

EMV von Kabeln, Steckern und HV-Komponenten mit dem Triaxialverfahren

Neue und überarbeitete Normen und Messverfahren der Reihe IEC 62153-4-x

Bernhard Mund, bedea Berkenhoff & Drebes GmbH, Asslar, Deutschland

1 Kurzfassung

Die Reihe IEC 62153-4-x beschreibt u.a. verschiedene Verfahren zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirm- oder Kopplungsdämpfung mit dem Triaxialverfahren.

Neue Kabelkonstruktionen, z.B. HV-Kabel für Elektrofahrzeuge mit Wellenwiderständen im Bereich von 10 Ohm erforderten die Anpassung einiger Normen dieser Reihe.

Die überarbeiteten Normen IEC 62153-4-3, -4-4 und -4-7 ermöglichen jetzt die Messung der Schirmeigenschaften von Kabeln, Steckern und Komponenten mit Fehlanpassung, Impedanzwandler sind nicht mehr erforderlich.

Die Messung der Kopplungsdämpfung von symmetrischen Kabeln oder Komponenten erfordert die Impedanzanpassung des 50 Ohm Gleichtaktsignals des Netzwerkanalysators an das 100 Ohm Gegentaktsignal des Prüflings. Dies geschieht üblicherweise mit Symmetrieübertragern (Baluns). Allerdings sind handelsübliche Symmetrieübertrager nur bis zu Frequenzen von ca. 1.200 MHz erhältlich. Der Einsatz von Multiport-Netzwerkanalysatoren ermöglicht die Messung der Kopplungsdämpfung von geschirmten symmetrischen Paaren bis zu und über 2 GHz.

Größere Stecker Anschluss-Schnüre und Komponenten passen nicht in die, ursprünglich für Kommunikationskabel entwickelten Messrohre des Triaxialverfahrens. Zur Messung der Schirmwirkung größerer Bauteile wurde daher die "Triaxiale Zelle" entwickelt.

Der folgende Bericht gibt eine Übersicht über neue und überarbeitete Normen der Reihe IEC 62153-4-x zur Messung der EMV-Eigenschaften von Kabeln, Steckern und HV-Komponenten mit dem Triaxialverfahren. Die Messung der Kopplungsdämpfung an symmetrischen Kabeln und Steckern mit Multiport-Netzwerkanalysatoren nach IEC 62153-4-7 bzw. nach IEC 62153-4-9 sowie der Einsatz der "Triaxiale Zelle" nach IEC 62153-4-15 werden beschrieben.

2 Kopplungswiderstand, IEC 62153-4-3, Ausgabe 2

2.1 Allgemeines

Es gibt in der neuen Ausgabe der IEC 62153-4-3Ed2 jetzt drei unterschiedliche Prüfverfahren:

Prüfverfahren A: Angepasster innerer Kreis mit Dämpfungswiderstand R_2 im Aussenkreis,

Prüfverfahren B: Innerer Kreis mit Abschlusswiderstand und äußerer Kreis ohne Dämpfungswiderstand,

Prüfverfahren C: (Fehlangepasst)-Kurzschluss- Kurzschluss ohne Dämpfungswiderstand.

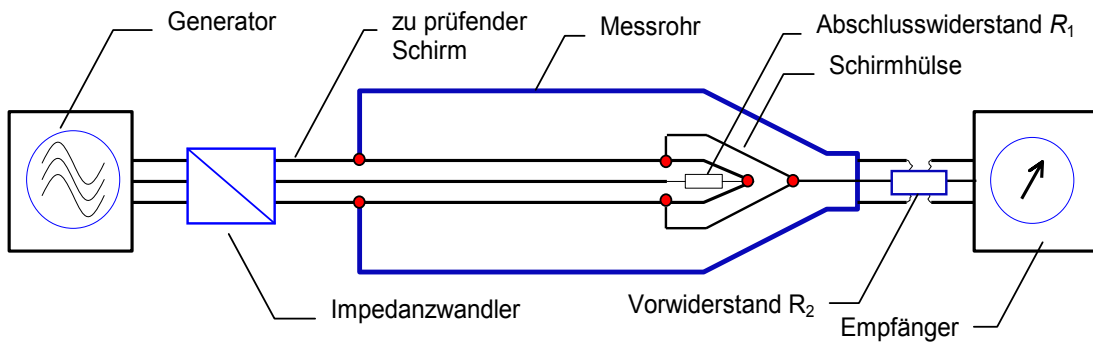


Bild 1a - Prüfverfahren A: Angepasster innerer Kreis mit Dämpfungswiderstand R_2 im Aussenkreis

