

Messung der Kopplungsdämpfung an geschirmten symmetrischen Kabeln bis 2 GHz mit virtuellem Balun

Anwenderforum Elektrische Kabel, Technische Akademie Esslingen [TAE], 21. Oktober 2014

Ahmad Hamadeh, bedea Berkenhoff & Drebes GmbH,
Herborner Straße 100, 35614 Aßlar, hamadeh.ah@googlemail.com

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

Dr. Christian Pfeiler, Draka Comteq Germany GmbH & Co. KG
Wohlauer Straße 15, 90475 Nürnberg, christian.pfeiler@prysmiangroup.com

1 Einleitung

Mit der geplanten Einführung von 40 Gbps digitaler Datenübertragung für Anwendungen in Rechenzentren erweitert sich der Bereich, in dem symmetrische Datenkabel für strukturierte Verkabelung betrieben werden, beträchtlich. Die Normentwürfe zu IEC 61156-9 [1] und IEC 61156-10 [2], Kabel für Etagenverkabelung bzw. Geräteanschlusskabel mit Übertragungseigenschaften bis 2 GHz, beschreiben Datenkabel bis 1,6 bzw. bis 2 GHz. Diese stehen in Bezug zu ISO/IEC TR 11801-99-1 [3], der Anforderungen an die Systemverkabelung (Kanal) bis 1,6 bzw. 2 GHz festlegt.

Die Schirmwirkung dieser Kabel wird unter anderem durch die Kopplungsdämpfung als Überlagerung von Schirmdämpfung und Unsymmetriedämpfung beschrieben. Als Messverfahren für die Kopplungsdämpfung gilt u.a. die Norm IEC 62153-4-9, Kopplungsdämpfung mit dem Triaxialverfahren [4]. Zur Messung der Kopplungsdämpfung sowie zur Messung weiterer Übertragungseigenschaften wie Reflexions- oder Unsymmetriedämpfung wird ein differentielles Signal benötigt. Dies kann z. B. mit einem Symmetrieübertrager (Balun) erzeugt werden. Handelsübliche Symmetrieübertrager sind allerdings nur bis ca. 1,2 GHz verfügbar.

Alternativ kann ein symmetrisches Signal auch mit einem vektoriellen Netzwerkanalysator (VNA) mit zwei Generatoren erzeugt werden, wobei ein Generator um 180° phasenverschoben arbeitet. Eine weitere Alternative ist die Messung mit einem Mehrtor-VNA, (virtueller Balun). Dabei werden aus den pro Leiter gegen die Bezugsmasse gemessenen Größen die Eigenschaften der symmetrischen Paare mathematisch ermittelt. Der abdeckbare Frequenzbereich für die Bestimmung der Reflexions- und Transmissionseigenschaften symmetrischer Paare ist nicht mehr vom Symmetrieübertrager sondern allein durch den VNA und die Anschlusstechnik beschränkt.

Die Anwendbarkeit dieser Art der Signalerzeugung mit einem Mehrtor-VNA auf die Messung der Kopplungsdämpfung nach IEC 62153-4-9 [4] wird im folgenden Bericht untersucht. Ziel ist die Messung der Kopplungsdämpfung bis zu mindestens 2 GHz. Die Erweiterung der Norm IEC 62153-4-9 zu diesen Frequenzen wird insbesondere im Hinblick auf die Frage der erforderlichen Messlänge und des zu verwendenden Messkopfes (offener Messkopf oder Standard-Messkopf) diskutiert. Dazu werden auch Messergebnisse nach dem Triaxialverfahren nach IEC 62153-4-9 und des Zangenverfahrens nach IEC 62153-4-5 [5] verglichen.

2 Schirmungs-Parameter

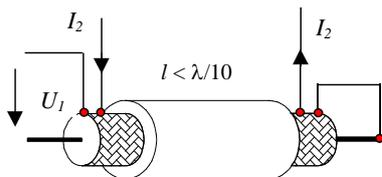
2.1 Allgemeines

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 störanfällige Umgebungen verwendet man auch aufwendigere Schirmkonstruktionen aus mehreren Lagen oder mit magnetischen Werkstoffen. Im Fall, dass zur Signalübertragung Leiterpaare verwendet werden, trägt auch deren Symmetrie zusätzlich zum Schirm zur gesamten Schirmwirkung der Konstruktion 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 (im Fall 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_1 auf der anderen Seite des Schirmes. Die Dimension des Kopplungswiderstandes ist Milliohm pro Meter. Er ist nach der Definition messbar an elektrisch kurzen Prüflingen.



$$Z_T = \frac{U_1}{I_2 \cdot l} \quad (1)$$

Bild 1: Definition des Kopplungswiderstandes

2.3 Schirmdämpfung

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

$$a_s = 10 \cdot \log(P_1 / P_2) \text{ dB} \quad (2)$$

Einzelheiten zur Messung der Schirmdämpfung sind in IEC 62153-4-4 [6] 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 [7, 12].

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 Gegentaktsystem P_d zu der in den Gleichtaktbetrieb übergekoppelten Leistung P_c .

$$a_u = 10 \cdot \log(P_d / P_c) \quad (3)$$

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. Die Unsymmetrie lässt sich sowohl für das sendernahe als auch für das senderferne Ende eines Kabels ermitteln [7, 12].

2.5 Kopplungsdämpfung

Die Kopplungsdämpfung beschreibt die gesamte Effektivität gegen elektromagnetische Beeinflussung (EMB) und berücksichtigt sowohl die Wirkung des Schirms als auch die

Symmetrie des Paares. Eine Messung ist auch an ungeschirmten Paaren (U/UTP) möglich. Dabei wirkt naturgemäß nur die Symmetrie. Sinngemäß gilt Gleichung (3) auch für die Definition der Kopplungsdämpfung.

3 Mischmoden S-Parameter (virtueller Symmetrieübertrager)

Zur Messung der Unsymmetrie- und der Kopplungsdämpfung wird ein differentielles Signal (Gegentaktbetrieb) benötigt. Dies kann z. B. mittels eines Symmetrieübertragers (Balun) erzeugt werden, der das unsymmetrische Signal eines Netzwerkanalysators in ein symmetrisches Signal wandelt. Handelsübliche Symmetrieübertrager sind bis ca. 1,2 GHz verfügbar.

Alternativ kann ein symmetrisches Signal auch mit einem Netzwerkanalysator mit zwei Generatoren, die um 180° phasenverschoben sind, erzeugt werden. Allerdings sind solche Geräte selten verfügbar.

