

EMV von Kabeln, Steckern und Komponenten mit dem Triaxialverfahren

Bernhard Mund, bedea Berkenhoff & Drebes GmbH, EMV-Messtechnik, Normung

1. Zusammenfassung und Einleitung

Die Reihe IEC 62153-4 beschreibt 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 der Normen der Reihe IEC 62153-4.

Die neuen Normen IEC 62153-4-3, -4-4 und -4-7 ermöglichen jetzt die Messung der Schirmeigenschaften von Kabeln, Steckern und Komponenten ohne Impedanzwandler.

Die Messung der Kopplungsdämpfung von symmetrischen Datenkabeln erfordert die Impedanzanpassung des 50 Ohm des Netzwerkanalysators an 100 Ohm Wellenwiderstand der zu prüfenden Kabel. Dies geschieht üblicherweise mit Symmetrieübertragern (Baluns).

Handelsübliche Symmetrieübertrager sind nur bis zu Frequenzen von ca. 1.200 MHz erhältlich. Der Einsatz von Mehrtor-Netzwerkanalysatoren ermöglicht die Messung der Kopplungsdämpfung von geschirmten symmetrischen Paaren bis zu und über 3 GHz.

Der folgende Bericht gibt eine Übersicht über neue und überarbeitete Normen der Reihe IEC 62153-4 zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirm- oder Kopplungsdämpfung an Kabeln, Steckern und Komponenten mit dem Triaxialverfahren.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Kopplungswiderstand und kapazitive Kopplung

Der Kopplungswiderstand bzw. die Transferimpedanz ist das Maß für die Schirmwirkung geschirmter elektrischer Leitungen und Komponenten bei Frequenzen bis ca. 30 MHz. Durch äußere magnetische Felder wird im Kabelschirm ein Störstrom induziert, welcher an der inneren Oberfläche des Schirms einen Spannungsabfall verursacht. Dieser Spannungsabfall wirkt nun im, vom Kabelschirm geschützten Leitungssystem und beeinflusst die in diesem Leitungssystem übertragenen Signale.

$$Z_T \cdot I = \frac{U_1}{I_2} \quad (1a) \quad Z_T \text{ dB}(\Omega) = +20 \cdot \log_{10} \left(\frac{|Z_T|}{1\Omega} \right) \quad (1b)$$

Je kleiner der Spannungsabfall am Schirm ist, umso besser ist die Schirmwirkung gegen von außen wirkende Störfelder.

Der Kopplungswiderstand Z_T ist definiert als das Verhältnis des Spannungsabfalls U_2 längs des Schirmes auf der gestörten Seite zu dem Störstrom I_1 auf der anderen Seite des Schirmes.

Die Dimension des Kopplungswiderstandes ist Ohm pro Meter bzw. Milliohm pro Meter.

In der aktuellen Normung wird der Kopplungswiderstand zum Teil auch als logarithmisches Verhältnis in Dezibel, bezogen auf 1Ω , angegeben, (1b).

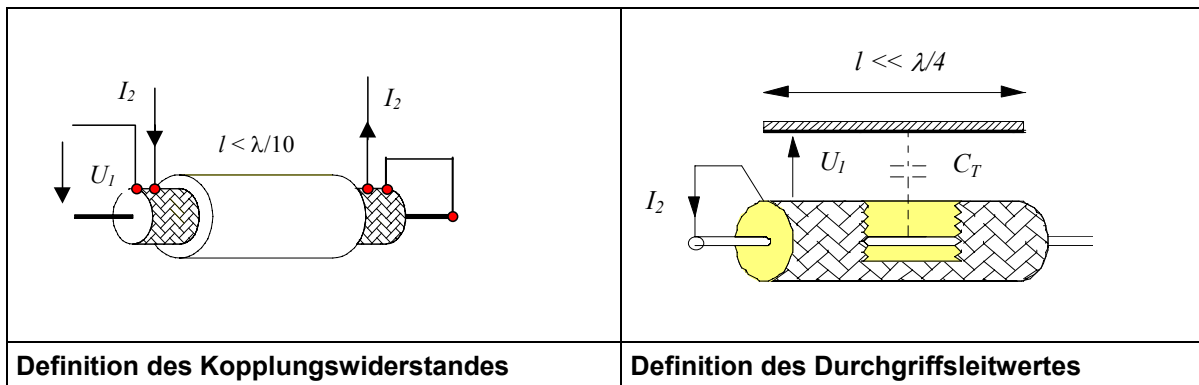


Bild 1 - Definition des Kopplungswiderstandes und des Durchgriffsleitwertes

2.2 Schirmdämpfung, IEC 62153-4-4, Ausgabe 2, (46/439/CDV)

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 .

$$a_S = 10 \cdot \log_{10} |P_1 / P_2| = 20 \cdot \log_{10} |U_1 / U_2| \quad (2)$$

2.3 Kopplungsdämpfung

Bei geschirmten symmetrischen Kabeln verursacht die Unsymmetrie a_U einen Strom im Schirm der durch den Kopplungswiderstand und die kapazitive Kopplungsimpedanz in den äußeren Kreis überkoppelt. Diese Abstrahlung wird durch den Kabelschirm gedämpft und auf die Schirmdämpfung a_S bezogen.