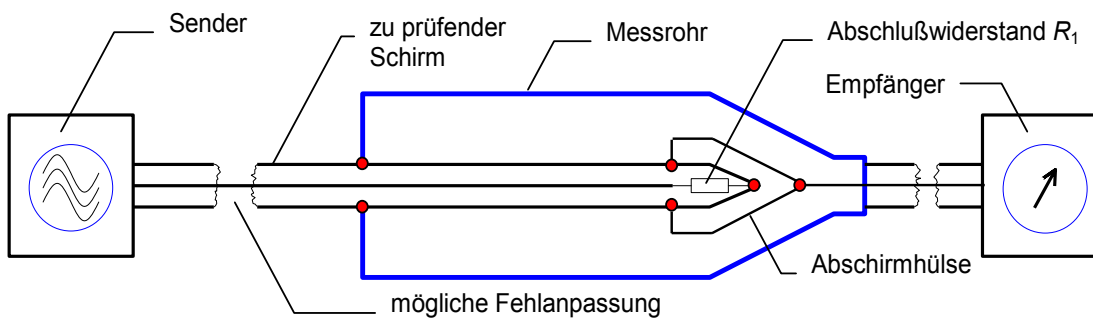


Bild 1b - Prüfverfahren B: Innerer Kreis mit Abschlußwiderstand und äußerer Kreis ohne Dämpfungswiderstand.

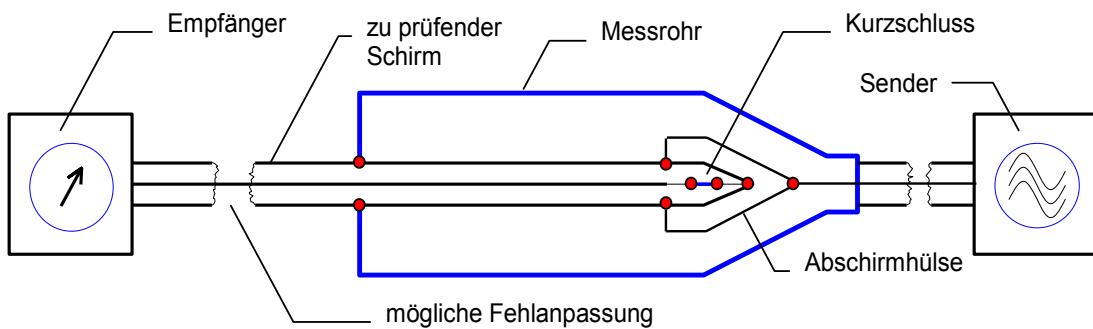


Bild 1c - Prüfverfahren C: (Fehlangepasst)-Kurzschluss- Kurzschluss ohne Dämpfungswiderstand.

Bild 1 – Verschiedene Prüfaufbauten der Ausgabe 2 der IEC 62153-4-3 und 62153-4-4

2.2 Prüfverfahren A: Angepasster innerer Kreis mit Dämpfungs- bzw. Vorwiderstand

Bei diesem Verfahren wird der innere Kreis (Prüfling) mit einem angepassten Lastwiderstand abgeschlossen ($R_1 = Z_1$); der innere Kreis wird als der störende Kreis angesehen; d.h. er wird vom Generator gespeist. Falls der Wellenwiderstand des inneren Kreises unbekannt ist, kann er, z.B. mit dem "open-short"-Verfahren nach Anhang A der IEC 62153-4-3Ed.2 gemessen werden.

