

# EMV – Parameter von einpaarigen Ethernet Kabeln

## EMC – Parameter of single pair Ethernet cables

Thomas Hähner  
Nexans France  
140/146 avenue Eugène Delacroix, 91210 Draveil, France  
thomas.haehner@nexans.com

Bernhard Mund  
bda connectivity GmbH  
Herborner Straße 61A, 35614 Aßlar, Germany  
bernhard.mund@bda-c.com

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

Thomas Schmid  
Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG,  
Hauptstraße 1, 83413 Fridolfing, Germany  
thomas.schmid@rosenberger.com

### Kurzfassung

Einpaarige symmetrische Kabel werden bereits in industriellen Anwendungen sowie im Automotive Bereich eingesetzt. Für die für Gebäudeverkabelung nach ISO/IEC 11801 und EN 50173 eingesetzten Kabel existieren bereits Normen respektive Normentwürfe, IEC 61156-11, IEC 61156-12 und IEC 61156-13. Die Schirmwirkung solcher symmetrischer Kabel ergibt sich als Kopplungsdämpfung aus der Interaktion der Unsymmetriedämpfung des Paares und der Schirmwirkung des Schirmes. Genormte Messverfahren für die Kopplungsdämpfung ab 30 MHz sind IEC 62153-4-5, Verfahren mit Absorberzangen, sowie IEC 62153-4-9, Triaxialverfahren. Da wesentliche Anwendungen der einpaarigen Kabel bei Frequenzen unterhalb 30 MHz arbeiten, wird ein vergleichbares Messverfahren für die Schirmwirkung symmetrischer Kabel nach IEC 61156-11 bis 61156-13 unterhalb von 30 MHz benötigt.

Der Kopplungswiderstand nach IEC 62153-4-3 für Frequenzen bis zu 30 MHz erfasst nur den Einfluss des Schirmes, nicht die Symmetrie-Eigenschaften des Paares. Deshalb erfolgte die Erweiterung der IEC 62153-4-9 in einem Amendment zur Messung der "Low Frequency Coupling Attenuation, LFCA". Diese "Kopplungsdämpfung bei tiefen Frequenzen" erfasst sowohl den Einfluss des Schirmes (falls vorhanden) als auch die Unsymmetriedämpfung einpaariger symmetrischer Kabel unterhalb von 30 MHz.

In diesem Beitrag wird die LFCA in den Rahmen der üblichen Verfahren zur Bewertung der Schirmeigenschaften gestellt und mit Simulationsrechnungen verglichen. Es werden die Ergebnisse eines "Round Robin Tests" symmetrischer einpaariger Kabel zusammengestellt. Weiterhin wird die Eignung des LFCA Messverfahrens zur Beurteilung der Schirmwirkung ungeschirmter symmetrischer Kabel diskutiert, da die genannten Normen für einpaarige Verkabelung und Kabel auch ungeschirmte Konstruktionen umfassen.

LFCA und CA nach der Triaxialmethode sind gut vergleichbar zwischen verschiedenen Laboren, was gute Reproduzierbarkeit impliziert. Für die untersuchten hochgeschirmten Muster erscheint die in den Normentwürfen vorgeschlagene Grenze Type I angemessen. Dass mit weniger Materialeinsatz geringere Schirmeigenschaften erreicht werden können, ist naheliegend. Die gemessenen LFCA/CA Kurven sind gut vergleichbar mit den Simulationen.

Der an einem dieser Muster gemessene Alien-Crosstalk erfüllt die Anforderungen nach der derzeit veröffentlichten Norm. Daher kann davon ausgegangen werden, dass Kabel, die die Schirmeigenschaften nach Type I haben, aufgrund der Bauart die Anforderungen an den Alien-Crosstalk erfüllen. Ob dies allerdings auch für den Type Ib gilt, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

### Abstract

Currently, single-pair cables are already used in industrial and automotive applications. For cables used in structured cabling according to ISO/IEC 11801 and EN 50173, standards are as well available and under development, IEC 61156-11, -12 and -13. The EMC related performance of such balanced cable can be described as coupling attenuation which can be understood as the interaction of balance performance of the pair and screening performance of the screen. Standardised measurement procedure for coupling attenuation for frequencies of 30 MHz and higher are IEC 62153-4-5, absorbing clamp method, and IEC 62153-4-9, triaxial method. As the main application for single pair cable are at frequencies below 30 MHz, a comparable method for the EMC related performance of balanced cables according to IEC 61156-11 to -13 for frequencies below 30 MHz is needed.

