

Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit bei der Messung der EMV von Steckern und Kabeln mit dem Triaxialverfahren

Ralf Damm, Bernhard Mund, bedea Berkenhoff & Drebes GmbH, Herbornerstraße 100, 35614 Asslar, Germany,

Thomas Schmid, Rosenberger HF-Technik, Hauptstraße 1, 83413 Fridolfing, Germany

8. Anwenderkongress Steckverbinder 2014, Vogel Verlag, Würzburg

1 Kurzfassung und Einleitung

Das Triaxialverfahren zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung an Kabeln, Steckern und Komponenten ist weit verbreitet. Durch den geschlossenen Messaufbau sind Messungen über 130 dB und mehr bis zu und über 3 GHz mit modernen Netzwerkanalysatoren ohne Messkabine möglich.

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.

2 Grundrauschen, Empfindlichkeit und Messdynamik

2.1 Allgemeines

Bei einer Ausgangs- bzw. Sendeleistung des Netzwerkanalysators (NWA) von 10 dBm (= 10 mW bzw. 0,7 V an 50 Ohm) entspricht eine Schirmdämpfung von 120 dB einer Empfangsleistung von $10 \cdot 10^{-15}$ Watt (10 Femtowatt) bzw. einer Spannung von 0,7 Mikrovolt am Empfänger des NWA. Um bei solch niedrigen Pegeln bzw. Spannungen noch reproduzierbare Messergebnisse zu erzielen, ist besondere Sorgfalt beim Vorbereiten des Messaufbaus und bei der Durchführung der Messung erforderlich.

2.2 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 Mess-Sender 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 sind nun folgende Parameter erforderlich:

- Sendeleistung
- Dämpfungen der Anschlusskomponenten und des Messrohres
- Ggf. Verstärkung und Rauschzahl des LNA
- Empfängereigenrauschpegel

Nachfolgend zeigt Bild 1 ein Beispiel für eine Abschätzung der verfügbaren Messdynamik [6].