Der Schirm des zu prüfenden Kabels oder der zu prüfenden Komponente wird am sendernahen Ende mit dem Messrohr kurzgeschlossen, am fernen Ende wird der Messkopf über den Dämpfungswiderstand R_2 an den Empfänger angeschlossen.

Falls der Wellenwiderstand des Prüflings vom Wellenwiderstand des Generators abweicht, wird ein Impedanzwandler eingesetzt. Falls kein handelsüblicher Impedanzwandler verfügbar ist, kann er z.B. nach Anhang B der IEC 62153-4-3Ed2 selbst hergestellt werden.

Der Vorteil des Verfahrens A liegt in der hohen Grenzfrequenz. Allerdings wird der Dynamikbereich durch den Dämpfungswiderstand und durch den Impedanzwandler eingeschränkt. Der Dämpfungswiderstand R_2 ergibt sich nach IEC 62153-4-3 zu:

$$R_2 = A \times 60 \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) - 50 \quad \text{mit} \quad A = \sqrt{2} \quad \text{oder} \quad A = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} \quad (1a, 1b)$$

dabei ist

D	der Innendurchmesser des Rohres;
d	der Aussendurchmesser des Kabelschirms;
ϵ_{r1}	die Dielektrizitätskonstante des inneren Kreises;
ϵ_{r2}	die Dielektrizitätskonstante des äußeren Kreises.

2.3 Prüfverfahren B: Innerer Kreis mit Abschlusswiderstand und äußerer Kreis ohne Dämpfungs- bzw. Vorwiderstand

Dieses Verfahren ist das gleiche wie Verfahren A: Angepasster innerer Kreis mit Abschlusswiderstand R_1 , allerdings ohne Impedanzwandler und ohne den Dämpfungswiderstand R_2 . Dieses Verfahren hat eine höhere Dynamik. Der Abschlusswiderstand R_1 sollte vorzugsweise dem Wellenwiderstand Z_1 des Prüflings entsprechen, ($R_1 = Z_1$).

2.4 Prüfverfahren C: (Fehlangepasst)-Kurzschluss- Kurzschluss ohne Dämpfungs- bzw. Vorwiderstand

Bei diesem Verfahren sind sowohl der innere als auch der äußere Kreis an einem Ende kurzgeschlossen; d.h. der Dämpfungswiderstand R_2 und der Abschlusswiderstand R_1 werden durch Kurzschlüsse ersetzt. Ein Impedanzwandler wird nicht eingesetzt, (siehe Bild 1c).

Im Gegensatz zu Verfahren A und B speist der Generator bei Verfahren C den äußeren Kreis (das Messrohr) und der innere Kreis (das zu prüfende Kabel) wird an den Empfänger angeschlossen. Bei dieser Prüfeinrichtung wird der Einfluss der kapazitiven Kopplung durch die Kurzschlüsse im inneren und im äußeren Kreis unterdrückt. Das Verfahren ist sehr empfindlich und daher geeignet, sehr niedrige Kopplungswiderstände zu messen, (bis zu $1 \mu\Omega/m$ und niedriger).

2.5 Messung und Auswertung

Der Streuparameter a_{meas} bzw. S_{21} ist bei allen Verfahren (vorzugsweise mit logarithmischer Frequenzachse) über den gesamten, für den Kopplungswiderstand festgelegten Frequenzbereich und an den gleichen Punkten wie während des Kalibrierens zu messen.

$$a_{\text{meas}} = 10 \cdot \log_{10}(P_1 / P_2) = -20 \cdot \log_{10}(S_{21}) \quad (2)$$

dabei ist:

- P_1 die Leistung, die in den inneren Kreis eingespeist wird;
 P_2 die Leistung im äußeren Kreis.