Die gesamte Effektivität des geschirmten symmetrischen Kabels gegen elektromagnetische Beeinflussung ergibt sich damit als Summe aus der Unsymmetriedämpfung a_U des Paares und der Schirmdämpfung a_S des Kabelschirmes. Da beide Werte üblicherweise im logarithmischen Maß angegeben werden, können diese einfach zur Kopplungsdämpfung a_C addiert werden:

$$a_C = a_U + a_S \quad (3)$$

Die Kopplungsdämpfung a_C ergibt sich aus dem logarithmischen Verhältnis der eingespeisten Leistung P_1 und den periodischen Maximalwerten der Leistung $P_{r,\max}$ (die aufgrund der Spannungsspitzen U_2 in den äußeren Kreis abgestrahlt werden kann):

$$a_C = -10 \cdot \log_{10} \left(\text{Env} \left| \frac{P_{r,\max}}{P_1} \right| \right) \quad (4)$$

Zur Speisung des Prüflings ist ein Gegentaktsignal erforderlich. Dies kann über einen Zweitor-Netzwerkanalysator (Sender und Empfänger) und einen Symmetrieübertrager, oder „balunless“ über einen Mehrtor-Netzwerkanalysator (zwei Generatoren mit 180° Phasenverschiebung und ein Empfänger) erfolgen.

3 Triaxialverfahren

3.1 Allgemeines

Das Triaxialverfahren zur Messung des Kopplungswiderstandes bis ca. 100 MHz ist eines der klassischen und lange bekannten und genormten Verfahren zur Ermittlung der Schirmwirkung von Kabeln, (ehem. DIN 47250 Teil 4 bzw. IEC 96-1). Um die Schirmwirkung auch bei höheren Frequenzen bis zu und über 3 GHz messen zu können, wurde Ende der 1980er von Otto Breidenbach, Kabelmetal Nürnberg, die Idee aufgegriffen, das bekannte Kopplungsmessrohr des Triaxialverfahrens zu verlängern und neben dem Kopplungswiderstand auch die Schirmdämpfung mit einem Messaufbau zu messen.

Der prinzipielle Messaufbau des Triaxialverfahrens ist in Bild 3b dargestellt.

Das zu prüfende Kabel wird an einem Ende mit einem Stecker und am anderen Ende mit einem Abschlusswiderstand versehen. Der Prüfling wird in das Rohr eingebaut und am senderseitigen Ende mit dem Rohr kurzgeschlossen. Über den Sender wird Energie in das Kabel bzw. in das innere System eingespeist.

Die aus dem Kabel bzw. dem inneren System durch den Schirm austretende Energie breitet sich im äußeren System aus. Für die, zum sendernahen Ende laufende Welle entsteht am Kurzschluss eine Totalreflexion, so dass am Empfänger die Überlagerung aus hin- und rücklaufender Welle bzw. aus Nah- und Fernnebensprechen gemessen wird. Das logarithmische Verhältnis von eingespeister Leistung P_1 zu gemessener Leistung P_2 ergibt die Schirmdämpfung bzw. nach entsprechender Umrechnung den Kopplungswiderstand.

Inzwischen gibt es zahlreiche genormte Varianten des Triaxialverfahrens für unterschiedliche Anwendungen. Das Triaxialverfahren ist im Bereich Kabel und Stecker das am weitesten verbreitete und eingesetzte Messverfahren. Vorteile sind u.a. die geschlossene Prüfeinrichtung sowie die Möglichkeit Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung mit einem Messaufbau von DC bis zu und über 12 GHz zu messen.

Die Messung des Kopplungswiderstandes ist in IEC 62153-4-3 und in EN 50289-1-6 beschrieben, für die Messung der Schirmdämpfung gilt das Triaxialverfahren nach IEC 62153-4-4 bzw. EN 50289-1-6.

Zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung von Steckern und Komponenten gibt es IEC 62153-4-7, Rohr im Rohr - Verfahren sowie IEC 62153-4-15, Triaxiale Zelle.

Sowohl IEC 62153-4-3 als auch IEC 62153-4-4 befinden sich zurzeit in Überarbeitung (46/471/FDIS und 46/439/CDV). Die Änderungen der beiden Normen sind nachfolgend beschrieben.

3.2 IEC 62153-4-3, Ausgabe 2,

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

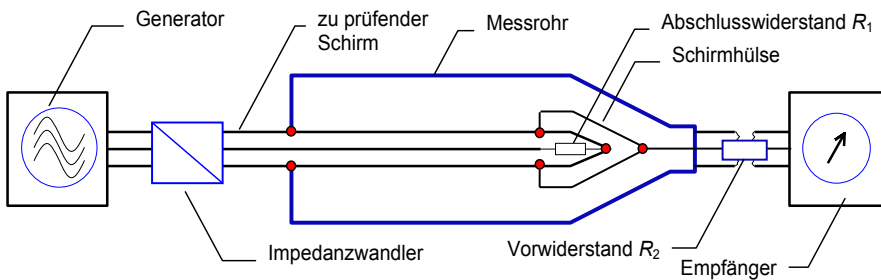


Bild 2a - Prüfverfahren A: Angepasster innerer Kreis mit Dämpfungswiderstand R_2 im Aussenkreis

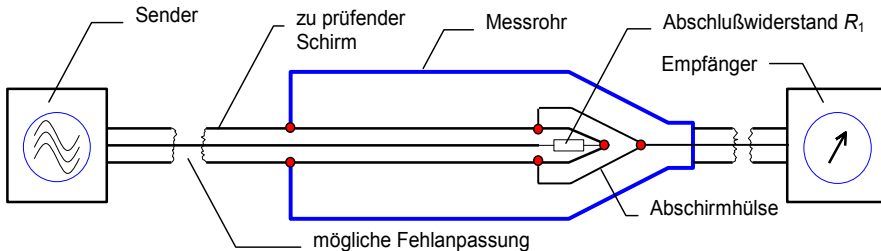


Bild 2b - Prüfverfahren B: Innerer Kreis mit Abschlußwiderstand und äußerer Kreis ohne Dämpfungswiderstand.

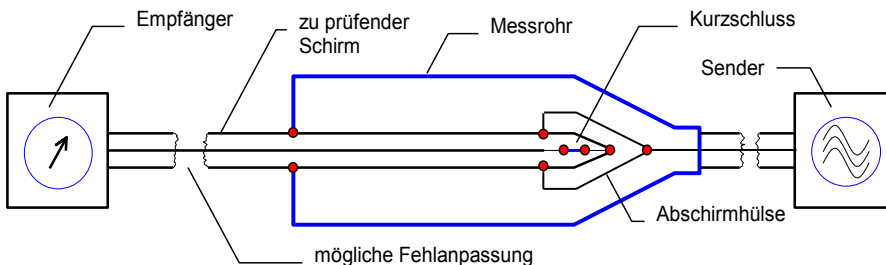


Bild 2c - Prüfverfahren C: (Fehlangepasst)-Kurzschluss- Kurzschluss ohne Dämpfungswiderstand.

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

3.3 Prüfverfahren A: Angepasster innerer Kreis mit 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.

3.4 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, ($R_1 = Z_1$).

3.5 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 2c).

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).

3.6 Messung und Auswertung

Der Streuparameter a_{meas} bzw. die Dämpfung 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.

$$a_{\text{meas}} = 10 \cdot \log_{10} |P_1 / P_2| = -20 \cdot \log_{10} |S_{21}| \quad (5)$$

dabei ist:

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

Die Herleitung der nachfolgenden Gleichungen für die jeweiligen Messverfahren kann z.B. über ein T-Glied erfolgen; sie ist u.a. im Anhang D der IEC 62153-4-3Ed2 beschrieben.