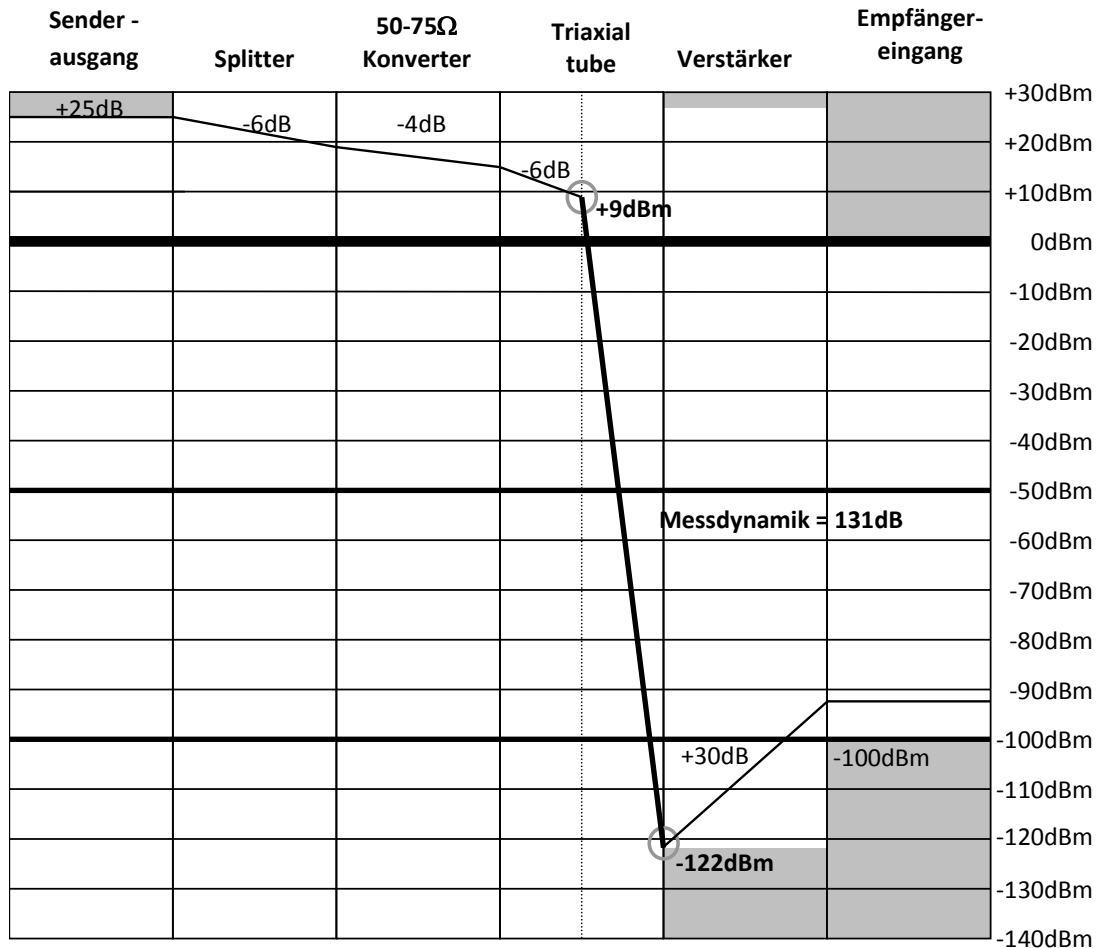


Bild 1 – Beispiel für Abschätzung der verfügbaren Messdynamik

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:

$$L_R = -174\text{dBm} + NF + 10\log(S_F)\text{dB} + 10\log\left(\frac{B_{ZF}}{Hz}\right)\text{dB} \quad (1)$$

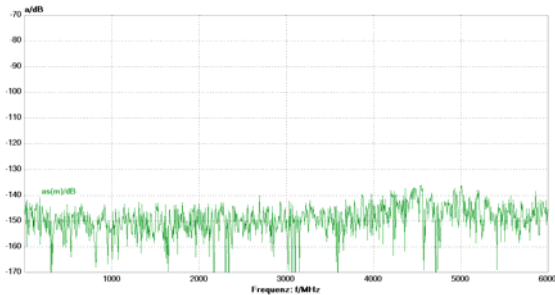
dabei ist:

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

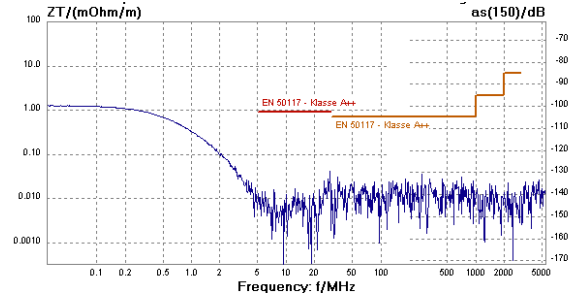
Wir erkennen hierbei die Wichtigkeit insbesondere der gewählten Empfängerbandbreite für einen ausreichend niedrigen Empfängerrauschpegel bzw. ausreichende Messdynamik.

2.3 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 2 – Grundrauschen des NWA und Empfindlichkeit der Triaxialen Prüfeinrichtung mit Telass CR 220

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 1 zeigt rechts die Empfindlichkeit der triaxialen Prüfeinrichtung CoMeT, [6], 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 Prüflleitung 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].

2.4 Einfluss der ZF-Bandbreite und der Sendeleistung

Wie oben erwähnt, bestimmt die verwendete ZF-Bandbreite maßgeblich die Messempfindlichkeit. Diese kann bei Bedarf durch Reduzieren der ZF-Bandbreite verbessert werden, siehe Gleichung 1 und Bild 3. 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.

