sich jedoch sehr ähnliche, gut reproduzierbare Messergebnisse.

5.2 Kopplungsübertragungsfunktion

Die Kopplungsübertragungsfunktionen (Transferfunktionen), aus denen der Kopplungswiderstand bzw. die Schirmdämpfung abgeleitet bzw. berechnet werden können, werden mit einem Netzwerkanalysator (Rohde & Schwarz ZVRE) als S21- bzw. S12-Parameter gemessen und durch Mittelung geglättet.

Die mit dem Triaxial- bzw. Speisedrahtverfahren gemessenen Kurven zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf und sind direkt vergleichbar. Unterschiede bewegen sich im unteren Frequenzbereich bei gleichen Kopplungslängen um ca. 3 dB. Bei hohen Frequenzen ab ca. 100 MHz zeichnet sich beim triaxialen Aufbau ein deutlich weniger schwingender Verlauf ab. Der näherungsweise konstante Verlauf der Kopplungsimpedanz bis ungefähr 1 MHz entspricht ungefähr dem Gleichstromwiderstand des Schirms. Mit steigender Frequenz nimmt die induktive, leitungsgebundene Kopplung zu, die Kopplungsimpedanz steigt um ca. 15 dB pro Dekade. Im Frequenzbereich ab 100 MHz bestimmen feldgebundene Kopplungsvorgänge das elektromagnetische Verhalten. Beim Speisedrahtverfahren wird bei Messung am sendernahen Prüflingsende eine leicht tieferliegende Übertragungsfunktion festgestellt. Bei Durchführung der Messungen ist der Speisedraht an der breiten Prüflingsseite verlegt.

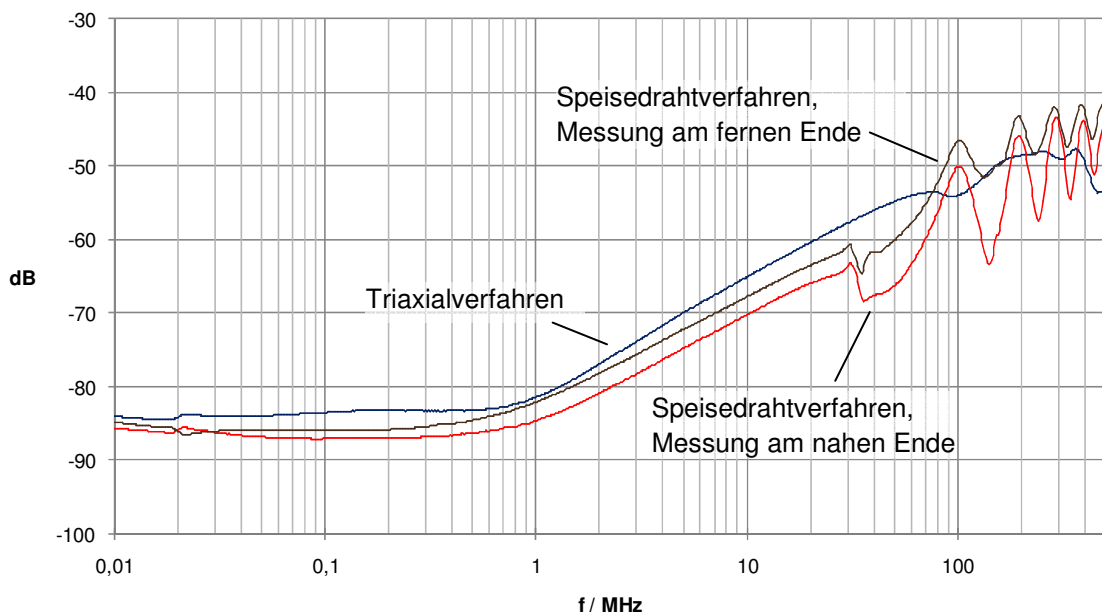


Abb. 10: Kopplungsverhalten von innerem und äußerem System bei beiden Messanordnungen

Beim Paralleldrahtverfahren kann die Schirmwirkung auch bei mechanisch beanspruchtem Prüfling untersucht werden. So bewirkt beispielsweise eine Biegung des Prüflings eine Streckung bzw. Stauchung des Schirmgeflechts und beeinflusst damit den Schirmbedeckungsgrad. Die Auswirkungen werden messtechnisch bei Biegung des Prüflings im gleichmäßigen Kreisbogen mit Radius 24 cm ermittelt. Die Speisedrähte sind an der breiten Kabelseite am Kreisbogen innen und außen verlegt, aufgrund der verschiedenen Radien beträgt der Längenunterschied zwischen beiden Speisedrähten ca. 6 cm.