Die Umwandlung der gemessenen Dämpfung a_{meas} bzw. S_{21} der jeweiligen Messverfahren in den Kopplungswiderstand geschieht nach folgenden Gleichungen:

Allgemeine Gleichung

$$Z_T = \frac{\left(R_1 + Z_0 \frac{Z_s}{Z_p} \right) (R_2 + Z_0)}{2Z_0 \sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}}} \frac{1}{L_c} \cdot 10^{\left(\frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}} - a_{\text{pad}}}{20} \right)} \quad (6)$$

Verfahren A:

$$Z_T = \frac{R_1(Z_0 + R_2)}{Z_0 \cdot L_c} \cdot 10^{\left\{ \frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}} - (a_{\text{pad}} + 10 \log_{10}(Z_0/Z_1))}{20} \right\}} \quad (7)$$

Verfahren B:

$$Z_T = \frac{R_1 + Z_0}{2L_c} \cdot 10^{\left\{ \frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}}}{20} \right\}} \quad (8)$$

Verfahren C:

$$Z_T = \frac{Z_0}{2L_c} \cdot 10^{\left\{ \frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}}}{20} \right\}} \quad (9)$$

dabei ist:

Z_0	der Systemwellenwiderstand (üblicherweise 50 Ω),
Z_1	der Wellenwiderstand des inneren Kreises bzw. des Prüflings,
Z_T	der Kopplungswiderstand,
Z_p	Wellenwiderstand auf der Primärseite des Impedanzwandlers
Z_s	Wellenwiderstand auf der Sekundärseite des Impedanzwandlers
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,
R_2	Dämpfungswiderstand (Serienwiderstand) im äußeren Kreis.

4 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 .

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

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.

Nach Ausgabe 1 der IEC 62153-4-4 wurde die Schirmdämpfung bei angepassten Verhältnissen, (siehe Bild 5a) gemessen, (Abschluss des Prüflings mit seinem Wellenwiderstand, ($R_1 = Z_1$), und Anpassung des Prüflings an den Wellenwiderstand des Generators 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 2b.

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:

$$a_s = 10 \log_{10} \left| \frac{P_1}{P_{r,\max}} \right| = 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{P_1}{P_{2,\max}} \cdot \frac{2 \cdot Z_s}{Z_1} \right| \quad (11)$$

$$= Env \left\{ -20 \cdot \log_{10} |S_{21}| + 10 \cdot \log_{10} |1 - r^2| + 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{300 \Omega}{Z_1} \right| \right\} \quad (12)$$

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 $= \left| \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1} \right|$ (13)

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. $2,5 \text{ dB}$.

5 Kopplungsdämpfung

Die Messung der Kopplungsdämpfung von symmetrischen Leitungen erfolgt entweder mit Absorberzangen nach IEC 62153-4-5 oder einem triaxialen Messaufbau nach IEC 62153-4-9.

Die Messung mit Absorberzangen hat einige Nachteile gegenüber der Messung mit dem triaxialen Aufbau; die Messung sollte in geschirmten Räumen erfolgen um Umgebungseinflüsse auszuschließen. Dagegen sind beim triaxialen Aufbau Umgebungseinflüsse durch den Aufbau selbst ausgeschlossen.

Es existieren Zangen für den Frequenzbereich von 30 MHz bis 1000 MHz und 500 MHz bis $2,4 \text{ GHz}$. D.h. für die Messung bis 2 GHz sind zwei Messaufbauten erforderlich und oberhalb von $2,4 \text{ GHz}$ sind Messungen mit Zangen nicht möglich. Daher wird vorzugsweise der triaxiale Aufbau nach IEC 62153-4-9 verwendet.

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. $1,2 \text{ GHz}$ verfügbar.

Alternativ zu einem Symmetrieübertrager kann ein symmetrisches Signal auch mit einem Netzwerkanalysator mit zwei Generatoren, die um 180° phasenverschoben sind, erzeugt werden. Damit kann die Kopplungsdämpfung bis zu und über 3 GHz gemessen werden. Allerdings sind solche Geräte kaum verfügbar. Eine weitere häufig angewendete Alternative ist die Messung mit einem Mehrtor-VNA und der Anwendung der entsprechenden Mischmoden S-Parameter.

