

# Messen der Kopplungsdämpfung mit vektoriellem Mehrtor-Netzwerkanalysator VNA, (balunless)

## 1 Zusammenfassung und Einleitung

Mit der Einführung von 40 Gbps digitaler Datenübertragung für Anwendungen in Datenzentren hat der Bereich, in dem symmetrische Datenkabel z.B. für strukturierte Verkabelung betrieben werden, inzwischen die 2 GHz Marke erreicht. Die Normentwürfe IEC 46C/976/NP und 46C/977/NP, Kabel für Etagenverkabelung bzw. Geräteanschlusskabel mit Übertragungseigenschaften bis 2 GHz, beschreiben Datenkabel bis 1,6 bzw. bis 2 GHz. Auch der Normentwurf ISO/IEC JTC1/SC25 N 2121 2nd PDTR beschreibt Anforderungen an die Systemverkabelung (Kanal) bis 1,6 bzw. 2 GHz.

Die Schirmwirkung solcher Kabel wird unter anderem durch die Kopplungsdämpfung als Summe aus Schirmdämpfung und Unsymmetriedämpfung beschrieben.

Zur Messung der Kopplungsdämpfung sowie zur Messung weiterer Übertragungseigenschaften wie Unsymmetriedämpfung, Nebensprechdämpfung usw. wird ein differentielles Signal benötigt. Dies kann z.B. über einen Symmetrieübertrager (50/100-Ohm) erzeugt werden. Handelsübliche Symmetrieübertrager sind allerdings nur bis ca. 1,2 GHz verfügbar.

Alternativ kann ein symmetrisches Signal auch mit einem Netzwerkanalysator mit zwei Generatoren erzeugt werden, wobei die Phase eines Generators um 180° phasenverschoben ist. Eine weitere Alternative ist die Messung mit einem Mehrtor-VNA.

Im folgenden Bericht ist die Messung der Kopplungsdämpfung mit einem Mehrtor-VNA sowie die entsprechenden 4-Tor-Mischmoden S-Parameter beschrieben. Damit kann die Kopplungsdämpfung bis zu und über 3 GHz gemessen werden.

## 2 Wirkung gegen elektromagnetische Einflüsse

### 2.1 Allgemeines

Um eine Leitung gegen äußere elektromagnetische Beeinflussungen zu schützen, bzw. um Abstrahlung in die Umgebung zu vermeiden, wird diese mit Schirmen aus Metallfolien und/oder Geflechten umgeben. Für besonders stör anfällige Umgebungen verwendet man auch aufwendigere Schirmkonstruktionen aus mehreren Lagen oder mit magnetischen Werkstoffen. Zusätzlich zum Schirm trägt auch die Symmetrie der Konstruktion zur gesamten Schirmwirkung bei.

Die alleinige Wirkung des Schirmes wird durch den Kopplungswiderstand und die Schirmdämpfung beschrieben. Der Einfluss der Symmetrie wird durch die Unsymmetriedämpfung erfasst. Die Gesamtwirkung von Schirm und Symmetrie (symmetrischer Prüflinge) wird durch die Kopplungsdämpfung beschrieben.

### 2.2 Kopplungswiderstand

Der Kopplungswiderstand  $Z_T$  ist definiert als das Verhältnis des Spannungsabfalls  $U_1$  längs des Schirmes auf der gestörten Seite zu dem Störstrom  $I_2$  auf der anderen Seite des Schirmes. Die Dimension des Kopplungswiderstandes ist Milliohm pro Meter.

