

Messung der Schirmwirkung von Steckern und von konfektionierten Kabeln

Ralf Damm & Bernhard Mund, bedea Berkenhoff & Drebes GmbH,
Herborner Straße 100, 35614 Aßlar, rdamm@bedea.com; bmund@bedea.com

Thomas Schmid, Rosenberger HF-Technik,
Hauptstraße 1; 83413 Fridolfing, thomas.schmid@rosenberger.de

1 Kurzfassung und Einleitung

Das Triaxialverfahren zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung an Kabeln, Steckern und Komponenten ist weit verbreitet. IEC 61153-4-7 beschreibt die Messung von Kopplungswiderstand und Schirmwirkung von Steckern und von konfektionierten Kabeln mit dem Rohr in Rohr Verfahren. Durch den geschlossenen Messaufbau sind Messungen über 120 dB und mehr bis zu und über 3 GHz mit modernen Netzwerkanalysatoren ohne Messkabine möglich.

Die Frage, ob Kopplungswiderstand oder Schirmdämpfung des Prüflings gemessen werden kann, hängt vom Frequenzbereich bzw. vom Prüfling ab. Mit der Schiebewand kann mit dem Triaxialverfahren der Bereich, in dem der Kopplungswiderstand gemessen werden kann, zu hohen Frequenzen hin verschoben werden.

Die Messgenauigkeit bzw. die Reproduzierbarkeit ist bei hochgeschirmten Komponenten, d.h. bei niedrigen Pegeln bzw. bei niedrigen Spannungen kritisch und hängt von zahlreichen Einflussgrößen ab. Dies gilt insbesondere bei der Messung der Schirmwirkung von Steckern und konfektionierten Kabeln, da die erforderlichen Mess-Adapter das Messergebnis zusätzlich beeinflussen bzw. verfälschen.

Der folgende Vortrag gibt einen Überblick über die mögliche Messdynamik und über erreichbare Messgenauigkeiten bei der Messung der Schirmwirkung von Steckern und von konfektionierten Kabeln mit dem Triaxialverfahren. Weiterhin werden Maßnahmen zur Verbesserung der Messgenauigkeit bzw. zur Vermeidung von Messfehlern beschrieben. Der Einsatz der Schiebewand mit dem Triaxialverfahren wird erklärt.

2 Triaxialverfahren

Die triaxiale Messtechnik ist seit vielen Jahren die Standardmethode um an Kabeln und Steckverbindern die Schirmeigenschaften zu messen. Der deutsche Kabelhersteller bedea und der Steckerhersteller Rosenberger bieten hierzu mit der Produktserie CoMeT eine umfassende Messtechnik an. Eine Reihe von internationalen Normen sichern die Vergleichbarkeit und Qualität der Messergebnisse. In der Normenserie IEC 62153-4-n, erarbeitet vom TC 46 der IEC, werden sowohl die Schirmdämpfung als auch der Kopplungswiderstand bzw. die Transferimpedanz als grundlegende Schirmparameter definiert.

Während die Schirmdämpfung nur für spezifische Umgebungsbedingungen angegeben werden kann, ist der Kopplungswiderstand bzw. die Transferimpedanz der stabile, von den

Umgebungsbedingungen unabhängige, sozusagen intrinsische Schirmparameter. Dieser kann zur Modellierung des wirksamen Kopplungsmechanismus zwischen den betrachteten Systemen verwendet werden und ist daher für den EMV-Analytiker von größtem Interesse.

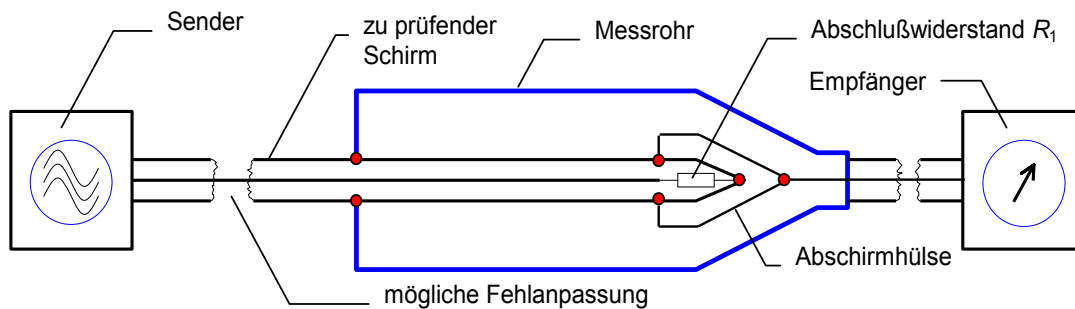


Bild 1 – Triaxialverfahren nach IEC 62153-4-3 und IEC 62153-4-4.

Das Triaxialverfahren ist in [1], [2] und [3] ausführlich beschrieben.

Zunächst ist die Frage zu klären ob der Kopplungswiderstand oder die Schirmdämpfung gemessen werden soll (siehe Bild 1). Die Kopplungsübertragungsfunktion $T_{n,f}$ (Bild 2) stellt den Verlauf von Kopplungswiderstand Z_T und Schirmdämpfung a_S eines Kabelschirms über der Frequenz dar. Bei Gleichspannung bzw. bei sehr tiefen Frequenzen entspricht der Kopplungswiderstand eines typischen Kabelschirms seinem Gleichstromwiderstand. Im Bereich zwischen 1 MHz und 10 MHz sinkt der Kopplungswiderstand durch Wirbelstromverluste im Schirm, um dann bedingt durch die Lochkopplung (bei perforierten bzw. geflochtenen Schirmen) zu höheren Frequenzen hin mit ca. 20 dB/Dekade anzusteigen.