Die Umwandlung der gemessenen Dämpfung in den Kopplungswiderstand geschieht nach folgenden Gleichungen:

Verfahren A:

$$Z_T = \frac{R_1 \cdot (Z_0 + R_2)}{Z_0 \cdot L_c} \cdot 10^{-\left\{ \frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}} - (a_{\text{pad}} + 10 \log_{10}(Z_0 / Z_1))}{20} \right\}} \quad (3)$$

Verfahren B:

$$Z_T = \frac{R_1 + Z_0}{2 \cdot L_c} \cdot 10^{-\left\{ \frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}}}{20} \right\}} \quad (4)$$

Verfahren C:

$$Z_T = \frac{Z_0}{2 \cdot L_c} \cdot 10^{-\left\{ \frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}}}{20} \right\}} \quad (5)$$

dabei ist:

- Z_0 der Systemwellenwiderstand (üblicherweise 50 Ω),
 Z_1 der Wellenwiderstand des inneren Kreises bzw. des Prüflings,
 Z_T der Kopplungswiderstand,
 a_{meas} die gemessene Dämpfung,
 a_{cal} die Dämpfung der Verbindungskabel, falls nicht während des Kalibrierens der Prüfeinrichtung eliminiert,
 a_{pad} die Dämpfung des Impedanzwandlers,
 L_c die Kopplungslänge,
 R_1 der Abschlusswiderstand im inneren Kreis.

3 Schirmdämpfung, IEC 62153-4-4, Ausgabe 2

Die Schirmdämpfung a_S ist definiert als das logarithmische Verhältnis von der, in das Kabel eingespeisten Leistung P_1 zu der, vom Kabel abgestrahlten Leistung P_2 .

$$a_S = 10 \cdot \log(P_1 / P_2) = 20 \cdot \log(U_1 / U_2) \quad (6)$$

Änderungen zu Ausgabe 1: Die Norm IEC 62153-4-4 wurde erweitert und auf die Erfordernisse bei der Messung von geschirmten Kabeln mit nicht standardisierten Wellenwiderständen angepasst, (z.B. HV-Kabel mit ca. 10 Ohm Wellenwiderstand).

Bisher wurde die Schirmdämpfung bei angepassten Verhältnissen nach Bild 1a gemessen, (Abschluss des Prüflings mit seinem Wellenwiderstand, ($R_1 = Z_1$), und Anpassung des Prüflings an den Wellenwiderstand des Generator mit einem Impedanzwandler).

Ausgabe 2 der IEC 62153-4-4 erlaubt jetzt sowohl die Messung mit Anpassung als auch mit Fehlanpassung zwischen Sender und Prüfling. Ein Impedanzwandler ist nicht mehr erforderlich. Lediglich der Prüfling wird am senderfernen Ende mit seinem Wellenwiderstand abgeschlossen. Bei der Messung mit Fehlanpassung ist zunächst der Wellenwiderstand des Kabels bzw. des Prüflings zu ermitteln, z.B. mit dem „open-short“ Verfahren nach Anhang A der IEC 62153-4-4.

Der Messaufbau nach Ausgabe 2 der IEC 62153-4-4 entspricht Bild 1b.

Die Schirmdämpfung a_S , welche mit den Ergebnissen des Zangenverfahrens vergleichbar ist, ergibt sich bei Fehlanpassung und mit dem normalisierten Wert $Z_S = 150 \Omega$ zu:

$$a_S = 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{P_1}{P_{r,\max}} \right| = 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{P_1}{P_{2,\max}} \cdot \frac{2 \cdot Z_S}{Z_1} \right| \quad (7)$$

$$= \text{Env} \left\{ -20 \cdot \log_{10} |S_{21}| + 10 \cdot \log_{10} |1 - r^2| + 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{300 \Omega}{Z_1} \right| \right\} \quad (8)$$

dabei ist:

a_S die Schirmdämpfung bezogen auf den normalisierten Wellenwiderstand der Umgebung von 150Ω in dB,

Env die minimale Hüllkurve der gemessenen Werte, in dB,

r der Reflexionsfaktor = $\left| \left(\frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1} \right) \right|$

Z_0 der System-Wellenwiderstand bzw. der Generatorwiderstand, in Ω , (üblicherweise 50Ω),

Z_1 der Wellenwiderstand des Prüflings, in Ω .