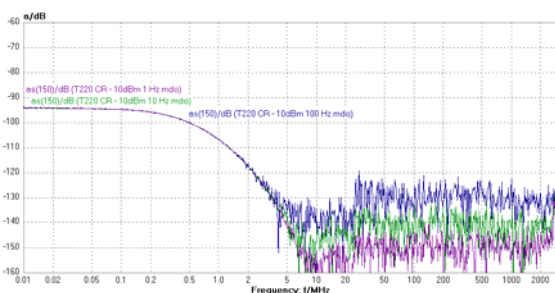


Bild 3 – Empfindlichkeit der triaxialen Prüfeinrichtung bei verschiedenen ZF-Bandbreiten bei 10 dBm Generatorleistung

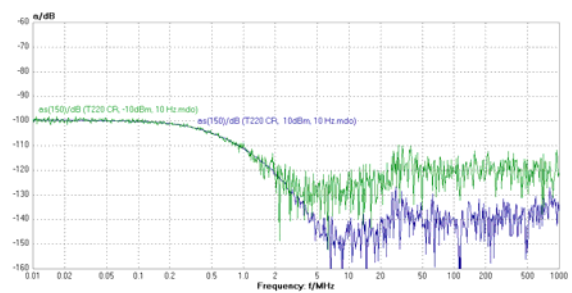


Bild 4 - Leistungsvergleich -10 dBm / 10 dBm bei 10 Hz ZF-Bandbreite

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. In Bild 4 sind die Ergebnisse einer Messung mit +10 dBm und mit -10 dBm dargestellt. Die grüne Kurve zeigt die Messung mit -10 dBm und die blaue Kurve die Messung mit 10 dBm.

2.5 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 [5].

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).

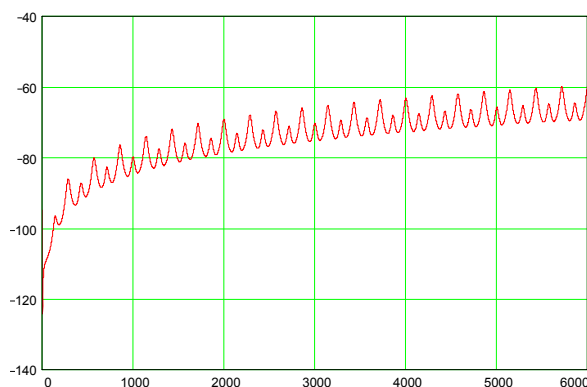
Auf jeden Fall ist die Messung mit kalibriertem Messaufbau der Messung mit einfachem Normalisieren vorzuziehen.

3 Verifizieren der Prüfeinrichtung

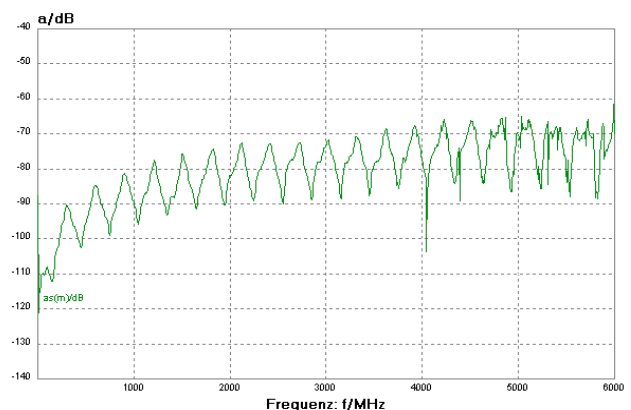
3.1 Allgemeines

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

Eine 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 5 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 5 - 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 6 liefert einen Wert der Schirmdämpfung im Bereich der Schirmungsklasse A nach EN 50117. Es wird mit einem entsprechenden Kalibrierprotokoll geliefert.



Bild 6 – Kalibrier- bzw. Verifiziernormal

3.2 Messadapter

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.

Bei der Messung der Schirmwirkung von Steckern und konfektionierten Kabeln nach IEC 62153-4-7 sind Messadapter erforderlich. Die Eignung der Messadapter bzw. die maximale Empfindlichkeit der Prüfeinrichtung mit den Messadaptern kann ebenfalls wie oben beschrieben, ermittelt werden. Dazu werden paarige Messadapter zusammengesteckt und an das Rohr in Rohr und an die Messhülse angeschlossen und gemessen, siehe Bild 6.