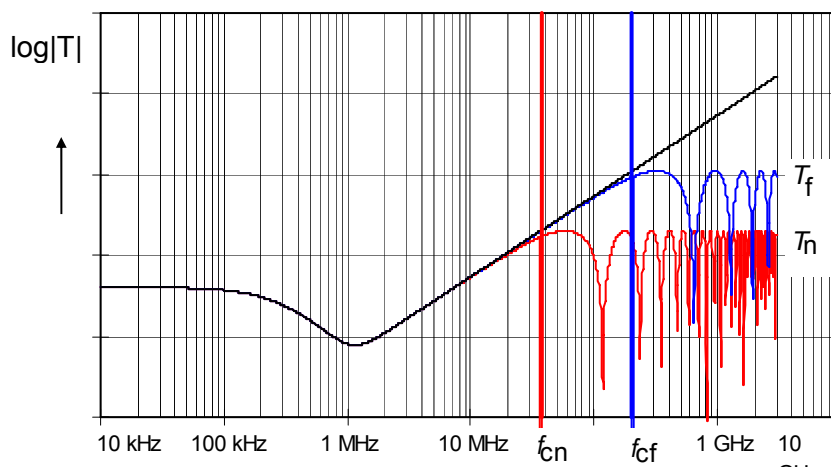


Bild 2 - Gerechnete Kopplungsübertragungsfunktion $T_{n,f}$ eines Geflechtsschirms

Oberhalb der Grenzfrequenzen $f_{cn,f}$ ($c = \text{cutt off}$, $n = \text{nah}$, $f = \text{fern}$), beginnt der Bereich der Wellenausbreitung bzw. der Bereich, in dem die untersuchten Schirme als elektrisch lang zu betrachten sind. In diesem Bereich ist die Schirmdämpfung a_S das quantitative Merkmal des Kabelschirms. Bei Anpassung von innerem und äußerem System ergeben sich die, von den unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten beider System abhängigen Grenzfrequenzen $f_{cn,f}$ mit Bezug auf die Messlänge l zu:

$$f_{cn,f} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_{r2} \pm \sqrt{\epsilon_{r1}}} \cdot \pi \cdot l} \quad (1)$$

wobei $\epsilon_{r1,2}$ die relativen Dielektrizitätskonstanten des Isolationsmaterials bzw. des umgebenden Mediums sind, (z.B. $\epsilon_{r\text{Luft}} = 1$).

Weiterentwicklungen des Triaxialverfahrens bestehen in dem Rohr in Rohr –Verfahren nach IEC 62153-4-7 zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung von Steckern und von konfektionierten Kabeln sowie in der Triaxialen Zelle nach IEC 62153-4-15 zur Messung der EMV größerer Stecker und Komponenten [3].

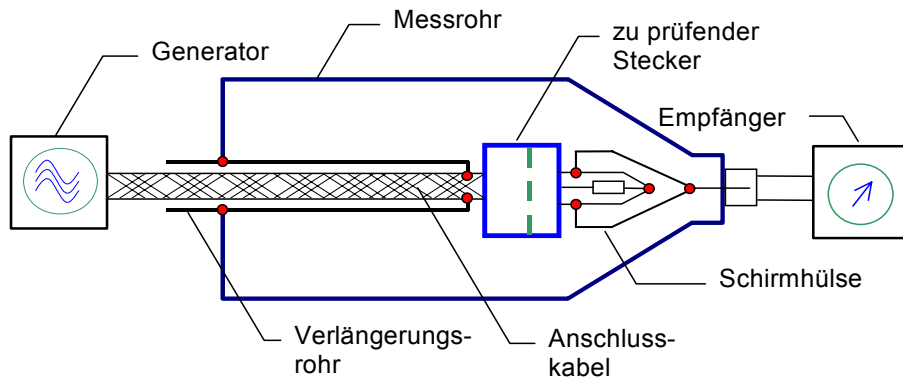


Bild 3 - Triaxialverfahren nach IEC 62153-4-7 mit Rohr in Rohr Verfahren.

IEC 62153-4-7 wird zurzeit bei IEC TC 46/WG 5 überarbeitet, (46/491/CDV)

3 Vorbereiten der Messung

3.1 Theoretisch erreichbare Messdynamik

Vor jeder EMV-Messung sollte bekannt sein, ob die Eigenschaften des Messaufbaus bezüglich der Messdynamik für die geplante Messaufgabe ausreichen. Ein gesamter Messaufbau besteht aus einem Messender und Empfänger (i.d.R. Netzwerkanalysator), den Anschlussleitungen und dem Triaxialen Messaufbau mit dem Prüfling. Zusätzlich können noch Elemente wie Leistungsteiler, Anpassglieder oder Vorverstärker (LNA) enthalten sein. Für eine theoretische Abschätzung der erreichbaren Messdynamik siehe [2].

Unter Beachtung eines Rauschpegels der Bandbreite von 1 Hz (bei 16,85° C oder 290K) von -174 dBm, (Anstieg $10 \times \log(\text{Bandbreite})\text{dB}$) und Addition der Rauschzahl des Verstärkers erhält man das theoretische Grundrauschen L_R des Messempfängers zu:

$$L_R = -174\text{dBm} + NF + 10\log(S_F)\text{dB} + 10\log\left(\frac{B_{ZF}}{\text{Hz}}\right)\text{dB} \quad (2)$$

dabei ist:

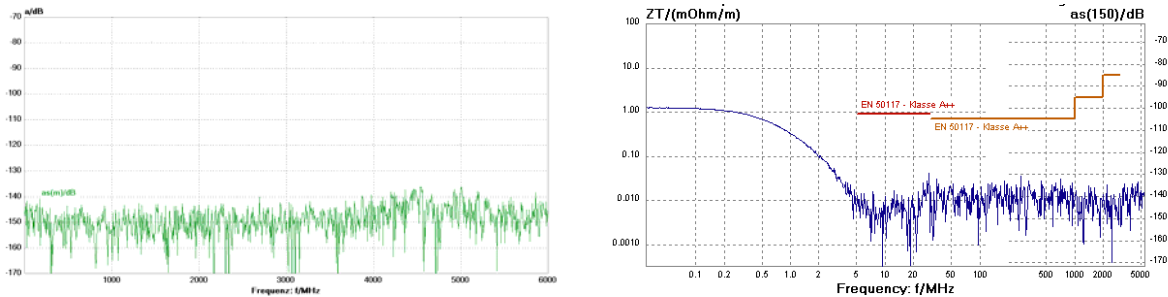
- Grundrauschen (noise level) der Empfängerseite des Mess-Systems in dBm
- Rauschzahl des Vorverstärkers des NWA in dB
- Bandbreite des Empfängers in Hz
- Formfaktor ≥ 1 , Verhältnis von Rauschbandbreite zu 3 dB Bandbreite des ZF-Filters, [5]
- dB(mW)

Wir erkennen hierbei die Wichtigkeit insbesondere der gewählten Empfängerbandbreite für einen ausreichend niedrigen Empfängerrauschpegel bzw. ausreichende Messdynamik.