Eine weitere häufig angewendete Alternative ist die Messung mit einem Mehrtor-VNA und der Anwendung der entsprechenden Mischmoden S-Parameter [8]. Für Messungen an einem Paar werden mindestens vier Tore benötigt. Für die vollständige Beschreibung eines vierpaarigen Datenkabels werden demnach 16 Tore benötigt, wenn das Umklemmen der Paare vermieden werden soll.

3.1 Definition der Mischmoden-Streuparameter

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

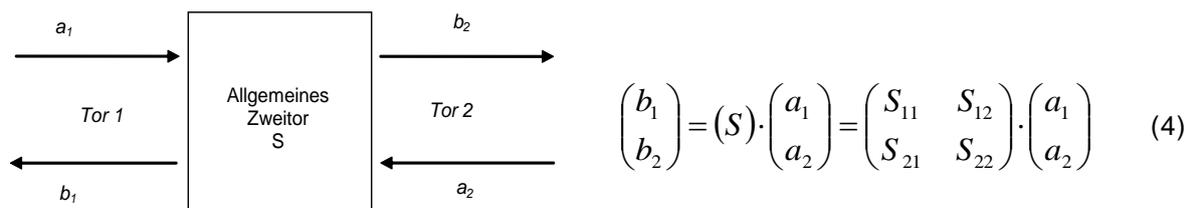


Bild 2: Allgemeines Zweitor

Dabei sind a und b die in das Tor einströmenden bzw. ausströmenden normierten Leistungswellen. Die Definition der Streumatrix ist problemlos auf beliebige N-Tore erweiterbar. Für ein Viertor ergibt sich:

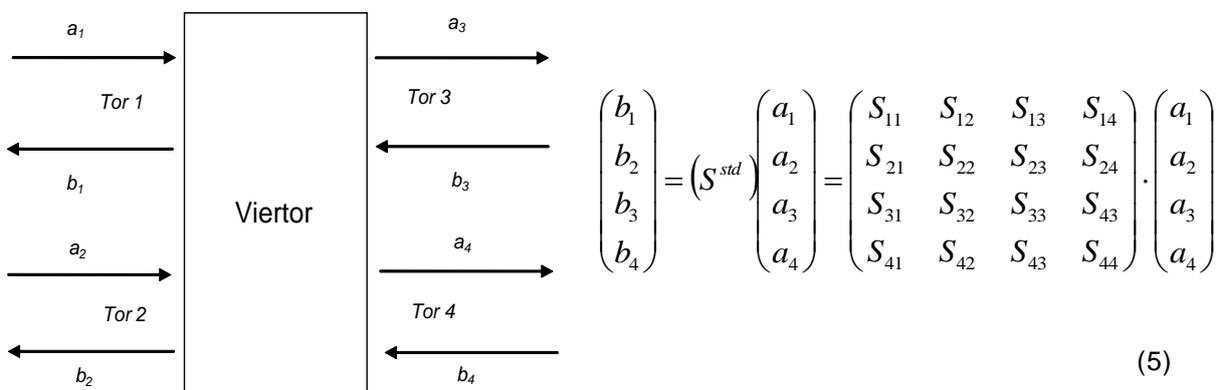


Bild 3: Viertor Netzwerk

Für die Messung symmetrischer Zweitore werden bei einem Mehrtor-VNA die physikalischen Tore des Netzwerkanalysators zu logischen Toren zusammengefasst (Bild 4).

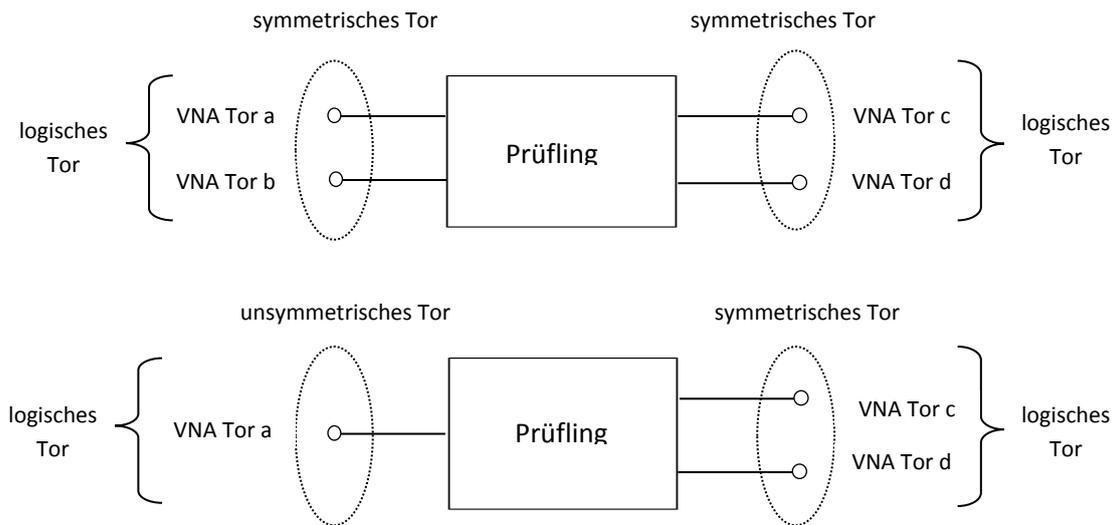
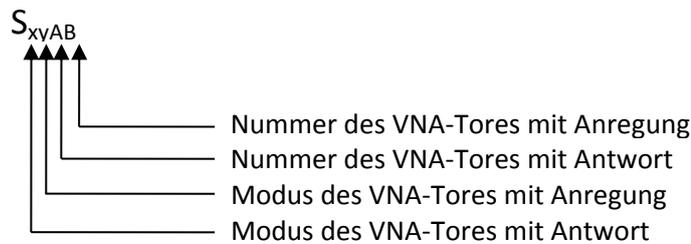


Bild 4: Physikalische und logische VNA-Tore

Dabei wird folgende Nomenklatur verwendet:



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

Bild 5: Nomenklatur von Mischmoden-Parametern

Entsprechend sind die S-Parameter wiederum als Verhältnisse von Leistungswellen zu verstehen.

$$S_{xyAB} = \frac{\text{Eingangssignal am VNA - Tor A im Modus x}}{\text{Ausgangssignal am VNA - Tor B im Modus y}} \quad (6)$$

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

$$S^{mm} = M \cdot S^{std} \cdot M^{-1} \quad \text{mit}$$

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad S^{mm} = \begin{bmatrix} S_{dd11} & S_{dd12} \\ S_{dd21} & S_{dd22} \\ S_{cd11} & S_{cd12} \\ S_{cd21} & S_{cd22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{dc11} & S_{dc12} \\ S_{dc21} & S_{dc22} \\ S_{cc11} & S_{cc12} \\ S_{cc21} & S_{cc22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

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 an einem einzelnen Paar 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.