Der Term $|1 - r^2|$ stellt hier die Reflexionsdämpfung durch die Fehlanpassung zwischen Generator und Prüfling dar. Bei einer Fehlanpassung von 50 Ohm Generatorwiderstand auf 10 Ohm des Prüflings ergibt sich damit ein Korrekturwert von ca. $2,5 \text{ dB}$.

4 Symmetrische Kabel, Stecker und Komponenten

4.1 Allgemeines

Bei der Messung der Schirmwirkung von symmetrischen Kabeln, Steckern und Komponenten ist zunächst zu entscheiden, ob Kopplungswiderstand, Schirmdämpfung oder Kopplungsdämpfung gemessen werden soll.

Zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung werden geschirmte symmetrische Kabel, Stecker und Komponenten als ein quasi-koaxiales System betrachtet (Bild 3 a). Daher müssen die Leiter aller Paare an beiden Enden zusammengeschaltet werden. Andere Konfigurationen der Verbindungen der Leiter sind ggf. mit dem Kunden/Anwender abzustimmen.

4.2 Vorbereiten symmetrischer Komponenten und Stecker

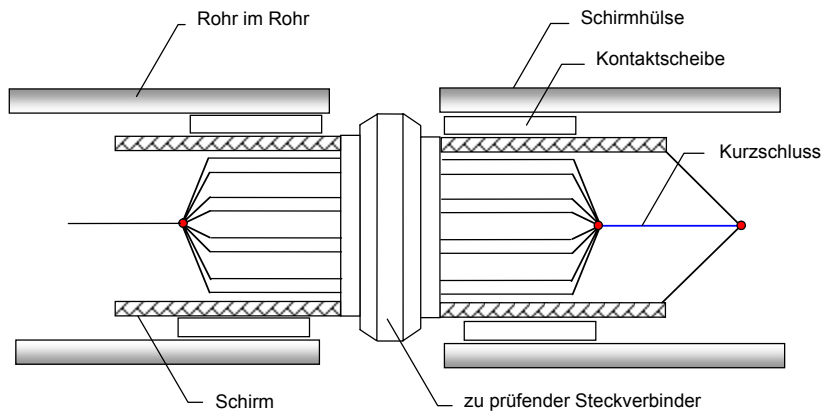


Bild 3a – Kopplungswiderstand mit Kurzschluss

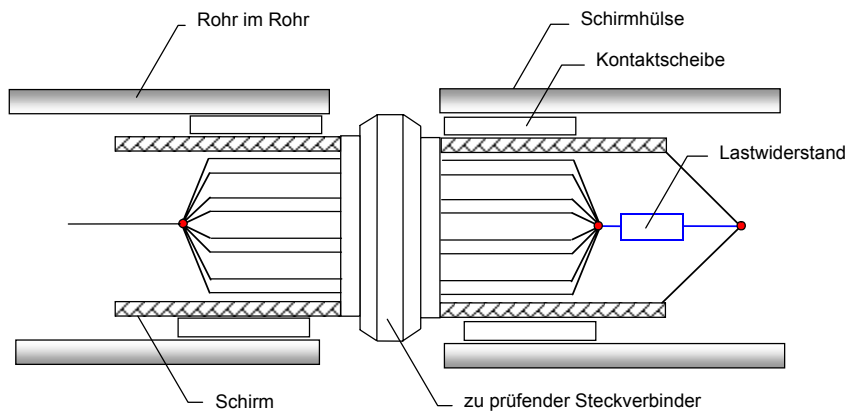


Bild 3b – Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung mit Anpassung