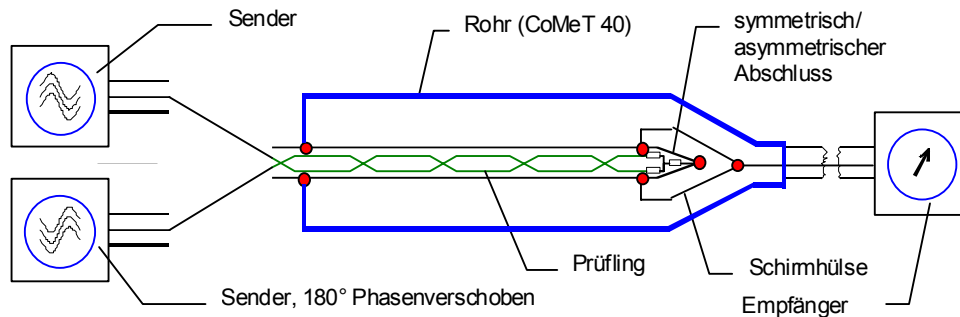


Bild 3 - Messung der Kopplungsdämpfung mit Mehrtor-NWA, Prinzip

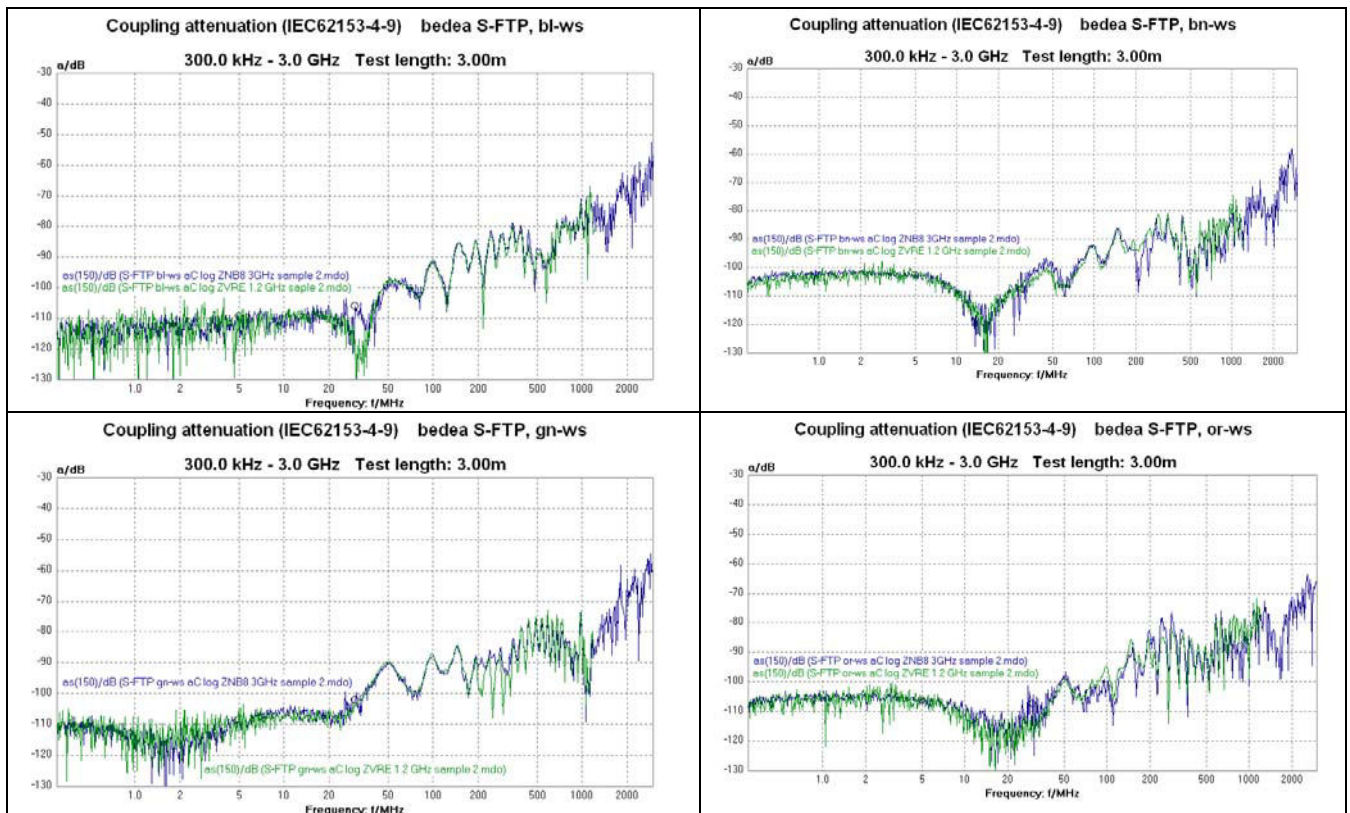


Bild 4 - Messung der Kopplungsdämpfung mit Balun und mit Multiport-NWA

Der Vergleich der Messung mit Balun und mit Mehrtor-NWA (balunless) zeigt sehr gute Übereinstimmung der Kurven. Die Norm IEC 62153-4-9 befindet sich bei IEC TC46/WG5 in Überarbeitung zur Erweiterung auf Anwendungen mit Mehrtor-NWAs.

Wie oben beschrieben, bietet das Triaxialverfahren zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten zur Messung der EMV von Kabeln, Steckern und Komponenten von DC bis zu und über 12 GHz mit einem Messaufbau bei laufender Aktualisierung der jeweiligen Normen.