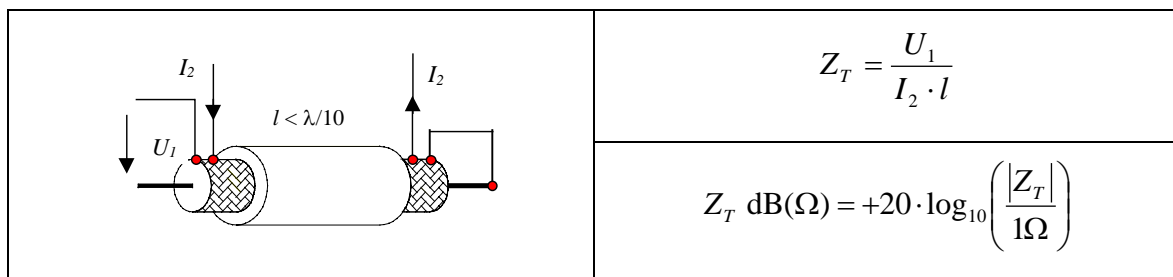


Bild 1: Definition des Kopplungswiderstandes

### 2.3 Schirmdämpfung

Die Schirmdämpfung ist ein Maß für die Güte des Schirms. Sie ist das logarithmische Verhältnis von eingespeister Leistung  $P_1$  zu abgestrahlter Leistung  $P_2$ .

$$a_s = 10 \cdot \log(P_1 / P_2) \quad \text{dB}$$

Einzelheiten sind in IEC 62153-4-4 beschrieben.

### 2.4 Unsymmetriedämpfung

Geschirmte symmetrische Paare können auf verschiedene Arten betrieben werden. Im symmetrischen Betrieb (Gegentaktbetrieb, differential mode) fließt dabei durch den einen Leiter der Strom  $+I$  und durch den anderen der Strom  $-I$ ; durch den Schirm fließt hierbei kein Strom. Im unsymmetrischen Betrieb (Gleichtaktbetrieb, common mode) fließt durch beide Leiter jeweils der halbe Strom  $+I/2$ ; durch den Schirm fließt der rücklaufende Strom  $-I$ , ähnlich wie bei einem Koaxialkabel [1].

Bei einem idealen Kabel sind beide Betriebsarten voneinander unabhängig, bei realen Kabeln finden jedoch Wechselwirkungen zwischen den beiden Betriebsarten statt.

Die Unsymmetriedämpfung  $a_u$  eines Kabels beschreibt im logarithmischen Maß, wie viel Leistung vom Gegentaktsystem in das Gleichtaktsystem (oder umgekehrt) überkoppelt. Sie ist das logarithmische Verhältnis von eingespeister Leistung im Gegentaktbetrieb  $P_d$  zu der in den Gleichtaktbetrieb übergekoppelten Leistung  $P_c$ .

$$a_u = 10 \cdot \log(P_d / P_c)$$

Unterschiedliche Leiterwiderstände, Isolationsdurchmesser, Aderkapazitäten, ungleichmäßige Verseilung und wechselnde Abstände der Innenleiter zum Schirm sind Ursachen für die Unsymmetrie.

Für tiefe Frequenzen nimmt die Unsymmetriedämpfung mit der Länge ab. Mit steigender Frequenz und/oder Länge nähert sich die Unsymmetriedämpfung - ähnlich wie die Schirmdämpfung - asymptotisch einem Grenzwert an, der je nach Kabeltyp und Verteilung der Kopplungen 20 dB bis 40 dB beträgt. Die Unsymmetrie lässt sich sowohl für das sendernahe als auch für das senderferne Ende eines Kabels ermitteln [4].