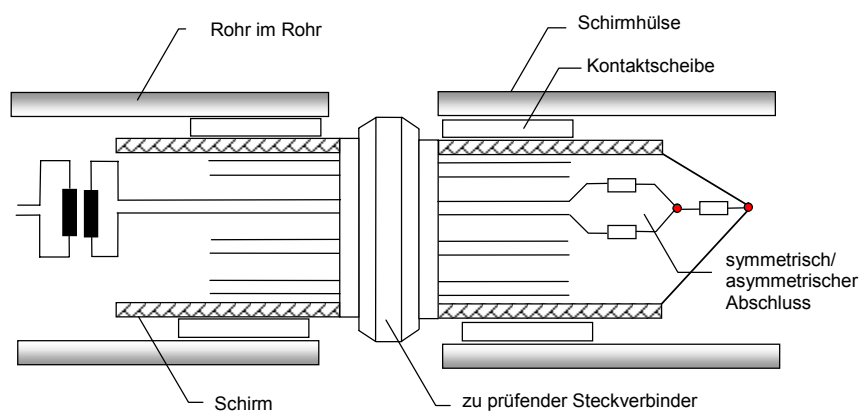


Bild 3c – Kopplungsdämpfung mit Symmetrieübertrager (Balun)

Bild 3 - Kopplungswiderstand, Schirm- und Kopplungsdämpfung symmetrischer Kabel und Komponenten

Der Kopplungswiderstand von symmetrischer Kabeln, Steckern und Komponenten kann sowohl mit Anpassung als auch mit Fehlanpassung (Bilder 1a bis 1c) gemessen werden. Zur Messung der Schirmdämpfung ist Anpassung über einen Lastwiderstand (Bild 3b) oder über einen symmetrisch/asymmetrischen Abschluss (Bild 3c) erforderlich.

5 Kopplungsdämpfung

Zur Messung der Kopplungsdämpfung wird ein differentielles Signal benötigt. Dies kann z.B. über einen Symmetrieübertrager (Balun) erzeugt werden, der den koaxialen Ausgang eines 50-Ohm Netzwerkanalysators in ein differentielles Signal von 100 Ohm des Prüflings wandelt. Handelsübliche Symmetrieübertrager sind allerdings nur bis ca. 1,2 GHz verfügbar.

Mit einem Netzwerkanalysator mit zwei Generatoren (Multiport-NWA) kann durch eine Phasenverschiebung von 180° eines Generators ein symmetrisches Signal erzeugt werden. Damit ist die Messung der Kopplungsdämpfung auch zu höheren Frequenzen hin bis ca. 3 GHz möglich.