Erwartungsgemäß ergeben sich für niedrige Frequenzen im Bereich der leitungsgebundenen Kopplung keine veränderten Kurvenverläufe. Im Frequenzbereich ab ca. 100 MHz kann bei innen verlegtem Speisedraht eine minimal höhere Schirmdämpfung festgestellt werden. Dies wird vor allem bei Darstellung der Messergebnisse im Diagramm mit linearer Frequenzachse deutlich.

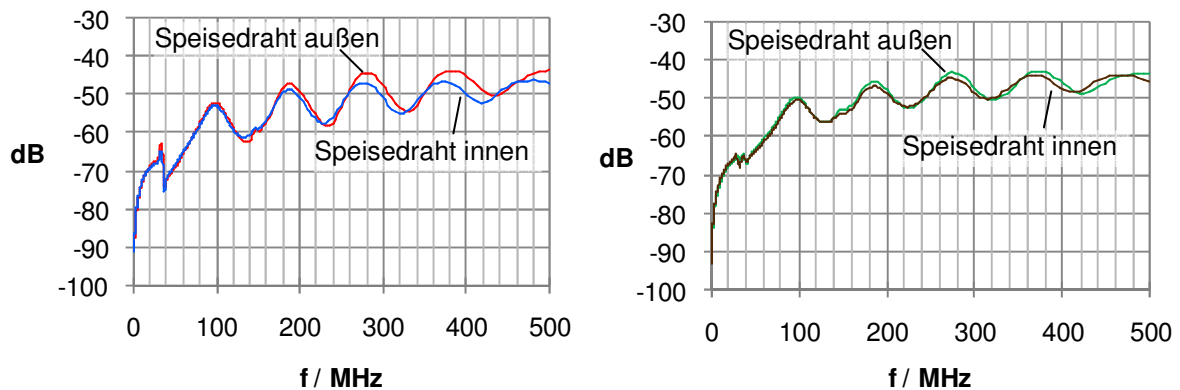


Abb. 11: Schirmwirkung bei gebogenem CUT, Messung am nahen und fernen Ende

6 Zusammenfassung

Zur betragsmäßigen Messung der Transferimpedanz und der Schirmdämpfung von HV-Bordnetzleitungen im Frequenzbereich bis 500 MHz eignen sich grundsätzlich sowohl das Triaxial- als auch das Paralleldrahtverfahren. Trotz unterschiedlicher Abschlüsse (Kurzschluss bzw. Anpassung) im äußeren System unterscheiden sich die Kopplungsübertragungsfunktionen beim gleichen Leitungstyp nur um wenige dB. Bei Anregung der Messanordnungen mit Frequenzen im Bereich, in dem der Prüfling als elektrisch lang angesehen werden muss, treten beim Speisedraht verstärkt Reflexionen auf. Diese beeinflussen die gemessene Schirmdämpfung. Leichte Veränderungen der Schirmdämpfung bei Biegung des Prüflings können mit dem Speisedrahtverfahren ebenfalls festgestellt werden.

7 Literatur

- [1] DIN IEC 62153 Prüfverfahren für metallische Kommunikationskabel
Teil 4-1: Einführung in elektromagnetische Messungen der Schirmwirkung
Teil 4-3: Kopplungswiderstand – Triaxialverfahren
Teil 4-4: Geschirmtes Messverfahren zur Messung der Schirmdämpfung
Teil 4-6: Kopplungswiderstand – Speisedrahtverfahren
- [2] DIN EN 50289 Kommunikationskabel Spezifikation für Prüfverfahren
Teil 1-6: Elektrische Prüfverfahren Elektromagnetisches Verhalten
- [3] VG 95214 Prüfung von Bauelementen
Teil 10: Messverfahren für Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung
Teil 11: Kopplungswiderstand von geschirmten Bauelemente
(Paralleldraht-Verfahren, KS 11 B)
Teil 12: Kopplungswiderstand von geschirmten Bauelemente
(Triaxial-Verfahren, KS 12 B)
- [4] H. Kaden, Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik, Springer 2006
- [5] H. A. Wolfsperger, Elektromagnetische Schirmung, Springer 2008
- [6] T. Hähner, B. Mund, Test methods for screening and balance of communication cables, EMC Symposium Zürich 1999