3.2 Praktische Bestimmung der Messdynamik

Das Grundrauschen des NWA kann ermittelt werden, indem der Eingang mit einem Lastwiderstand oder einem Kurzschluss und der Ausgang mit einem Lastwiderstand

abgeschlossen werden und bei maximalem Ausgangspegel der Parameter S21 gemessen wird. Dabei sind die Herstellerangaben bezüglich möglicher Überlastungen zu beachten. Der Analysator ist vor dieser Messung entsprechend zu kalibrieren. Bei Abschluss des Eingangs ist das Rauschen etwas niedriger als bei Abschluss mit einem Kurzschluss.



Grundrauschen des NWA mit Lastwiderständen

max. Empfindlichkeit des CoMeT Systems

Bild 5 – Grundrauschen des NWA und Empfindlichkeit der Triaxialen Prüfeinrichtung

Das Grundrauschen bzw. die maximale Empfindlichkeit der triaxialen Prüfeinrichtung kann ermittelt werden, indem ein Kabel mit einem geschlossenen Kupferrohr als Prüfling in das Messrohr eingebaut und nach IEC 62153-4-3 bzw. IEC 62153-4-4 gemessen wird. Dabei wird allerdings die Speiseleitung zweckmäßigerweise über ein 50 dB Dämpfungsglied gedämpft um die Transferimpedanz des Prüfkabels komplett auszublenden.

Kabel mit Cu-Rohr als Außenleiter stehen z.B. als CATV-Kabel für Erdverlegung nach EN 50117-2-3 bzw. nach IEC 61196-1-5 zur Verfügung. Bild 5 zeigt rechts die Empfindlichkeit der triaxialen Prüfeinrichtung CoMeT mit einem Telass 220 CR und R&S ZNB8 bei 1 Hz ZF-Bandbreite und mit RG 214 als Messkabel ohne die Verwendung des vorgenannten 50dB Dämpfungsgliedes. Bei tiefen Frequenzen ist die Transferimpedanz der verwendeten Prüfleitung deutlich zu erkennen. Bis 4 GHz ergibt sich eine maximale Empfindlichkeit von ≥ 130 dB !

Messungen am Grundrauschen ergeben einen maximalen Fehler von 3 dB. Wenn 6 dB über dem Grundrauschen gemessen wird, beträgt der Fehler nur noch 1 dB, [6].

3.3 Einfluss der ZF-Bandbreite und der Sendeleistung

Wie vorhin erwähnt, bestimmt die verwendete ZF-Bandbreite maßgeblich die Messempfindlichkeit. Diese kann bei Bedarf durch Reduzieren der ZF-Bandbreite verbessert werden, siehe Gleichung 3 und Bild 6. Eine Reduzierung der ZF-Bandbreite um den Faktor 10 ergibt eine Erhöhung der Empfindlichkeit um 10 dB. Leider erhöht eine Reduktion der ZF-Bandbreite die Sweepzeit des Analysators.

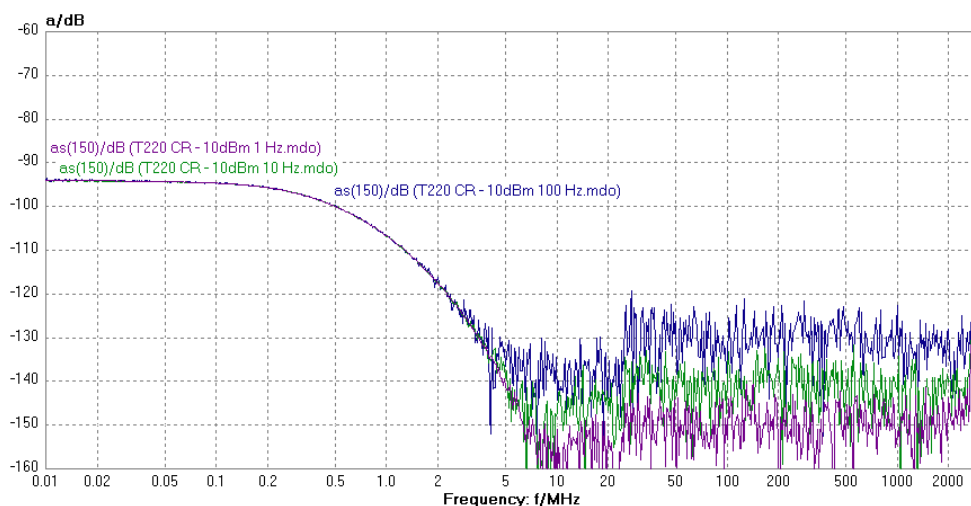


Bild 6 – Empfindlichkeit der triaxialen Prüfeinrichtung bei verschiedenen ZF-Bandbreiten mit Telass CR 220 bei 10 dBm Generatorleistung

Ebenso wirkt sich eine Erhöhung der verwendeten Sendeleistungen positiv auf die erreichbare Messdynamik aus. So kann die Ausgangs- bzw. Sendeleistung des Netzwerkanalysators z. Bsp. auf 10 dBm erhöht werden ohne das Ergebnis zu verfälschen. Im folgenden Diagramm sind Messergebnisse eines Telass 220 gegenübergestellt. Die grüne Kurve zeigt die Messung mit -10 dBm und die blaue Kurve die Messung mit +10 dBm.