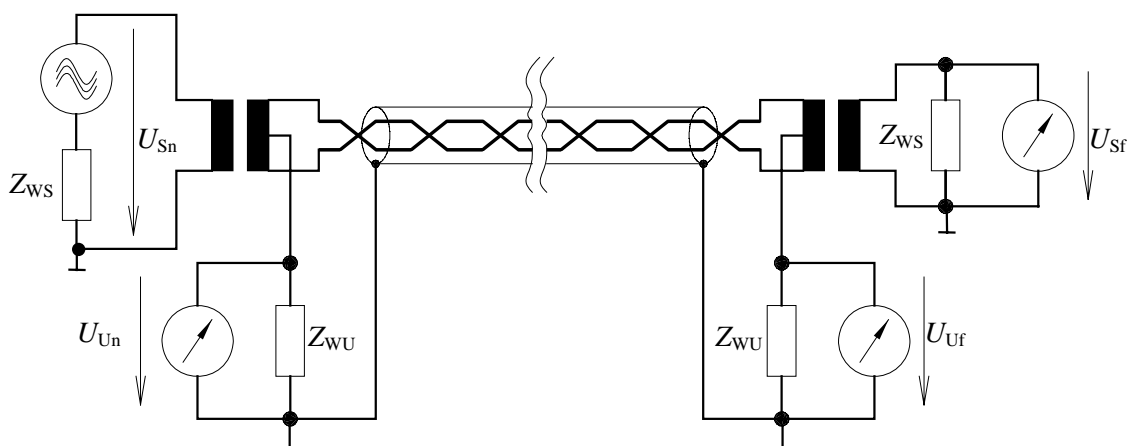


Bild 2 - Nah- und Fernunsymmetrie mit Symmetrieübertragern

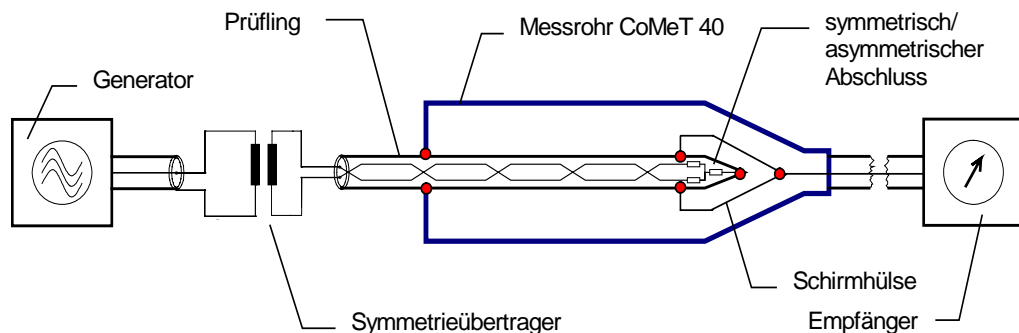
### 2.5 Kopplungsdämpfung

Die Kopplungsdämpfung beschreibt die gesamte Effektivität gegen elektromagnetische Beeinflussung (EMB) und berücksichtigt beides die Schirmwirkung des Schirms und die Symmetrie des Paares.

Bei ungeschirmten Paaren (UTP) wirkt nur die Symmetrie, die Kopplungsdämpfung entspricht der Unsymmetriedämpfung.

Bei geschirmten symmetrischen Paaren (STP) hingegen wirken der Schirm und die Symmetrie. Die Kopplungsdämpfung ergibt sich damit in erster Näherung als Summe aus Unsymmetriedämpfung  $a_u$  des Paares und Schirmdämpfung  $a_s$  des Kabelschirmes. Da beide Werte üblicherweise im logarithmischen Maß angegeben werden, können diese in erster Näherung einfach zur Kopplungsdämpfung  $a_c$  addiert werden.

$$a_c = a_u + a_s \text{ dB}$$



**Bild 3 – Messen der Kopplungsdämpfung mit Symmetrieübertrager**

### 3 Gegentaktanregung

Zur Messung der Unsymmetrie- und der Kopplungsdämpfung wird ein differentielles Signal (Gegentaktbetrieb) benötigt.

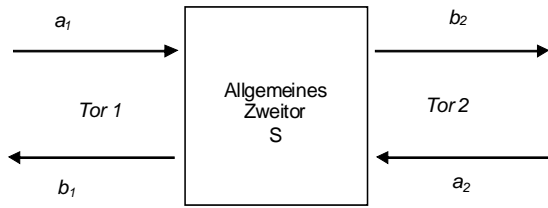
Dies kann z.B. über einen Symmetrieübertrager erzeugt werden, der das unsymmetrische Signal eines 50-Ohm Netzwerkanalysators in ein symmetrisches Signal wandelt. Handelsübliche Symmetrieübertrager sind bis ca. 1,2 GHz verfügbar.

Alternativ zu einem Symmetrieübertrager kann ein symmetrisches Signal auch mit einem Netzwerkanalysator mit zwei Generatoren, deren Signale um 180° phasenverschoben sind, erzeugt 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. Es werden mindestens 4 Tore benötigt. Für die vollständige Beschreibung eines 4 paarigen Datenkabels werden 16 Tore benötigt wenn man das Umklemmen der Paare während der Messung vermeiden will. Damit kann die Kopplungsdämpfung bis zu und über 3 GHz gemessen werden

### 4 Mischmoden S-Parameter (virtueller Symmetrieübertrager)

Das Übertragungsverhalten von Vierpolen bzw. Zweitoren wie z.B. Koaxialkabel kann durch deren Streuparameter (S-Parameter) beschrieben werden. In Matrixschreibweise ergibt sich:

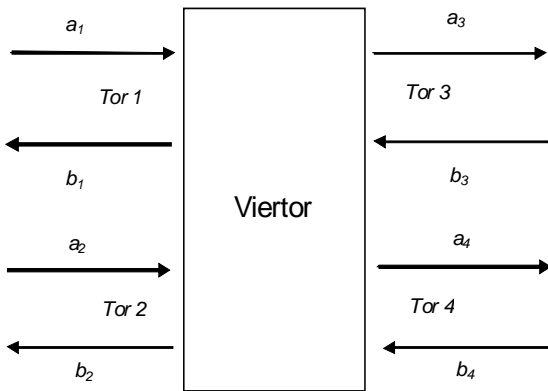


$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = (S) \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

**Bild 4 - Allgemeines Zweitor**

Wobei a, b die in das Tor einströmenden bzw. ausströmenden normierten Leistungswellen sind

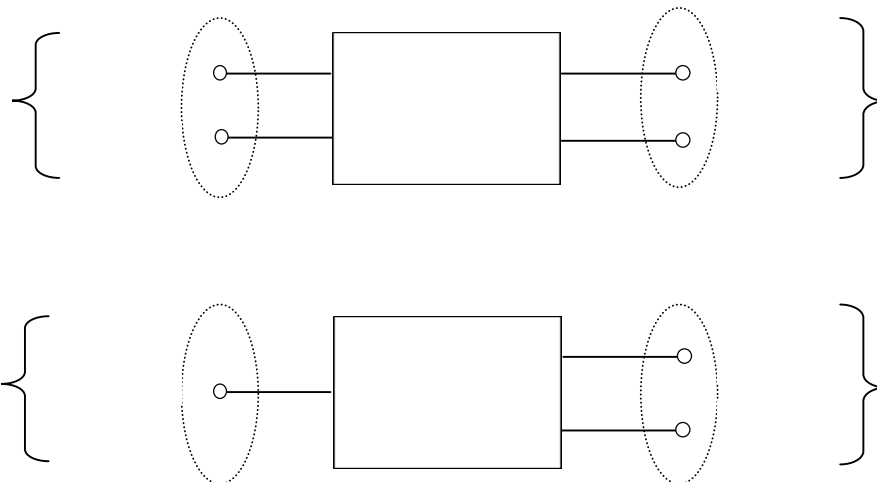
Die Definition der Streumatrix ist problemlos auf beliebige N-Tore erweiterbar. Für ein Viertor ergibt sich:



$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} = (S^{std}) \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{43} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix}$$

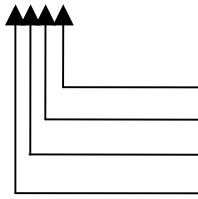
**Bild 5 - Viertor Netzwerk**

Für die Messung symmetrischer Zweitore werden bei einem Mehrtor-VNA die physikalischen Tore des Netzwerkanalysators zu logischen Toren zusammengefasst (Bild 6).



**Bild 6 - Physikalische und logische VNA-Tore**

Dabei wird folgende Nomenklatur verwendet:



Modus	s Single ended (unsymmetrisch, koaxial)
	d Differential mode (Gegentaktbetrieb)
	c Common mode (Gleichtaktbetrieb)

$$S_{xyAB} = \frac{\text{Eingangssignal am VNA - Tor A im Modus x}}{\text{Ausgangssignal am VNA - Tor B im Modus y}}$$

die Umrechnung von den unsymmetrischen Viertor Streuparametern  $S^{std}$  zu den Mischmoden Streuparametern  $S^{mm}$  für ein symmetrisches Zweitor erfolgt über:

$$S^{mm} = M \cdot S^{std} \cdot M^{-1} \quad M = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad S^{mm} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{dd11} & S_{dd12} \\ S_{dd21} & S_{dd22} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} S_{dc11} & S_{dc12} \\ S_{dc21} & S_{dc22} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} S_{cd11} & S_{cd12} \\ S_{cd21} & S_{cd22} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} S_{cc11} & S_{cc12} \\ S_{cc21} & S_{cc22} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Für die Messung eines Zweitores mit einem unsymmetrischen Tor (single ended) und einem symmetrischen Tor ergeben sich folgende Messkonfigurationen:

			Anregung		
			Single ended	Differential mode	Common mode
			Logisches Tor 1	Logisches Tor 2	Logisches Tor 2
Antwort	Single ended	Logisches Tor 1	$S_{ss11}$	$S_{sd12}$	$S_{sc12}$
	Differential mode	Logisches Tor 2	$S_{ds21}$	$S_{dd22}$	$S_{dc22}$
	Common mode	Logisches Tor 2	$S_{cs21}$	$S_{cd22}$	$S_{cc22}$

Die Messung der Kopplungsdämpfung entspricht einer Anregung im Gegentakt (differential mode) und Antwort im unsymmetrischen (koaxialen) Modus (single ended), d.h. einer Messung des S-Parameters  $S_{sd12}$ . Die Messung der Schirmdämpfung entspricht einer Anregung im Gleichtakt (common mode) und Antwort im unsymmetrischen (koaxialen) Modus (single ended), d.h. einer Messung des S Parameters  $S_{sc12}$ .

Für die Messung eines Zweitores mit zwei symmetrischen Toren ergeben sich folgende Messkonfigurationen:

			Anregung			
			Differential mode		Common mode	
			Logisches Tor 1	Logisches Tor 2	Logisches Tor 1	Logisches Tor 2
Antwort	Differential mode	Logisches Tor 1	$S_{dd11}$	$S_{dd12}$	$S_{dc11}$	$S_{dc12}$
		Logisches Tor 2	$S_{dd21}$	$S_{dd22}$	$S_{dc21}$	$S_{dc22}$
	Common mode	Logisches Tor 1	$S_{cd11}$	$S_{cd12}$	$S_{cc11}$	$S_{cc12}$
		Logisches Tor 2	$S_{cd21}$	$S_{cd22}$	$S_{cc21}$	$S_{cc22}$

Die Messung der Leitungsdämpfung eines symmetrischen Paares entspricht einer Anregung und Antwort im Gegentaktbetrieb (differential mode), d.h. einer Messung des S-Parameters  $S_{dd21}$ . Die Messung der Unsymmetriedämpfung mit Anregung im Gegentaktbetrieb und Antwort im Gleichtaktbetrieb entspricht für die Messung am nahen Ende dem S Parameters  $S_{cd11}$  bzw.  $S_{cd21}$  bei Messung am fernen Ende.

### 5 Messung der Kopplungsdämpfung mit Mehrtor VNA

Die Messung der Kopplungsdämpfung von symmetrischen Leitungen erfolgt entweder mit Absorberzangen oder einem triaxialen Messaufbau nach folgenden Normen:

IEC 62153-4-5, Kopplungsdämpfung oder Schirmdämpfung, – Verfahren mit Absorberzangen

IEC 62153-4-9, Kopplungsdämpfung geschirmter symmetrischer Paare, Triaxialverfahren

Die Messung mit Absorberzangen hat einige Nachteile gegenüber der Messung mit dem triaxialen Aufbau:

Mit Absorberzangen sollte die Messung 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 GHz. D.h. für die Messung bis 2 GHz sind zwei Messaufbauten erforderlich und oberhalb von 2.4 GHz sind Messungen mit Zangen nicht möglich. Daher wird vorzugsweise der triaxiale Aufbau nach IEC 62153-4-9 verwendet, (Bild 7).