3.2 Einspeisung des Signals

Zur Einspeisung des Mess-Signals in den symmetrischen Prüfling müssen die 50 Ohm Ausgänge des Multiport NWA's mit den beiden Adern des symmetrischen Kabels verbunden werden. Dabei darf die Symmetrie und Geometrie des Prüflings so wenig wie möglich beeinflusst werden und die Anpassung und Symmetrie der Anschaltvorrichtung sollte dem anzuschließenden Kabel überlegen sein [11].

Für entsprechende Anlegefelder gibt es verschiedene – in der Regel aufwendige – kommerzielle Lösungen, allerdings bisher nur für jeweils 4 Paare. Zur Messung der Kopplungsdämpfung wird ein Anlegefeld für ein einzelnes Paar benötigt. Für die nachfolgend

aufgeführten Messungen wird ein neu gestaltetes Anlegefeld für ein symmetrisches Paar mit folgenden Eigenschaften eingesetzt:

Tabelle 1 – Eigenschaften des Anlegefeldes

Wellenwiderstand Primärseite	2 x 50 Ohm
Wellenwiderstand Sekundärseite	1 x 100 Ohm
Unsymmetriedämpfung Sekundärseite (offen)	> 40 dB
Unsymmetriedämpfung Sekundärseite (Abschluss)	> 40 dB
Durchgangsdämpfung Primärseite (Kurzschluss)	< 0,2 dB
Durchgangsdämpfung Sekundärseite (back to back)	< 0,8 dB

4 Absorber

Sowohl bei dem Zangenverfahren nach IEC 62153-4-5 als auch bei dem Triaxialverfahren nach IEC 62153-4-9 sind Absorber zur Vermeidung rücklaufender Wellen und zum Abschluss des Systems erforderlich. Die Messung der Einfügungsdämpfung von Absorberzangen ist in IEC 62153-4-5 beschrieben; sie soll bei der Messung der Kopplungsdämpfung > 10 dB betragen.

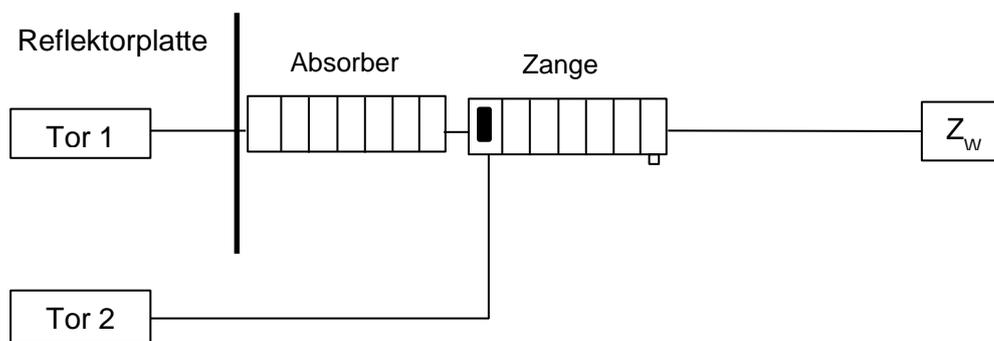


Bild 6: Einfügungsdämpfung des Absorbers nach IEC 62153-4-5

Zur Qualifizierung von Absorbern für das Triaxialverfahren wird ein koaxiales System verwendet. Der Messaufbau nach Bild 7 besteht aus einem Messrohr mit zwei Messköpfen und einem Innenleiter, so gestaltet dass das Messrohr mit dem Innenleiter ein 50 Ohm System bildet. Die Absorber werden auf den Innenleiter geschoben. Gemessen wird die Transmission (S_{21}) mit und ohne Absorber. Die Differenz beider Messungen ergibt die Einfügungsdämpfung der Absorber.

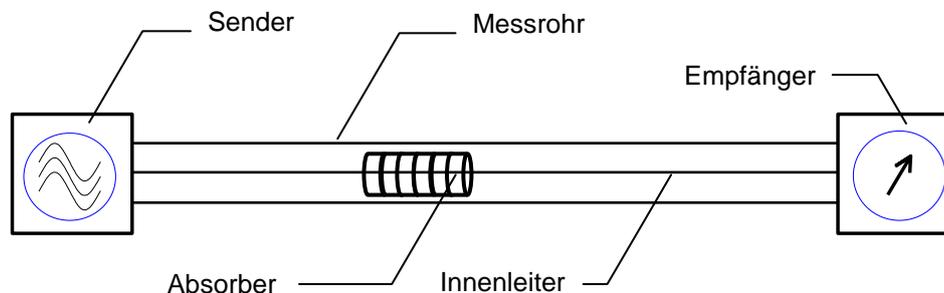


Bild 7: Einfügungsdämpfung von Absorbern mit Triaxialverfahren

Untersucht wurden sowohl nanokristalline Absorber der Fa. Sekels, Friedberg als auch Ferritabsorber. Die beste Wirkung über den gesamten Frequenzbereich von 30 MHz bis zu und über 2 GHz wurde dabei mit einer Kombination aus nanokristallinen Absorbern als und Ferritabsorbern erreicht.