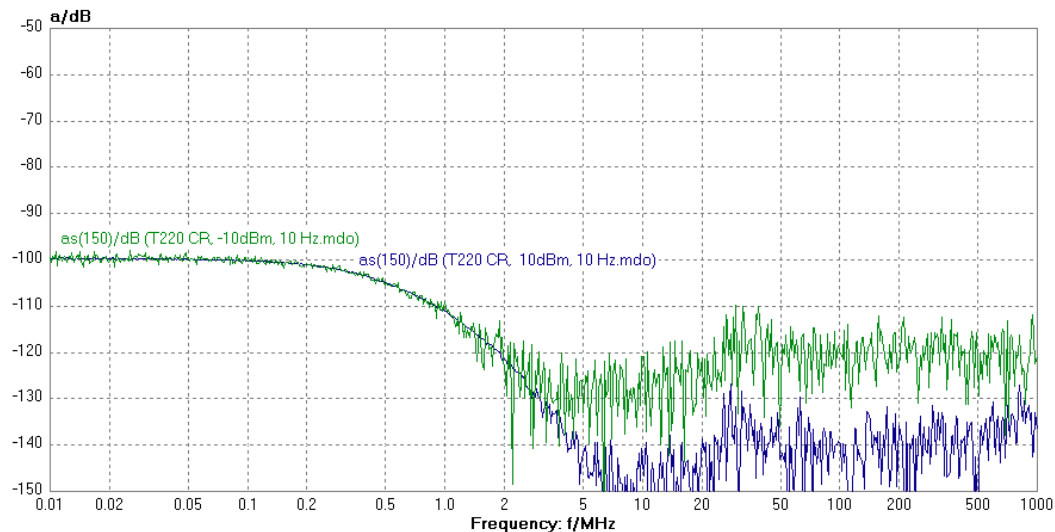


Bild 7 - Leistungsvergleich -10 dBm / 10 dBm bei 10 Hz ZF-Bandbreite

3.4 Kalibrieren bzw. Normalisieren

Messunsicherheiten ergeben sich aus zufälligen und aus systematischen Fehlern. Während zufällige Fehler nur statistisch beschrieben werden können, sind systematische Fehler reproduzierbar und lassen sich korrigieren. Moderne Netzwerkanalysatoren bieten umfangreiche Kalibrierverfahren an, [6].

Soll nur ein Parameter, z.B. der Parameter S21 gemessen werden, kann u.U. auf eine vollständige Kalibrierung verzichtet werden. Es wird nur die Einfügungs- bzw. die Betriebsdämpfung (S21) der Zuleitungen zum Messaufbau gemessen und vom Messwert abgezogen (Normalisieren).

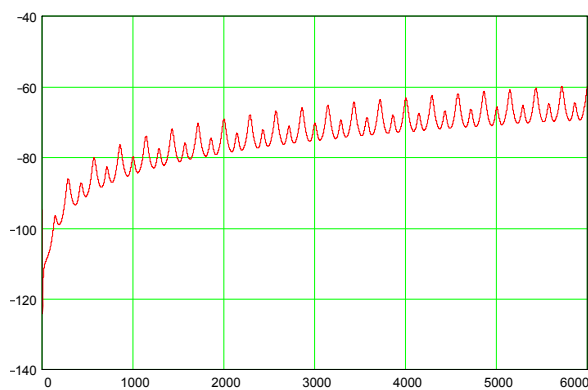
Auf jeden Fall ist die Messung mit kalibriertem Messaufbau der Messung mit einfachem Normalisieren vorzuziehen.

3.5 Verifizieren der Prüfeinrichtung

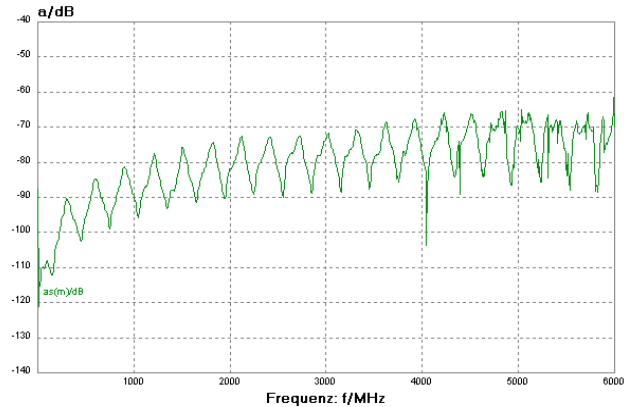
Von zahlreichen Anwendern des Triaxialverfahrens kommt die Forderung, das System kalibrieren bzw. verifizieren zu können.

In IEC 62153-4-7 ist in Abschnitt 6.6 die Ermittlung der Empfindlichkeit der Prüfeinrichtung mit Rohr in Rohr beschrieben. Dazu wird ein kurzes Stück eines hochgeschirmten Kabels (z.B. Semi-rigid Kabel) zwischen Rohr in Rohr und Messhülse eingespannt und gemessen. Der gemessene Wert ist die maximale Empfindlichkeit der Prüfeinrichtung.

Eine weitere Möglichkeit für einen Kalibrier- bzw. Verifizierstandard besteht aus einem Kabel mit einem geschlossenen Kupfer- oder Messingrohr als Außenleiter mit einem definierten Loch. Die Ergebnisse der Berechnung nach Kaden und der Messung eines Loches von 2 mm Durchmesser in einem Cu-Rohr mit 0,25 mm Wandstärke (Telass 220 CR) sind in Bild 8 dargestellt. (Triaxiale Prüfeinrichtung von 1 m, Loch von 2 mm in der Mitte des Prüflings).



Berechnung nach Kaden



Messung mit Triaxialverfahren nach IEC 62153-4-4

Bild 8 - Cu-Rohr mit Loch von 2 mm

Mit dem CoMeT-KalKit und dem "Rohr-in-Rohr"- Set steht jetzt eine Möglichkeit zur Kalibrierung/Verifizierung von Mess-Systemen nach IEC 62153-4-7 zur Verfügung. Das CoMeT-KalKit in Bild 9 liefert einen Wert der Schirmdämpfung im Bereich der Schirmungsklasse A nach EN 50117. Es wird mit einem entsprechenden Kalibrierprotokoll geliefert.