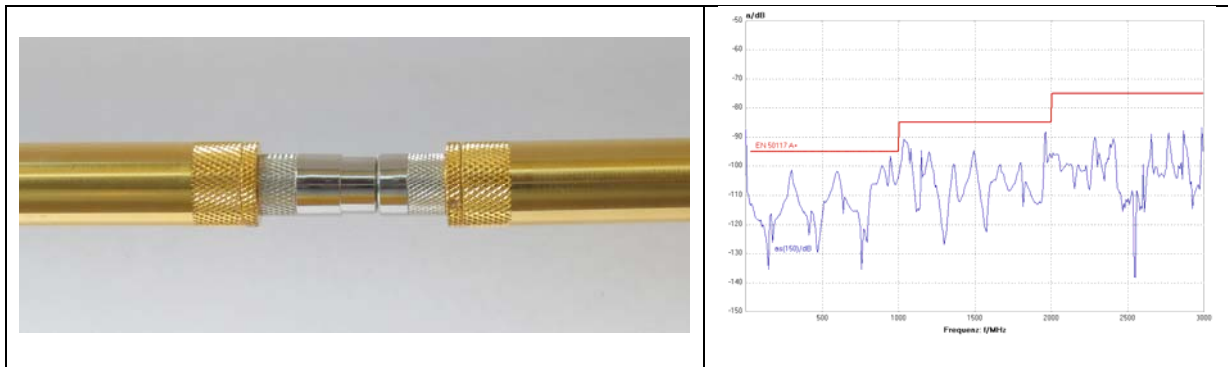


Bild 7 - Prüfadapter mit Rohr in Rohr-Verfahren nach IEC 62153-4-7

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

Bei 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 -4-3 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 so auch Messadapter herstellen.

4 Vorbereiten der Messeinrichtung und des Prüflings.

4.1 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 Kontakt einmal drastisch zu demonstrieren, wurde zur Isolation Papier zwischen Kopf und Rohr geklemmt und damit der Kontakt unterbrochen.

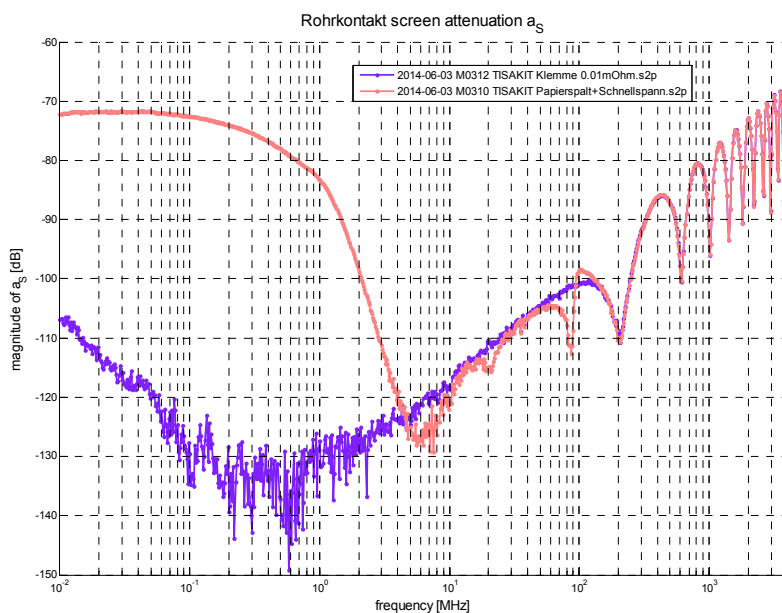


Bild 8 - Auswirkung des Rohrkontaktes

4.2 Durchhängen des Prüflings

Bei der Prüfung der Schirmdämpfung soll der Prüfling zentrisch in der Mitte des Messrohres eingebaut werden. Ein Durchhängen des Kabels 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 aus Baumärkten ergaben keine nennenswerte Beeinflussung der Messergebnisse.

4.3 Verbesserungen des Triaxialverfahrens

Das Triaxialverfahren wurde vor ca. 30 Jahren als Alternative und Erweiterung zum Zangenverfahren entwickelt, um höhere Schirmdämpfungen ohne Messkabine und um Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung mit einem Messaufbau zu messen.