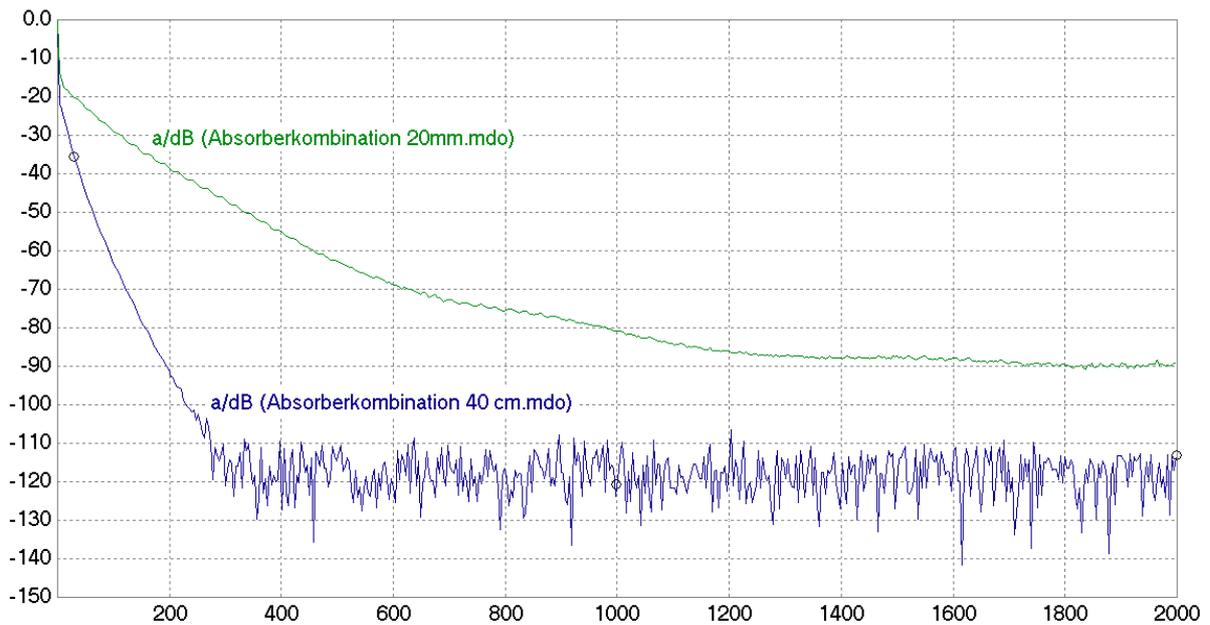


Bild 8: Einfügungsdämpfung von Absorbern mit Triaxialverfahren

Bild 8 zeigt die Einfügungsdämpfung einer Kombination von nanokristallinen Absorbern und von Ferritabsorbern bei einer Länge 20 cm und von 40 cm.

5 Messung der Kopplungsdämpfung mit Mehrtor VNA

5.1 Allgemeines

Die Messung der Kopplungsdämpfung von symmetrischen Leitungen erfolgt bisher entweder mit Absorberzangen [5] oder einem triaxialen Messaufbau [4]. Die Messung mit Absorberzangen hat einige Nachteile gegenüber der Messung mit dem triaxialen Aufbau. Die Kalibrierung des Wandlungsmaßes der Absorberzangen ist komplex und zudem abhängig vom Prüfling. Mit Absorberzangen muss ferner die Messung gegebenenfalls in geschirmten Räumen erfolgen, um Umgebungseinflüsse auszuschließen. Insbesondere im Frequenzbereich bis etwa 100 MHz ist die Wandlungsdämpfung der Zangen groß, mögliche Störeinflüsse beispielsweise durch Radiosender sind aber ebenfalls groß, sodass sich hier mehrere Schwächen des Verfahrens überlagern. Dagegen sind beim triaxialen Aufbau Umgebungseinflüsse durch den Aufbau selbst ausgeschlossen.

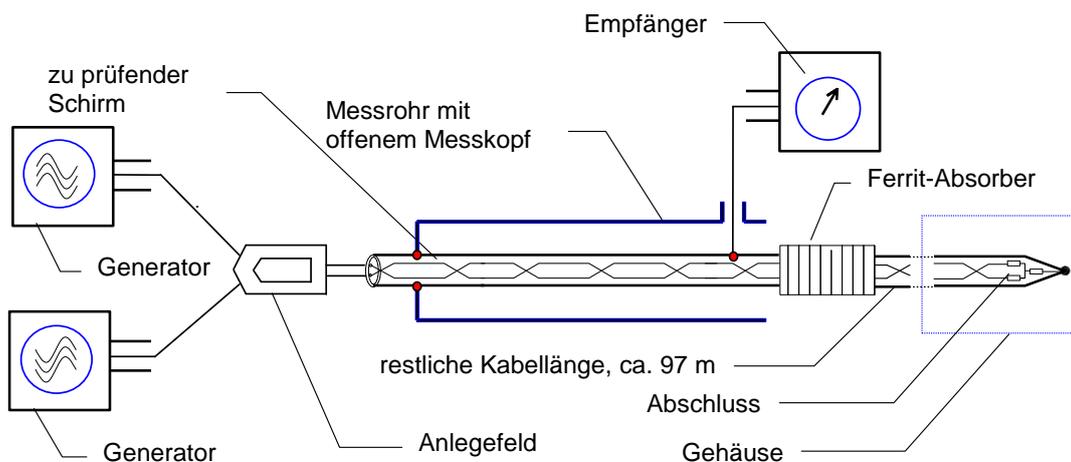


Bild 9: Messung der Kopplungsdämpfung nach IEC 62153-4-9 mit offenem Messkopf und Multiport NWA

Es existieren Absorberzangen 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. Aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit von Symmetrieübertragern für Frequenzen über 1,2 GHz wird daher vorzugsweise der triaxiale Aufbau nach IEC 62153-4-9 [4] in Verbindung mit einem Multiport NWA verwendet, Bild 9.