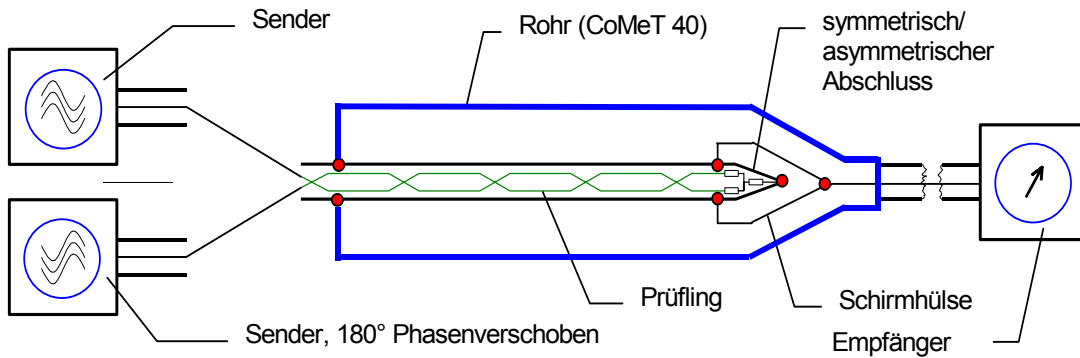


Bild 4 - Messung der Kopplungsdämpfung mit Multiport VNA, Prinzip

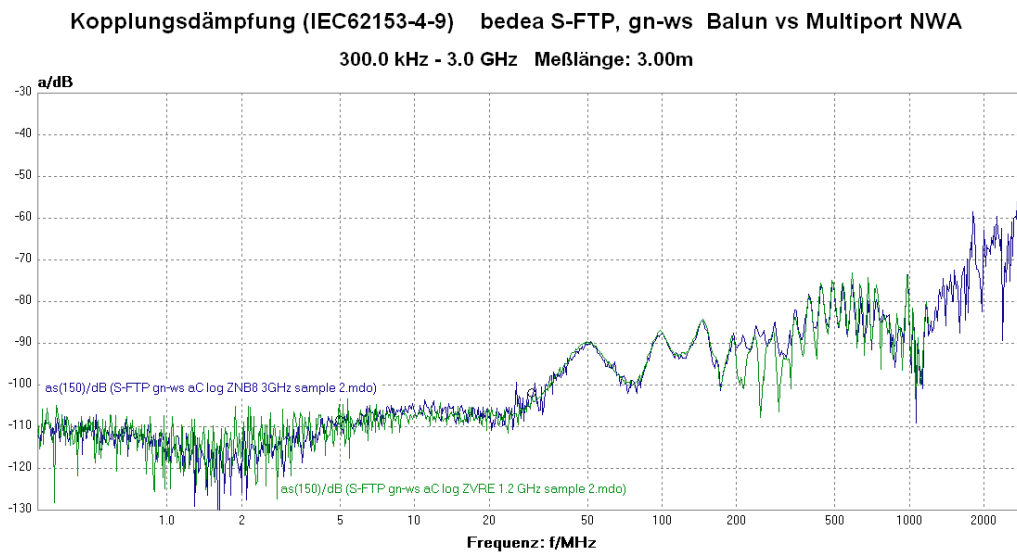


Bild 5 - Messung der Kopplungsdämpfung mit Balun und mit Multiport-NWA

Der Vergleich der Messung mit Balun und mit Multiport-NWA (balunless) zeigt sehr gute Übereinstimmung der Kurven. Die Norm IEC 62153-4-9 soll auf Anwendungen mit Multiport NWAs erweitert werden.

6 Rohr im Rohr, IEC 62153-4-7

Die Norm IEC 62153-4-7, Messverfahren zur Messung des Kopplungswiderstandes und der Schirm- oder der Kopplungsdämpfung an Steckern und konfektionierten Kabeln - Rohr-im-Rohr-Verfahren, befindet sich zurzeit in Überarbeitung, (46/459/CD). Der Autor dieses Artikels ist Projektleiter für diese Aufgabe. Die oben dargestellten Änderungen der IEC 62153-4-3 und der IEC 62153-4-4 werden in die neue Ausgabe übernommen.

Auch bei Steckern und Anschluss-Schnüren gibt es jetzt drei verschiedene Möglichkeiten zur Messung des Kopplungswiderstandes. Die Messung der Schirmdämpfung kann jetzt auch an Steckern und an konfektionierten Kabeln mit Fehlanpassung durchgeführt werden. Zusätzlich besteht hier die Möglichkeit der Messung mit dem "Rohr im Rohr" Verfahren.

7 Triaxiale Zelle, IEC 62153-4-15

Die Verhältnisse des Triaxialverfahrens im Messrohr lassen sich prinzipiell auch auf rechteckige Gehäuse übertragen. Rechteckiges Gehäuse und Rohr können auch in Kombination betrieben werden. Die Schirmwirkung größerer Stecker, Anschluss-Schnüre und HV-Komponenten kann somit in der "Triaxialen Zelle" oder in einer Kombination aus Rohr und Zelle gemessen werden. Das Verfahren mit der Triaxialen Zelle ist in IEC 62153-4-15 beschrieben.