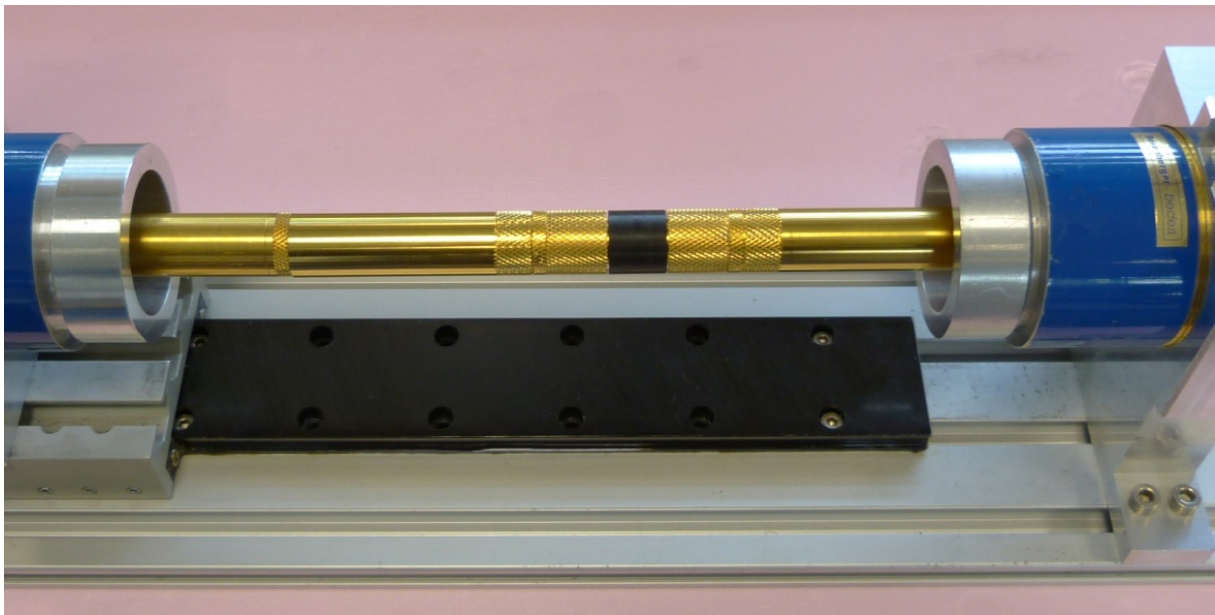


Bild 9 – Kalibrier- bzw. Verifiziernormal

3.6 DC – Vorprüfung

Vor der Schirmmessung des Steckers oder des konfektionierten Kabels mit dem CoMeT-System sollte eine "DC-Vorprüfung", d.h. eine Widerstandsmessung im mOhm-Bereich bei Gleichstrom bzw. niederfrequentem Wechselstrom durchgeführt werden. Damit können bereits Probleme im Vorfeld erkannt und ggf. beseitigt werden. Die Ergebnisse dieser Widerstandsmessung können als Verifikation eines gültigen Messaufbaus bzw. einer gültigen Umrechnung der Transferimpedanz aus der mit dem Netzwerkanalysator gemessenen Transferfunktion (S_{21}) dienen. Die Werte der Transferimpedanz sollen sich hierbei den Werten der Widerstandsmessung zu tiefen Frequenzen hin angleichen.

4 Messadapter

Die Messung der Schirmwirkung eines einzelnen Steckers oder eines konfektionierten Kabels ist nur mit einem geeigneten Messadapter möglich.

Ungeeignete Messadapter können die Messung durch Eigenemissionen erheblich beeinflussen. Daher sollten Qualifizierungsprüfungen an den verwendeten Messadaptern durchgeführt werden, um das Grundrauschen bzw. die Messgrenzen des Systems zu ermitteln. Falls für die Qualifizierungsprüfungen Anschlusskabel erforderlich sind, sollten diese vorzugsweise koaxial bzw. mit rundem Aussenleiter (Schirm) sein. Messungen werden solange als gültig erachtet, solange der Messwert um 6 dB über dem ermittelten Grundrauschen liegt.

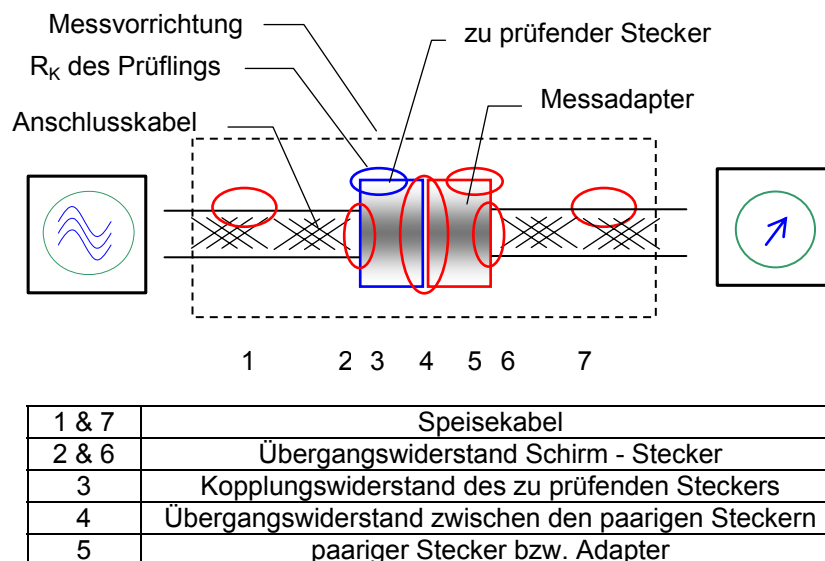


Bild 10 - Einflussgrößen bei der Schirmmessung eines Steckers

Im Falle von paarigen Steckern können Messadapter aus handelsüblichen Steckern hergestellt werden. Das Grundrauschen kann dann mit dem paarigen Stecker ermittelt werden und sollte so niedrig wie möglich sein. Das Ergebnis der Messung ergibt die maximale Empfindlichkeit des Messaufbaus mit den jeweiligen Prüfadaptern.