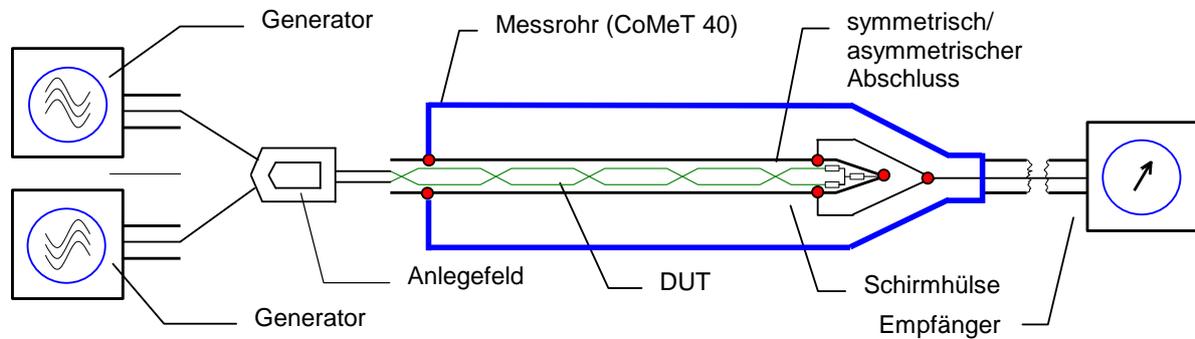


Bild 10: Messen der Kopplungsdämpfung mit Standard-Messkopf und Multiport NWA

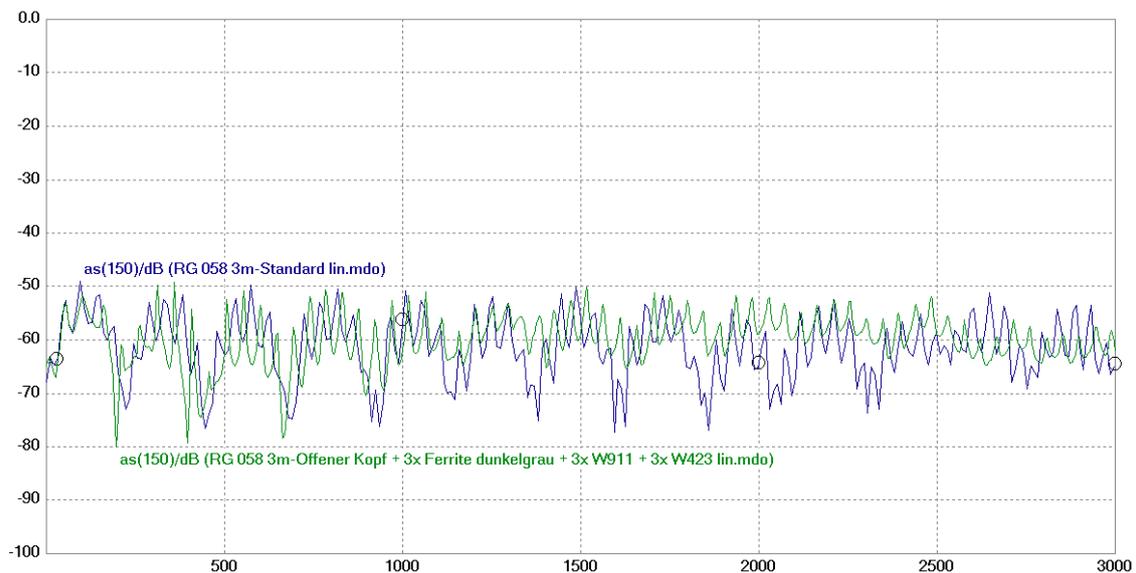


Bild 11: Messung der Schirmdämpfung eines RG 058 mit offenem Messkopf und Standard-Messkopf.

Grundsätzlich zeigt das Verfahren mit dem offenen Messkopf gute Vergleichbarkeit zum Verfahren mit dem Standard-Messkopf. Bild 11 zeigt den Vergleich einer Schirmdämpfungsmessung. Dabei ist wie üblich von den ermittelten Maximalwerten auszugehen. Diese unterscheiden sich bei den Messungen nach Bild 11 nur um ca. 2 dB, wohingegen die Messergebnisse bei einzelnen Frequenzen erhebliche Unterschiede aufweisen. Für den Nachweis, dass Kopplungsdämpfungsmessungen mit dem Symmetrieübertrager äquivalent sind zu Messungen mit virtuellem Balun, wird auf [10, 13] verwiesen.

5.2 Prüflingslänge

Während die Schirmdämpfung des Schirmes für die bei der Kopplungsdämpfung betrachteten Längen und Frequenzen längenunabhängig ist, wird bei IEC 62153-9 bisher davon ausgegangen, dass die Unsymmetriedämpfung mit zunehmender Kabellänge zunimmt. Daher wird bei der Messung der Kopplungsdämpfung nach IEC 62153-4-9 mit einer Messlänge von 100 m gearbeitet (siehe Bild 9), wobei sich 3 m im Messrohr befinden und die restlichen 97 m durch den offenen Messkopf in ein geschirmtes Gehäuse geführt werden.

Die Messungen mit offenem Messkopf bereiten allerdings bei 2 GHz verschiedene Probleme. Der offene Kopf ist im Prinzip ein Dreitor mit unterschiedlichen Wellenwiderständen. Am offenen Ende müssen Absorber angebracht werden, um rücklaufende Wellen in das Messrohr zu vermeiden. Zudem verhindern die Absorber Störeinflüsse von außen. Die Gestaltung des offenen Messkopfes bezüglich guter Hochfrequenzeigenschaften ist anspruchsvoll. Es liegt daher nahe zu prüfen, ob das Triaxialverfahren zur Messung der Kopplungsdämpfung mit offenem Messkopf betrieben werden muss oder ob bei entsprechend hohen Frequenzen auch mit dem Standardmesskopf gearbeitet werden kann. Dazu ist zunächst das Verhalten der Unsymmetriedämpfung symmetrischer Paare bei verschiedenen Längen zu untersuchen.

5.3 Berechnung der Unsymmetriedämpfung symmetrischer Paare

Modelle für die analytische Betrachtung der Unsymmetriedämpfung von Paaren sind in beispielsweise in [12] und [9] zu finden. Ausgehend von einem Ersatzschaltbild nach Bild 12 können die Längs-Unsymmetrie T_A und die Quer-Unsymmetrie L_A definiert werden.

$$T_A = (G_2 + j\omega C_2) - (G_1 + j\omega C_1) \text{ und } L_A = (R_2 + j\omega L_2) - (R_1 + j\omega L_1) \quad (8)$$

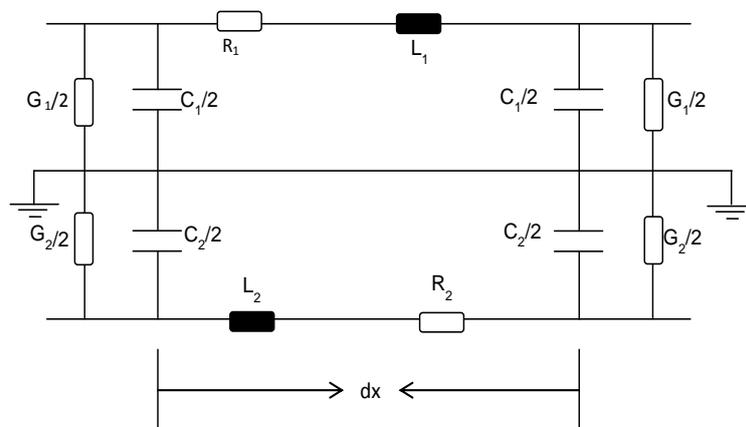


Bild 12: Ersatzschaltbild eines homogenen symmetrischen Kabels mit gleichmäßiger Verteilung der primären Leitungsbeläge

Die Terme der Unsymmetrie-Kopplungsfunktionen können formal in gleicher Weise wie die Kopplungsfunktion für das Nebensprechen geschrieben werden:

$$T_{u,n} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{Z_{unbal.}} \cdot \int_{x=0}^{x=l} [T_A(x) \cdot Z_{unbal.}^2 + L_A(x)] \cdot e^{-(\gamma_{diff} + \gamma_{com})x} \cdot dx \quad (9)$$

$$T_{u,f} = (T_A \cdot Z_{unbal.}^2 \pm L_A) \cdot \frac{1}{Z_{unbal.}} \cdot \frac{l}{4} \cdot S_n \quad (10)$$