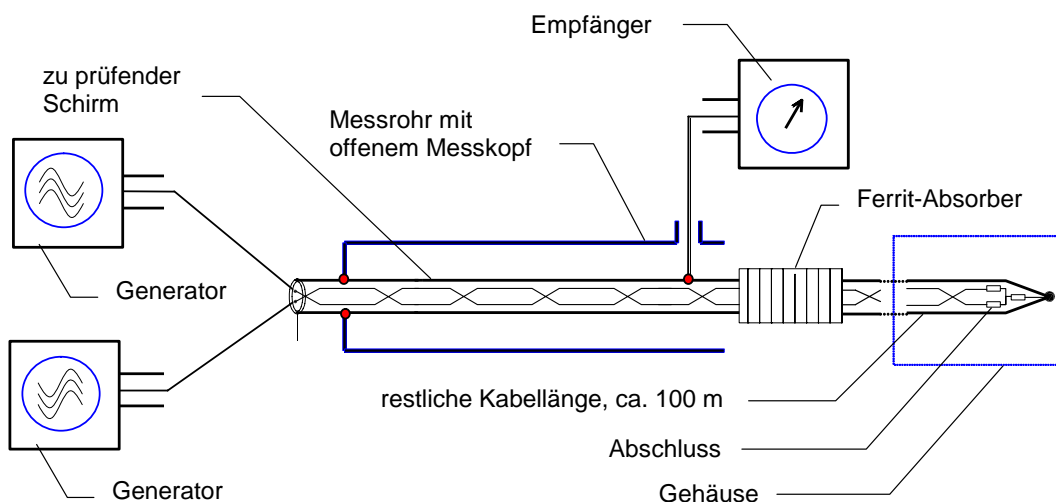
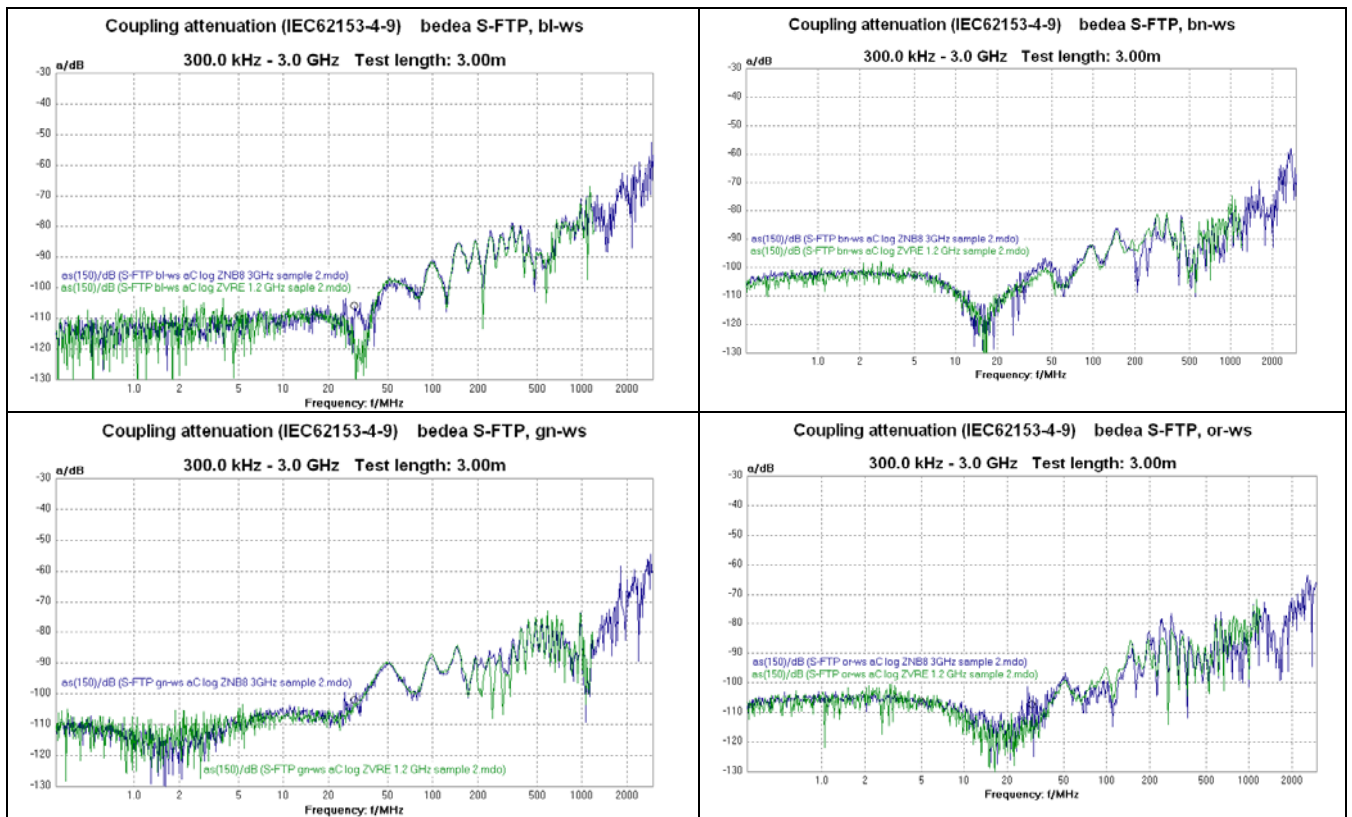