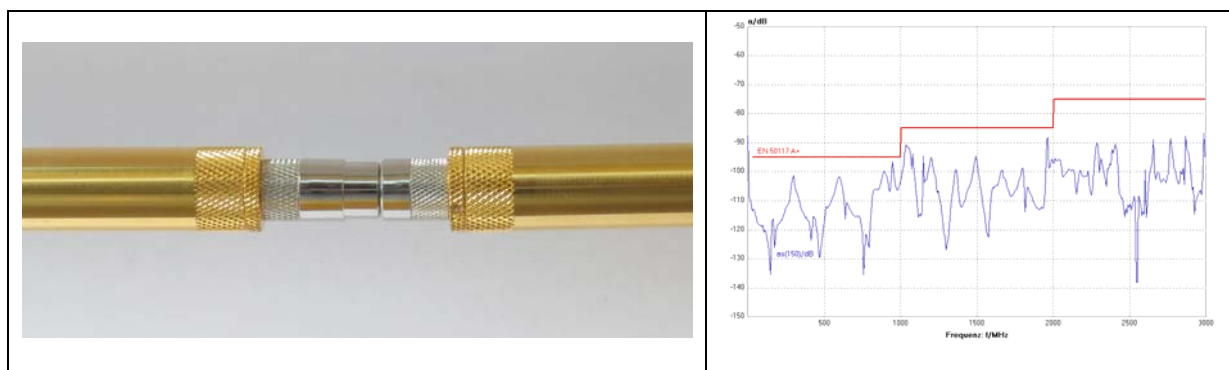


Bild 11 - Prüfadapter mit Rohr in Rohr-Verfahren nach IEC 62153-4-7

Das Ergebnis der Messung ergibt die maximale Empfindlichkeit des Messaufbaus mit den jeweiligen Prüfadaptern.

Bei der Messung von Anschlusskabeln mit paarigen Steckern (Stecker und Buchse) ist es u.U. einfacher, das Anschlusskabel zu zerschneiden und Stecker und Buchse miteinander zu verbinden. Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung können dann nach IEC 62153-4-3 und /-4-7 wie bei einem einfachen Kabel bestimmt werden. Damit wird der Einfluss der

Messadapter eliminiert. In Zweifelsfällen ist dieses Verfahren dem Verfahren mit Adaptern vorzuziehen. Werden Stecker und Buchse des konfektionierten Kabels mit kurzen Kabelstücken in die Hülsen der Triaxialen Prüfeinrichtung eingebaut, lassen sich auf diese Weise auch Messadapter herstellen.

5 Vorbereiten des Prüflings

5.1 Reinigen der Kontaktflächen

Zum Anschluss des Prüflings an die Prüfeinrichtung sowie beim Zusammenbau der Prüfeinrichtung kommen verschiedene Teile in Kontakt miteinander. Um einwandfreie Kontakte bzw. niedrige Übergangswiderstände zu erzielen, sind die Übergänge sorgfältig, vorzugsweise mit Alkohol, zu reinigen. Bei Messungen im Milliohm-Bereich können verschmutzte Kontakte das Messergebnis erheblich verschlechtern, (10 bis 20 dB). Liegen die Übergangswiderstände im Messkreis, werden sie bei der Messung des Kopplungswiderstandes zum Messwert addiert.

Wie sich ein schlechter Kontakt zwischen Messkopf und äußerem Rohrsystem auswirkt, zeigt das folgende Diagramm. Um die Auswirkungen eines schlechten Kontakts einmal drastisch zu demonstrieren, wurde zur Isolation Papier zwischen Kopf und Rohr geklemmt und damit der galvanische Kontakt unterbrochen.

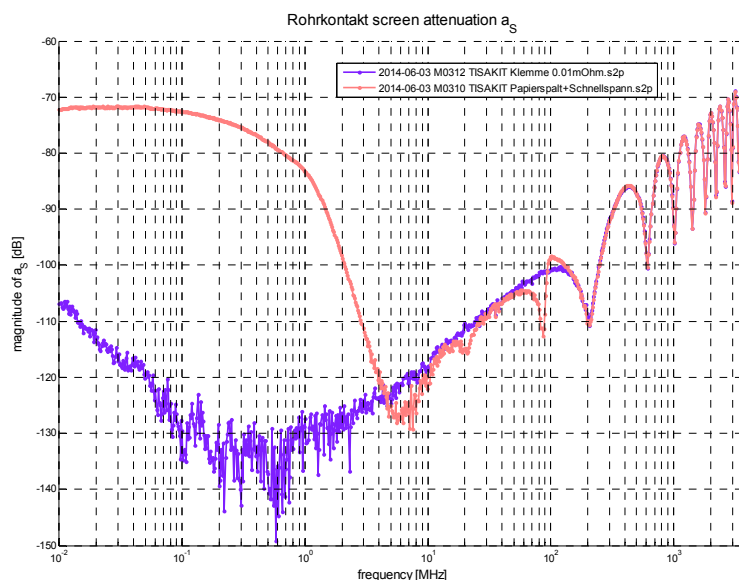


Bild 12 - Auswirkung des Rohrkontaktes

5.2 Durchhängen des Prüflings

Bei der Prüfung der Schirmdämpfung soll der Prüfling zentrisch in der Mitte des Messrohres eingebaut werden. Ein Durchhängen des Speisekabels im Messrohr führt zu Änderungen des Wellenwiderstandes Z_2 des äußeren Systems und damit zu Fehlern im Messergebnis. Das Durchhängen des Prüflings kann auf verschiedene Weise vermieden werden, z.B. durch Spannen des Prüflings, durch senkrechte Position des Messrohres oder durch eine Schaumstoffeinlage mit einem geeigneten Material mit niedriger Dielektrizitätskonstante und guten HF-Eigenschaften, z.B. Rohazell^R. Preiswerte Alternativen zu Rohazell^R sind z.B. Stützscheiben aus Styropor oder Isolierschläuche für Heizungsrohre. Untersuchungen an Isolierschläuchen für Heizungsrohre aus geschäumten PE ergaben keine nennenswerte Beeinflussung der Messergebnisse.