Die Anforderungen an die Schirmdämpfung von CATV-Kabeln lagen damals bei 75 dB. Inzwischen gilt es, Kopplungswiderstände von < 1 mOhm/m und Schirmdämpfungen von

mehr als 120 dB zu messen. Damit steigen die Anforderungen an den mechanischen Prüfaufbau erheblich. Alle mechanischen Teile müssen exakt an den Prüfling passen und den Prüfling "HF-dicht" mit dem Messrohr verbinden.

Die mechanischen Komponenten des CoMeT Systems wurden stetig den höheren Anforderungen entsprechend angepasst und neue Komponenten entwickelt. Dabei wurden und werden die Änderungen der Normen entsprechend berücksichtigt.



Bild 9 – Kopfhülse für hohe Schirmwerte

Für hohe Schirmdämpfungen steht eine modifizierte Kopfhülse zur Verfügung, siehe Bild 9. Der Kurzschluss am sendernahen Ende kann durch Halbschalen mit Konus realisiert werden, siehe Bild 10. Diese werden mit einer Klemmscheibe an den Schirm gedrückt, gleichzeitig wird durch die Klemmscheibe das Verdrehen des Prüflings im Rohr verhindert.

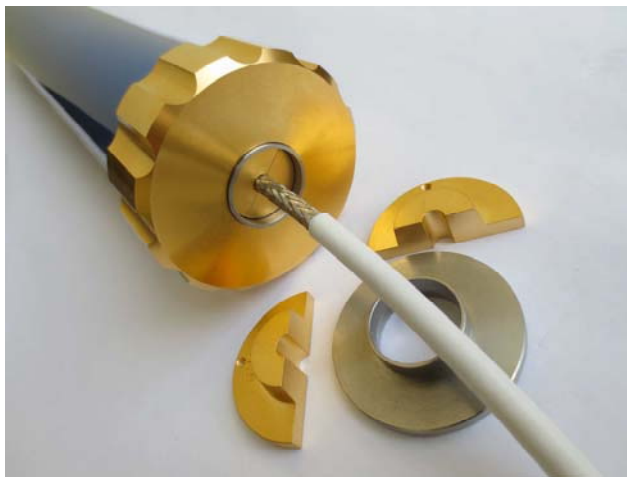


Bild 10 – Modifizierter Kurzschluss mit Klemmkonus



Bild 11 neue Rohrleitung

Um Schirmdämpfungen im Bereich von ≥ 85 dB zu messen, müssen alle mechanischen Teile exakt an den zu prüfenden Schirm passen. Mit entsprechend angepassten mechanischen Teilen und bei sorgfältigem Messaufbau liegt die Messgrenze mit einem handelsüblichen Netzwerkanalysator bei $< 50 \mu\text{Ohm}$ bzw. bei > 135 dB, siehe Bild 2.

Stehen in der Standardausführung des CoMeT-Systems keine passenden Teile für die jeweilige Messaufgabe zur Verfügung, müssen diese ggf. für angepasst oder u.U. neu angefertigt werden.

Für die Verbesserung bei der Rohr in Rohr Messung wurde eine neue Rohrleitung (Bild 11) entwickelt, die die bisherige Klemmtechnik mit Klemmkonus ersetzt. Die Klemmkonustechnik hatte den Nachteil, dass sie beim Festziehen einen zuzüglichen Druck auf das Innenrohr ausübte, bzw. das Innenrohr bis zu zwei Millimeter weiter hineinzog als vorgesehen.

5 Eigenschaften von Kabeln

5.1 Längsgleichmässigkeit

In der Theorie wird häufig von idealen Kabeln ausgegangen, die es so in der Praxis nicht gibt. Während der verschiedenen Fertigungsschritte werden den Kabeln sowohl periodische

als auch zufällige Störungen aufgeprägt, die üblicherweise innerhalb von festgelegten Grenzwerten liegen. Dies können z.B. geringfügige Schwankungen im Durchmesser sein, die sich im nächsten Fertigungsschritt auch auf den Kabelschirm auswirken. Diese Schwankungen, die den vorgesehen Einsatz der Kabel nicht beeinträchtigen, können aber z.B. bei Konstruktionen aus Folie und Geflecht durchaus zu Abweichungen der Schirmdämpfung über die Kabellänge im Bereich von +/- 3 dB führen.