Der Phaseneffekt durch Aufsummieren der infinitesimal kleinen Kopplungen entlang der Übertragungsleitung wird durch die Summenfunktion S ausgedrückt. Bei Vernachlässigung der Kabeldämpfung kann S durch folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$S_n = \frac{\sin(\beta_{diff} \pm \beta_{com}) \cdot \frac{l}{2}}{(\beta_{diff} \pm \beta_{com}) \cdot \frac{l}{2}} \cdot e^{-j \cdot (\beta_{diff} \pm \beta_{com}) \cdot \frac{l}{2}} \quad (11)$$

Dabei kürzt sich die Länge aus den Gleichungen heraus, d.h. bei gleichmäßiger Verteilung und bei hohen Frequenzen ist die Unsymmetriedämpfung längenunabhängig. Bei hohen Frequenzen nähert sich der asymptotische Wert:

$$S_n = \frac{2}{(\beta_{diff} \pm \beta_{com}) \cdot l} \quad (12)$$

und bei tiefen Frequenzen wird die Summenfunktion zu:

$$\left| S_n \right| \rightarrow 1 \quad (13)$$

Das Verhalten der Unsymmetriedämpfung bei unterschiedlichen Längen und zufälligen Störungen zeigen beispielhaft die Messungen in Bild 13. Es ist erkennbar, dass bei Frequenzen oberhalb einiger 10 MHz keine nennenswerten Unterschiede auftreten. Insofern erscheint es möglich, auf die 100 m Prüflingslänge bei der Kopplungsdämpfungsmessung zu verzichten, wenn die minimale Messfrequenz genügend hoch gewählt wird.

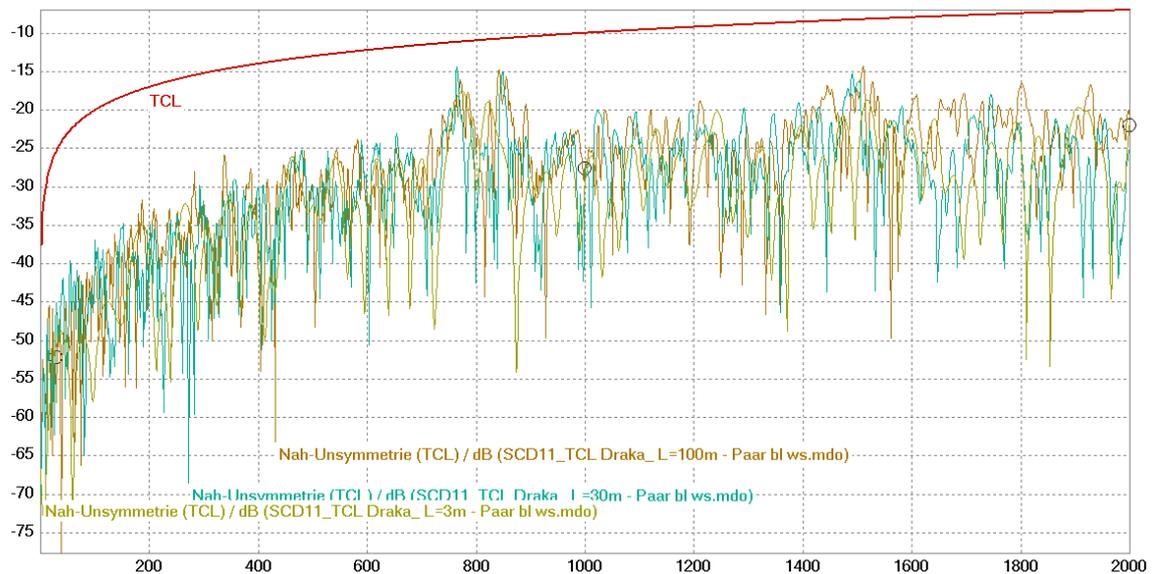


Bild 13: Nah-Unsymmetriedämpfung eines S/STP-Kabels bei unterschiedlichen Längen.

5.4 Rückflussdämpfung

Bei der Messung Rückflussdämpfung geschirmter symmetrischer Paare (S_{dd11}) muss der Prüfling mit seinem Wellenwiderstand abgeschlossen werden. Dies gilt sowohl für den Gleichtaktbetrieb als auch gleichzeitig für den Gegentaktbetrieb, was ein spezielles Abschlussnetzwerk erforderlich machen kann, siehe Bild 14.

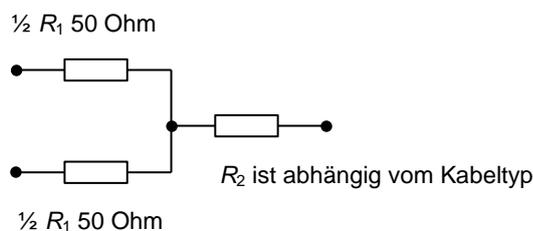


Bild 14: symmetrisch/unsymmetrischer Abschluss

Übliche symmetrisch/unsymmetrische Abschlüsse sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2 – Übliche Konfiguration symmetrisch/asymmetrischer Abschlüsse

	Wellenwiderstand des Paares zum Schirm bzw. zur Folie	$\frac{1}{2} R_1$	Längswiderstand R_2
S/FTP	ca. 33 Ohm	50 Ohm	8 Ohm
F/UTP	ca. 50	50 Ohm	25 Ohm
U/UTP	ca. 75	50 Ohm	50 Ohm

Die Induktivität der Abschlusswiderstände soll dabei möglichst klein sein, was insbesondere für das Gleichtaktsignal durch den mitunter langen Weg zum Schirm problematisch ist.