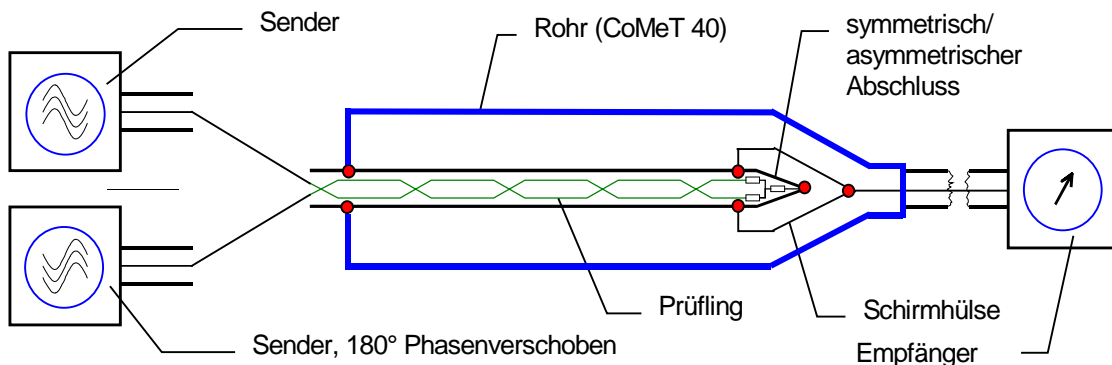
Bild 7 – Messen der Kopplungsdämpfung nach IEC 62153-4-9 mit offenem Messkopf

Die Rohrlänge beträgt hierbei mindestens 2 m (um den Anteil der Schirmdämpfung korrekt zu erfassen) und die Länge des Prüflings ist 100m (um den Anteil der Unsymmetriedämpfung korrekt zu erfassen). Dazu wird das Messrohr mit einem offenen Messkopf betrieben.



**Bild 8 - Vergleich der Messungen mit Symmetrieübertrager (Balun) und mit Mehrtor-VNA, Messlänge 3m**

Bei den Vergleichsmessungen wurde der Einfachheit halber die Länge des Prüflings auf 3m beschränkt und das Messrohr mit einem geschlossenen Messkopf betrieben, (Bild 9).



**Bild 9 – Messung der Kopplungsdämpfung mit Mehrtor**

Die Vergleichsmessungen zwischen Einspeisung über einen Symmetrieübertrager und Verwendung eines Mehrtor-VNA zusammen mit Mischmoden S Parametern zeigen eine sehr gute Übereinstimmung und bestätigen, dass die Kopplungsdämpfung mit einem Mehrtor-VNA bis mindestens 3 GHz gemessen werden kann.

Die oben dargestellten Messungen mit einem Mixed-mode VNA lassen sich sinngemäß auch für symmetrische Kabel und Komponenten mit dem "Rohr im Rohr"-Verfahren nach IEC 62153-4-7 sowie in der Triaxialen Zelle nach IEC 62153-4-15 anwenden.

#### **Literatur:**

- [1] Thomas Hähner, Bernhard Mund – EMV-Verhalten symmetrischer Kabel – EMC Journal 4/1997.
- [2] Otto Breitenbach, Thomas Hähner und Bernhard Mund: Kabelschirmung im Frequenzbereich von MHz bis GHz, erweiterte Anwendung eines einfachen Meßverfahrens, Frequenz 1-2/1999 S. 18-28.
- [3] Bernhard Mund - Messen der Schirmwirkung - EMC Kompendium 1997.
- [4] Thomas Hähner, Bernhard Mund – Test methods for screening and balance of communication cables – EMC Zürich 1999
- [5] Bernhard Mund, Thomas Schmid: Measuring EMC of HV cables and components with triaxial cell, Wire & Cable Technology international 01/03-2012