5.2 Langzeitverhalten von CATV-Kabeln

Die Schirmwirkung verschiedener CATV-Kabel wurde über einen Zeitraum von 1 Woche beobachtet. Dabei wurde der Kopplungswiderstand und die Schirmdämpfung von 10 kHz bis zu 3 GHz mit dem Triaxialverfahren gemessen. Die Kabel wurden mit einer Schaumstoffeinlage spannungsfrei im Rohr zentriert. Der Prüfaufbau wurde zwischen den Messungen völlig in Ruhe gelassen.

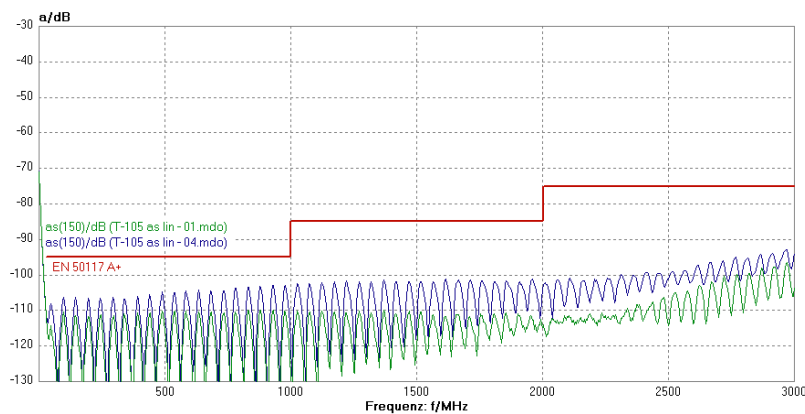


Bild 12 - Schirmdämpfung direkt und nach vier Tagen

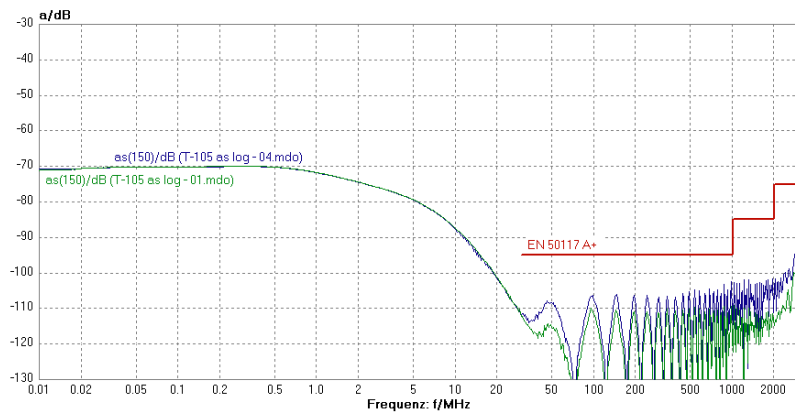


Bild 13 - Kopplungsübertragungsfunktion direkt und nach vier Tagen

Nach 3 bis 4 Tagen wurden Änderungen der Schirmdämpfung von bis zu 8 dB gemessen. Dies gilt sowohl für foliengeschirmte Kabel mit CELL-PE Isolierung als auch für Kabel mit Einfachgeflechten mit massiver PE Isolierung. (Im Bereich des Kopplungswiderstandes ergaben sich keine Änderungen).