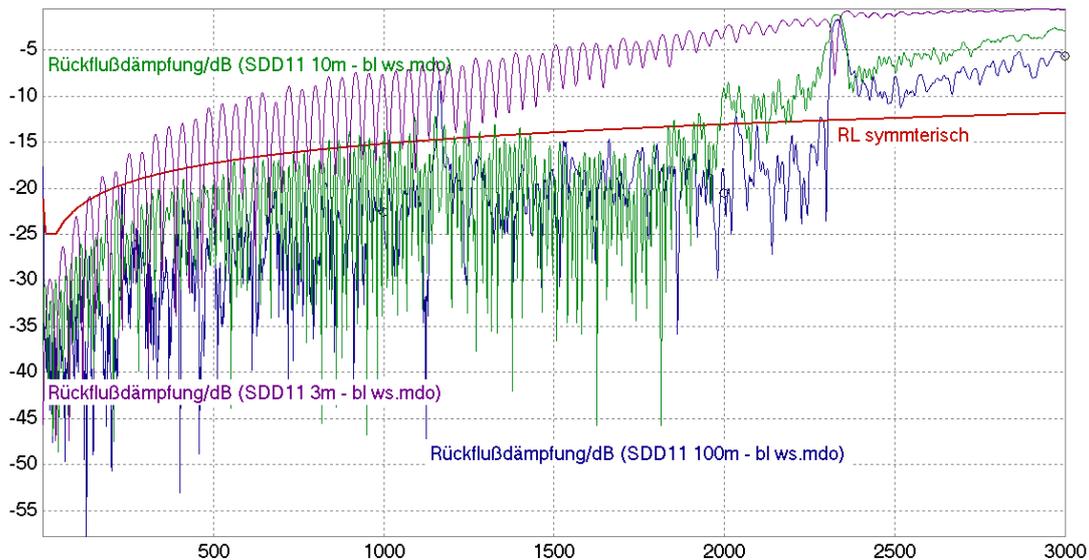


Bild 15: Rückflussdämpfung eines geschirmten symmetrischen Paares an verschiedenen Längen an einem Cat7 Kabel

Die gemessene Rückflussdämpfung (S_{dd11}) symmetrischer Kabel wird zu kurzen Längen hin typischerweise schlechter (Bild 15). Dies kann auf einen unzureichenden Abschlusswiderstand zurückgeführt werden. Auch die Notwendigkeit, die Geometrie des Paares zu stören, um es überhaupt kontaktieren zu können, spielt eine wesentliche Rolle. Bei der Messung der Rückflussdämpfung an verschiedenen Längen (Bild 15) wurde ein Abschluss nach Bild 14 mit $R_1 = 50 \text{ Ohm}$ und $R_2 = 0 \text{ Ohm}$ eingesetzt. Bei größeren Messlängen nimmt der Einfluss des Abschlusswiderstandes um die doppelte, frequenzabhängige Dämpfung des Prüflings ab (das Kabel schließt sich selbst ab).

Für den Abschluss des Gleichtaktsignals gelten dieselben Überlegungen. Folglich ist von ähnlichen Effekten auszugehen wie in Bild 15 gezeigt. Da im Falle eines unzureichenden Abschlusses des Gleichtaktsignals für den für die Kopplungsdämpfung entscheidenden Signalpfad mehr Energie zur Verfügung steht, ist eine deutliche Auswirkung auf Messergebnisse der Kopplungsdämpfung zu erwarten, wenn das Gleichtaktsystem unzureichend abgeschlossen ist.

5.5 Vergleiche verschiedener Kopplungsdämpfungsmessungen

Die Messung der Kopplungsdämpfung mit Triaxialverfahren mit offenem Messkopf nach IEC 62153-1-9 mit einer Messlänge des Messrohres von 3 m bei einer gesamten Kabellänge von 500m und die Messung mit Standardmesskopf bei einer Messlänge von 3 m sind in Bild 16 dargestellt. Die Maximalwerte beider Messungen weichen nur geringfügig voneinander ab. Die verbleibenden Unterschiede werden auf die schlechtere Rückflussdämpfung bei kurzen Längen zurückgeführt. Für Messungen mit Standardmesskopf mit einer Messlänge von 3 m muss der Abschlusswiderstand verbessert werden; die Rückflussdämpfung sollte $> 10 \text{ dB}$ sein.

Die schlechtesten Werte des Zangenverfahrens nach IEC 62135-4-5 (Bild 17) und die schlechtesten Werte der Kopplungsdämpfung mit Triaxialverfahren nach IEC 62153-1-9 mit offenem Messkopf und mit Standardmesskopf (Bild 16) liegen jeweils im Bereich von etwa 85 dB bei 500 MHz und bei etwa 74 dB bei 2 GHz. Es ergibt sich damit eine gute Übereinstimmung aller Messverfahren.

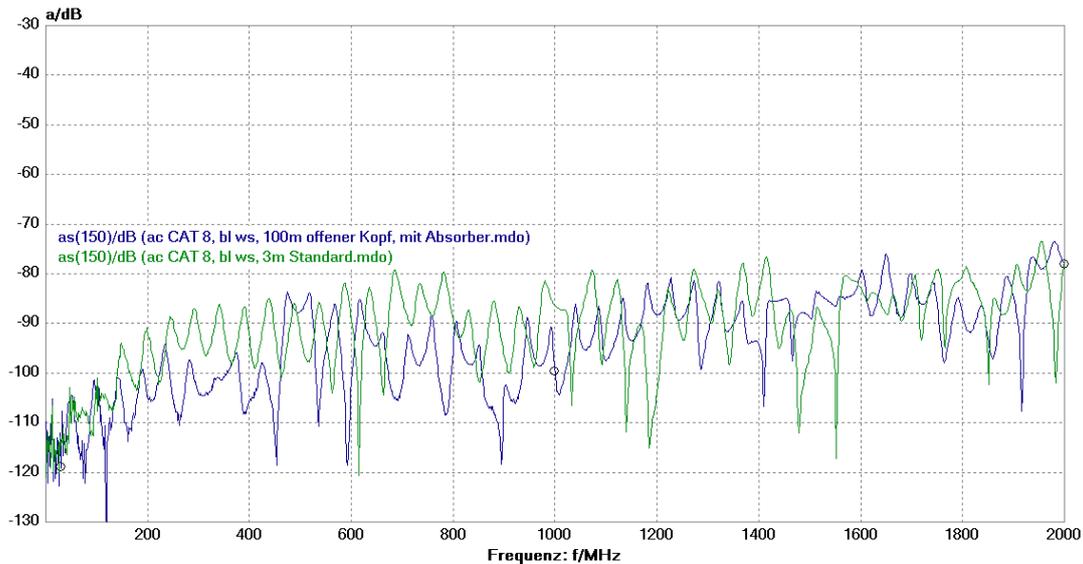


Bild 16: Kopplungsdämpfung mit Triaxialverfahren mit offenem Messkopf nach IEC 62153-1-9 und mit Standardmesskopf an einem Cat8.2 Kabel