6 Triaxiale Zelle mit Schiebewand

Um wachsendem Platzbedarf, wie ihn z.B. automotiv Hochvolt-Komponenten benötigen, gerecht zu werden, entwickelte bedea mit Rosenberger die sogenannte Triaxiale Zelle. Diese basiert auf dem Prinzip der bekannten triaxialen Rohrmesstechnik nach IEC 62153-4-n und ermöglicht die Vermessung von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung von größeren Objekten.

Der in Bild 13 dargestellte Querschnitt durch die Triaxiale Zelle zeigt die prinzipielle Anordnung zur Messung der Schirmwirkung eines großen Steckverbinders. Zur Eliminierung der Beiträge der Anschlussleitungen wird hier das sog. "Rohr im Rohr" - Verfahren nach IEC 62153-4-7 verwendet, bei der ein zusätzliches Schirmrohr über der Anschlussleitung Verwendung findet.

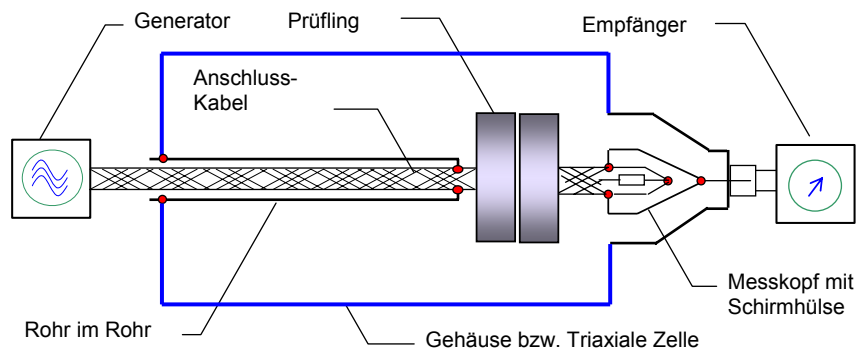


Bild 13 - Triaxiale Zelle mit "Rohr im Rohr", Prinzipdarstellung

Ein typisches Messergebnis eines RG11 Kabels in der Zelle ist in Bild 14 dargestellt. Hier erkennen wir bei tiefen Frequenzen den Kopplungswiderstand und am oberen Ende der gemessenen Bandbreite die Schirmdämpfung. Die Grenzwerte wurden nach EN 50289-1-6 berechnet. In der Überganszone zwischen Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung ergibt sich nun normgemäß ein undefinierter Bereich. Die Frequenzlage dieses undefinierten Bereichs wird durch die gewählte Mess- bzw. Zellenlänge bestimmt.

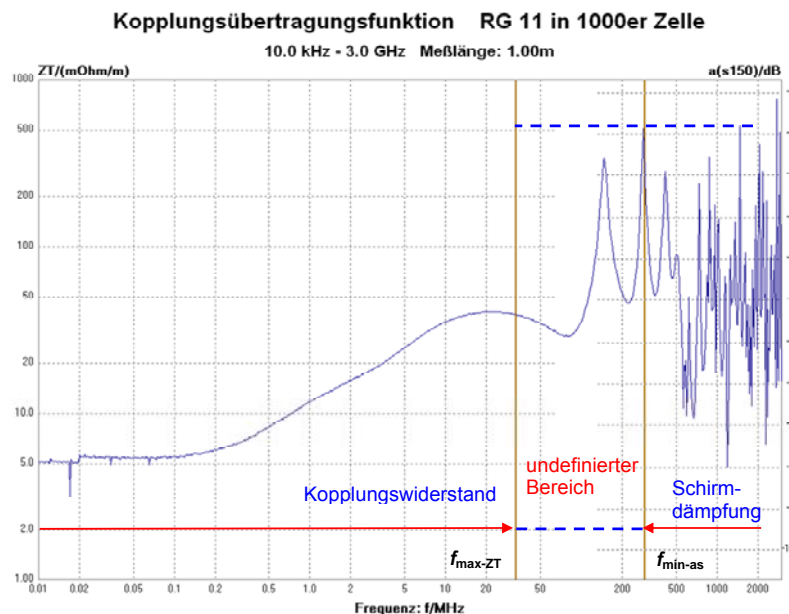


Bild 14 - Messergebnis eines Kabels RG11 in der Triaxialen Zelle - undefinierter Bereich

Die üblichen verfügbaren Zellenlängen betragen 750 – 1000mm. Damit liegt nun der undefinierte Bereich zwischen ca. 30 bis 300MHz, also in einem für Automotiv-Komponenten

sehr interessanten Frequenzbereich, in dem auch der leicht störbare Radioempfang stattfindet. Hier werden also möglichst genaue Ergebnisse benötigt.

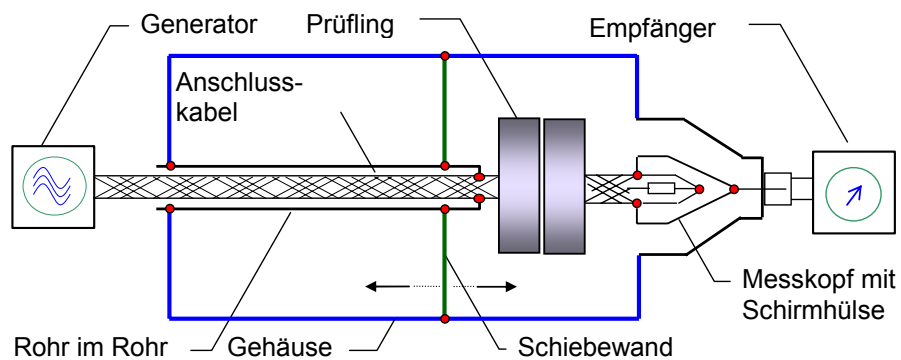


Bild 15 - Triaxiale Zelle mit verschiebbarer Kurzschlusswand

Die Einführung einer verschiebbaren Kurzschlusswand (Bild 15) löst das Problem des undefinierten Bereiches, indem die verwendete Zellenlänge bei der Messung nun variiert werden kann. Ziel hierbei ist es, den Frequenzbereich der Transferimpedanz durch verkürzen der Messlänge zu höheren Frequenzen hin zu verschieben.