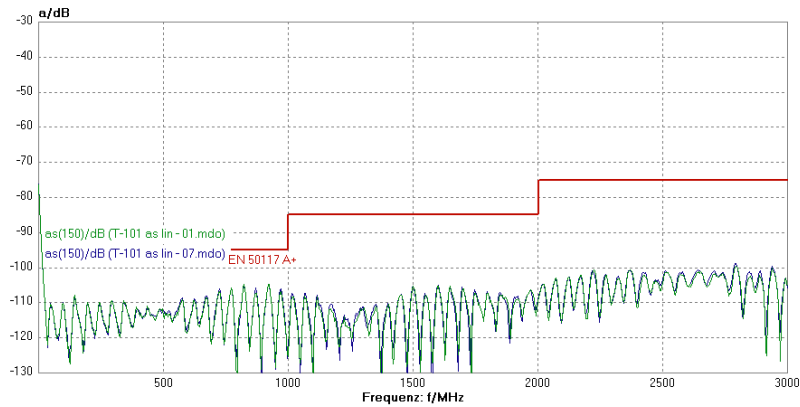


Bild 14 - Schirmdämpfung nach Biegebelastung direkt und nach vier Tagen

Wenn die Kabel, wie in den Normen der Reihe EN 50117 gefordert, vor der Prüfung gemäß EN-50289-3-9 durch ein Rollenpaar gezogen werden (s. Bild 15), tritt dieser Effekt nicht auf.

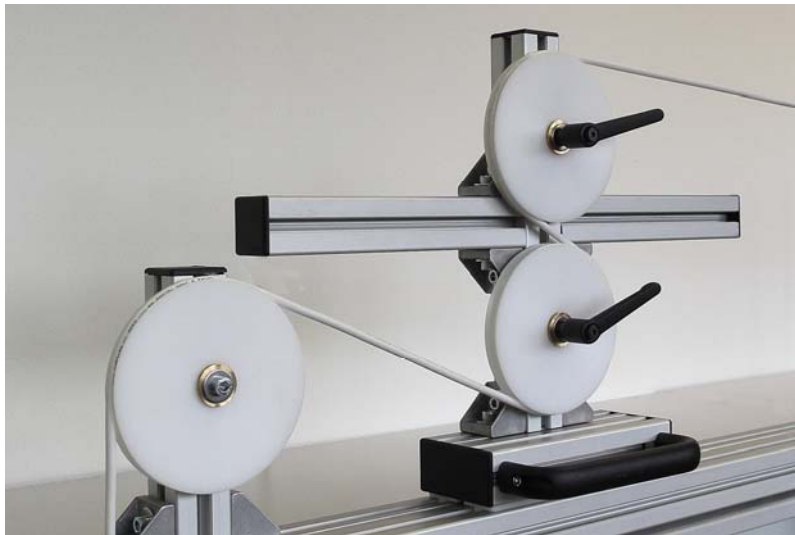


Bild 15 – Biegevorrichtung nach EN 50117 bzw. nach EN 50289-3-9

6 Zusammenfassung und Ausblick

Messungen der Schirmdämpfung sind mit dem Triaxialverfahren und modernen Netzwerkanalysatoren über 130dB bis zu und über 3 GHz ohne Schirmkabine möglich. Dabei ist der NWA mit niedriger ZF-Bandbreite und mit hoher Generatorleistung zu betreiben.

Rundversuche der Messung der Schirmdämpfung mit 7 Teilnehmern ergaben eine Reproduzierbarkeit von +/- 3dB bei 85dB Schirmdämpfung. Allerdings erfordern Messungen bei Schirmdämpfungen ≥ 85 dB besondere Sorgfalt beim Messaufbau und geschultes Personal.

Hohe Messgenauigkeiten können durch sorgfältigen Messaufbau mit geeigneten Komponenten und durch geschultes Personal erreicht werden. Mit dem CoMeT Kalkit kann das Triaxialverfahren kalibriert bzw. verifiziert werden

Die Messgenauigkeit bzw. die Reproduzierbarkeit der Schirmwirkung von Kabeln und "Assemblies" hängt u.a. vom Prüfobjekt selbst ab. Kabelkonstruktionen aus Folien und Geflechtes sind "instabile" Gebilde; sie können über die Kabellänge Unterschiede aufweisen sowie ihre Schirmwirkung über die Zeit verändern. Prüflinge sollten daher vor der Messung entsprechend den jeweiligen Normen konditioniert werden, siehe Bild 15.

7 Literatur

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

Weitere Informationen:

Ralf Damm, rdamm@bedeia.com

Bernhard Mund, bmund@bedeia.com

Thomas Schmid, Thomas.Schmid@rosenberger.de