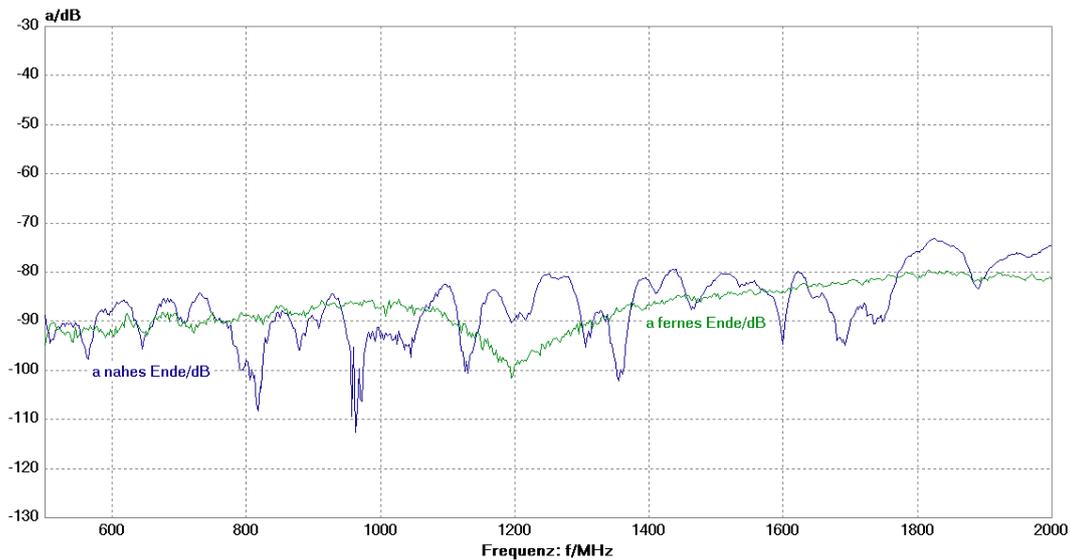


Bild 17: Kopplungsdämpfung nach IEC 62135-4-5, MDS 22, 500 MHz bis 2 GHz an einem Cat8.2 Kabel

6 Fazit

Im Hinblick auf die Sicherstellung einer verlässlichen Kopplungsdämpfungsmessung bei hohen Frequenzen sind mehrere technisch Randbedingungen zu gewährleisten und Probleme zu lösen. Für den hier betrachteten Frequenzbereich von einigen hundert MHz bis 2 GHz kann die Einspeisung und Detektion des Signals mit der Methode der Mischmoden-Parameter erfolgen. Moderne Netzwerkanalysatoren verfügen über entsprechende Möglichkeiten. Verschiedene Anlegefelder zur Kontaktierung paariger Kabel sind kommerziell verfügbar.

Die Längenabhängigkeit der Unsymmetriedämpfung ist bei den betrachteten Frequenzen so klein, dass grundsätzlich beim Triaxialverfahren gleiche Ergebnisse unter Verwendung des offenen Messkopfs und des Standardmesskopfs bei einer Länge des Messrohres von 3 m erwartet werden können.

Allerdings ist der Einfluss der Rückflussdämpfung bei kurzen Längen zu beachten. Ein unzureichender Abschluss des Kabel-Prüflings – insbesondere auch bezüglich des Gleichtaktsignals – erhöht die zur Abstrahlung bereitstehende Leistung beträchtlich, die im Falle eines 100 m langen Prüflings von dessen Dämpfung reduziert wird. Die Rückflussdämpfung des

Prüflings sollte auch bei einer Messlänge von 3 m erfahrungsgemäß besser als etwa 10 dB sein. Eine verbesserte Version eines symmetrisch/unsymmetrischen Abschlusses ist in Arbeit.

Die vorgestellten Messungen zeigen, dass unter Berücksichtigung der beschriebenen Randbedingungen vergleichbare Ergebnisse vom Triaxialverfahren mit offenem Messkopf und dem Standardmesskopf sowie auch vom Zangenverfahren erwartet werden können. Damit stellt das Triaxialverfahren insbesondere für Frequenzen größer 1 GHz eine gute Alternative zum Zangenverfahren dar, da die für Frequenzen >1 GHz benötigte Messzange nur in wenigen Labors verfügbar ist.

Neben der Weiterentwicklung der Anlegefelder zur Prüflingskontaktierung und der Möglichkeiten, den Prüfling optimal abzuschließen, ist Verhalten des offenen Messkopfes Gegenstand weiterer Untersuchungen. Diese werden der Überarbeitung der Normenreihe IEC 62153 dienen.

7 Literatur

- [1] 46C/1001/CD - IEC 61156-9 Ed. 1.0: Multicore and symmetrical pair/quad cables for digital communications - Part 9: Cables for horizontal floor wiring with transmission characteristics up to 2 GHz - Sectional specification
- [2] 46C/1002/CD - IEC 61156-10 Ed. 1.0: Multicore and symmetrical pair/quad cables for digital communications - Part 10: Cables for work area wiring with transmission characteristics up to 2 GHz - Sectional specification
- [3] ISO/IEC TR 11801-99-1 Ed. 1.0: INFORMATION TECHNOLOGY - Guidance for balanced cabling in support of at least 40 Gbit/s data transmission
- [4] IEC 62153-4-9, Metallic communication cable test methods - Part 4-9: Electromagnetic compatibility (EMC) - Coupling attenuation of screened balanced cables, triaxial method
- [5] IEC 62153-4-5, Metallic communication cables test methods - Part 4-5: Electromagnetic compatibility (EMC) - Coupling or screening attenuation - Absorbing clamp method“
- [6] IEC 62153-4-4, Metallic communication cable test methods - Part 4-3: Electromagnetic compatibility (EMC) - Surface transfer impedance - Triaxial method
- [7] Thomas Hähner, Bernhard Mund – EMV-Verhalten symmetrischer Kabel – EMC Journal 4/1997
- [8] Yangawa, K.; Cross, J. – Modal decomposition (non-balun) measurement technique: error analysis and application to UTP/STP characterisation to 500 MHz; Proceedings of the IWCS 1995; pp. 127-133
- [9] Christian Pfeiler u.a., Analysis of Balance Parameters of Cables for High Data Rate Digital Communications, Proceedings of the 62nd IWCS Conference, Charlotte, US, Nov. 2013
- [10] Thomas Hähner & Bernhard Mund, Balunless Measurement of Coupling Attenuation of Balanced Cables & Components, Wire and Cable Technology International, July 2013
- [11] Thomas Hähner, Messung der Übertragungseigenschaften symmetrischer Kabel bis in den GHz Frequenzbereich, Technische Akademie Esslingen [TAE], 15. Oktober 2013
- [12] Thomas Hähner, Bernhard Mund – Test methods for screening and balance of communications cables; Proceedings of EMC Zurich, 1999, pp. 533-538
- [13] Lauri Halme, Bernhard Mund: Messen der Schirmwirkung elektrischer Kabel, Anwenderforum Elektrische Kabel, Technische Akademie Esslingen [TAE], 15. Oktober 2013