Überlagert man nun die Messergebnisse eines HV-Steckverbinders mit verschiedenen Schiebewandpositionen (Bild 16), so wird zudem deutlich, dass verbleibende Bereiche mit welligen Einbrüchen sehr gut durch eine Hüllkurve über den Maximalwerten angenähert werden können.

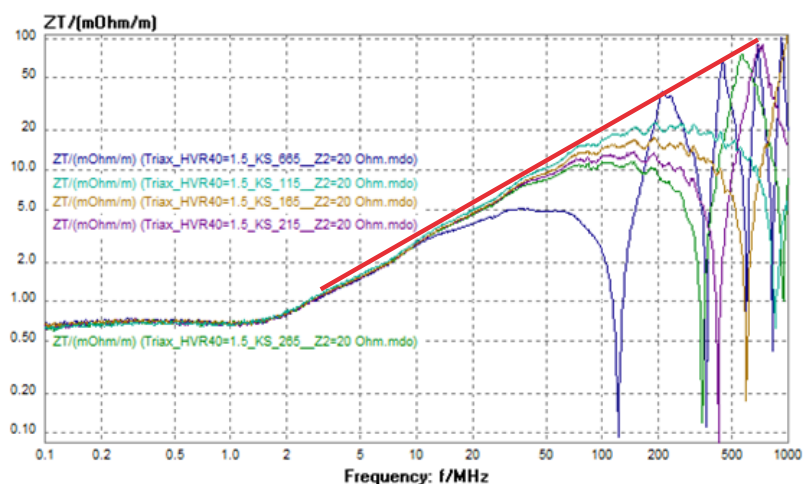


Bild 16 - Überlagerung der Messergebnisse mit unterschiedlichen Schiebewandpositionen - Hüllkurve ergibt Transferimpedanz des Prüflings

Die Hüllkurve beschreibt die theoretische Position der Aufenthaltsorte der gemessenen Maximalwerte beim Verschieben der Kurzschlusswand. So gelingt es, den undefinierten Bereich auszublenden und mit der Transferimpedanz des Prüflings zu überschreiben.

Die Triaxiale Zelle ist in der Norm IEC 62153-4-15 (46/510/CDV) beschrieben und wurde in der jüngsten Fassung um das Verfahren mit der Schiebewand erweitert.

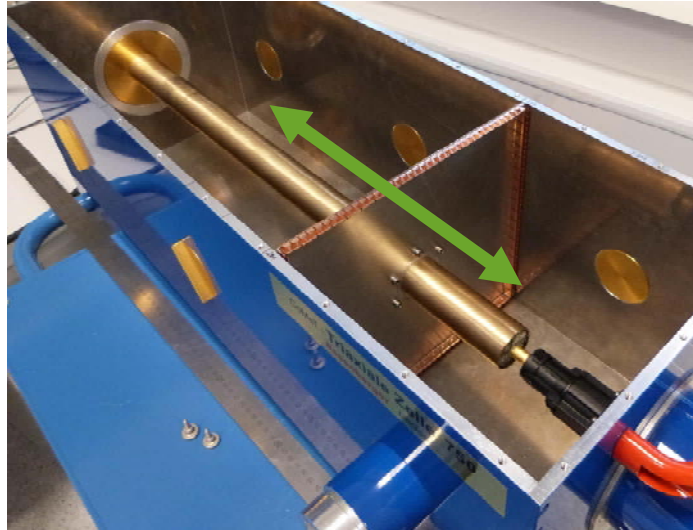


Bild 17 - Triaxiale Zelle mit Schiebewand

7 Zusammenfassung und Ausblick

Messungen von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung an Steckern und konfektionierten Kabeln nach IEC 62153-4-7 sind mit dem Triaxialverfahren und modernen Netzwerkanalysatoren im Bereich von $< 0,1$ mOhm bzw. bis zu 130 dB bis 3 GHz ohne Schirmkabine möglich. Dabei wird der Netzwerkanalysator mit niedriger ZF-Bandbreite und mit hoher Generatorleistung betrieben. Allerdings erfordern Messungen bei Schirmdämpfungen ≥ 85 dB besondere Sorgfalt beim Messaufbau und geschultes Personal.

Neue Verfahren wie die Einführung einer verschiebbaren Kurzschlusswand ermöglichen die Erweiterung der Messbereichs der Transferimpedanz bis in den UKW-Bereich und darüber hinaus. Mechanische Optimierungen beim System CoMeT ermöglichen eine Steigerung der Messgenauigkeit und eine Verbesserung der Handhabbarkeit.

8 Literatur

- [1] Lauri Halme & Bernhard Mund, Messen der Schirmwirkung elektrischer Kabel, Anwenderforum Elektrische Kabel, Technische Akademie Esslingen [TAE], 15. Oktober 2013
- [2] Ralf Damm, Bernhard Mund & Thomas Schmid, Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit bei der Messung der EMV von Steckern und Kabeln mit dem Triaxialverfahren, 8. Anwenderkongress Steckverbinder 2014, Vogel Verlag, Würzburg
- [3] Bernhard Mund, EMV von Kabeln, Steckern und HV-Komponenten mit dem Triaxialverfahren, 7. Anwenderkongress Steckverbinder 2013, Vogel Verlag, Würzburg
- [4] Bernhard Mund & Thomas Schmid: Schirmwirkung von HV-Leitungen mit der Triaxialen Zelle, 5. Anwenderkongress Steckverbinder 2011, Vogel Verlag, Würzburg
- [5] Bernhard Mund & Thomas Schmid: Messen der Schirmdämpfung von Steckverbindern, Kabeldurchführungen und EMV-Dichtungen, 3. Anwenderkongress Steckverbinder 2009, Vogel Verlag, Würzburg
- [6] Michael Hiebel, Grundlagen der modernen Netzwerkanalyse, Rohde und Schwarz 2007
- [7] IEC TR 62153-4-1 METALLIC COMMUNICATION CABLE TEST METHODS – Part 4-1: Introduction to Electromagnetic (EMC) Test Methods
- [8] Triaxiale Messtechnik CoMeT auf www.bedeia.com/Messtechnik