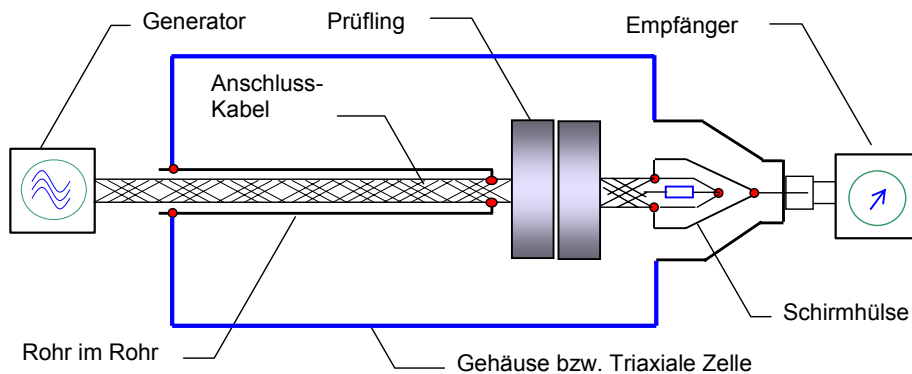


Bild 6 - Triaxiale Zelle nach IEC 62153-4-15 mit Rohr nach IEC 62153-4-7

Auch hier werden die Änderungen der IEC 62153-4-3 und der IEC 62153-4-4 übernommen; d.h. auch hier gibt es jetzt drei verschiedene Möglichkeiten zur Messung des Kopplungswiderstandes. Die Schirmdämpfung kann jetzt auch in der Triaxialen Zelle mit Fehlanpassung gemessen werden.

Zusätzlich besteht auch in der Triaxialen Zelle die Möglichkeit der Messung mit dem "Rohr im Rohr" Verfahren. Die Messung der Kopplungsdämpfung in der Triaxialen Zelle erfolgt in gleicher Weise wie die Messung im Rohr. Mit einem Netzwerkanalysator mit zwei Generatoren (Multiport-NWA) ist auch hier die Messung ohne Symmetrieübertrager (balunless) möglich.

8 Übersicht über die Prüfverfahren mit triaxialer Prüfeinrichtung

Die Normen der Messverfahren zur Messung der Schirmwirkung von metallischen Kommunikationskabeln werden von der Arbeitsgruppe IEC TC 46/WG 5 erstellt.

Tabelle 1 – Prüfverfahren für metallische Kommunikationskabel – Elektromagnetisches Verhalten (EMV) mit triaxialer Prüfeinrichtung

	Prüfverfahren für metallische Kommunikationskabel - Elektromagnetisches Verhalten (EMV)	
IEC/TR 62153-4-1Ed.3	Einführung in elektromagnetische Messungen der Schirmwirkung	46/438/CD
IEC 62153-4-3Ed.2	Kopplungswiderstand - Triaxialverfahren	46/428/CDV
IEC 62153-4-4Ed.2	Geschirmtes Messverfahren zur Messung der Schirmdämpfung "as" bis zu und über 3 GHz	46/439/CDV
IEC 62153-4-7Ed.2	Messverfahren zur Messung des Kopplungswiderstandes und der Schirmdämpfung oder der Kopplungsdämpfung - Rohr-im-Rohr-Verfahren	2006-04-21
IEC 62153-4-9	Kopplungsdämpfung geschirmter symmetrischer Kabel - Triaxialverfahren	2008-03-18
IEC 62153-4-10	Geschirmtes Messverfahren zur Messung der Schirmwirkung von Durchführungen und elektromagnetischen Dichtungen	46/459/CD
IEC 62153-4-15	Prüfverfahren zur Messung von Kopplungswiderstand und der Schirmdämpfung oder der Kopplungsdämpfung mit der Triaxialen Zelle	46/454/CD
IEC 62153-4-16	Technischer Bericht über die Beziehung zwischen Kopplungswiderstandes und der Schirmdämpfung	(in Beratung)
EN 50289-1-6	Elektrische Prüfverfahren; Elektromagnetisches Verhalten	2002-03-22

Bisher sind nur einige Normen der Reihe IEC 62153-4-x als CENELEC Norm übernommen. Die vollständige Übernahme der Reihe IEC 62153-4-x ist zurzeit bei TC 46X in der Diskussion.

9 Literatur

- [1] Bernhard Mund, Thomas Schmid: Schirmwirkung von HV-Leitungen mit der Triaxialen Zelle, 5. Anwenderkongress Steckverbinder 2011, Vogel Verlag, Würzburg
- [2] Bernhard Mund, EMV von Steckverbindern und Verbindungskabeln, 4. Anwenderkongress Steckverbinder 2010, Vogel Verlag, Würzburg,
- [3] Bernhard Mund, Thomas Schmid: Messen der Schirmdämpfung von Steckverbindern, Kabeldurchführungen und EMV-Dichtungen, 3. Anwenderkongress Steckverbinder 2009, Vogel Verlag, Würzburg

weitere Informationen: bmund@bedea.com