Transfer impedance according to IEC 62153-4-3 for frequencies below 30 MHz only covers the effect of the screen, not the balance performance of the pair. Therefore, an amendment to IEC 62153-4-9 introduces the "Low Frequency Coupling Attenuation" (LFCA) using the same measurement set-up as for coupling attenuation.

This paper describes LFCA in the context of the usual measurement methods for screening performance. Measurement results of a round robin test are shown and compared to calculations of advanced modelling. Furthermore, the suitability of LFCA for unscreened cables is evaluated because the mentioned standards also include options for unscreened cables and cabling.

LFCA results are well comparable between different labs, this implies good reproducibility. The proposed limit according to Type I seems to be suitable for the tested well-screened cable samples. It is obvious that low screening performance can be achieved with less effort.

For one of these designs alien crosstalk measurements have been performed and the result is achieving the limits of the already published IEC 61156-11. Therefore, it can be assumed that screening performance according to Type I is sufficient to fulfil alien crosstalk requirements by design. Whether also Type 1b is sufficient needs to be evaluated by further studies.

## 1 Physikalische Grundlagen

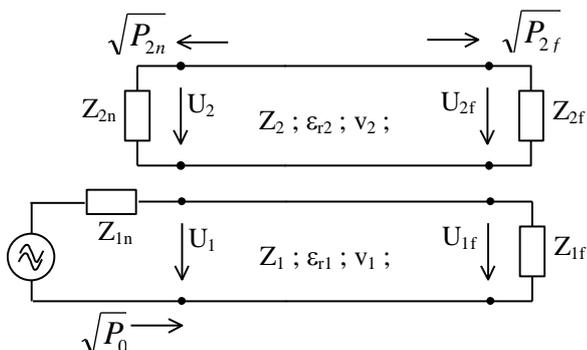
### 1.1 Allgemeine Kopplungsfunktionen

Für die Messung von Kopplungen ist es sinnvoll, das Konzept der Betriebsdämpfung mit der Quadratwurzel von Leistungswellen zu verwenden, wie bei der Definition von Streuparametern [1, 2, 3, 21]. Die allgemeine Kopplungsübertragungsfunktion  $T_{n,f}$  ist dann definiert als:

$$T_{n,f} = \frac{U_{2n}/\sqrt{Z_2}}{U_1/\sqrt{Z_1}} = \frac{\sqrt{P_{2n}}}{\sqrt{P_0}} \quad (1)$$

Die elektromagnetische Beeinflussung zwischen Kabel und Umgebung ist im Prinzip das Übersprechen zwischen zwei Leitungen und wird durch kapazitive und magnetische Kopplung verursacht [1,2, 21].

Die Berechnung der Kopplung über die gesamte Kabellänge wird durch phasenrichtige Integration der infinitesimalen Kopplungsverteilung entlang des Kabels erreicht.



**Bild 1** Ersatzschaltbild für die Kopplung von zwei Leitungen

Der Phaseneffekt beim Summieren der infinitesimalen Kopplungen entlang der Leitung wird durch die Summenfunktion  $S$  [1, 21] ausgedrückt. Wenn die Kabeldämpfung vernachlässigt wird, kann die Summenfunktion  $S$  durch die folgende Gleichung ausgedrückt werden:

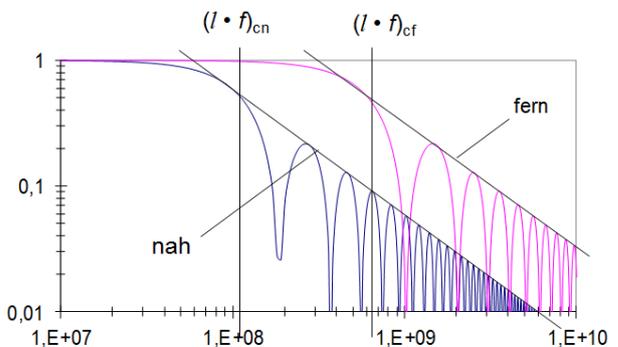
$$S_n(lf) = \frac{\sin(\beta_2 \pm \beta_1) \cdot l/2}{(\beta_2 \pm \beta_1) \cdot l/2} \exp(-j(\beta_2 + \beta_1) \cdot l/2) \quad (2)$$

Für hohe Frequenzen wird der asymptotische Wert zu:

$$\left| S_{n,f} \right| \rightarrow \frac{2}{(\beta_1 \pm \beta_2) \cdot l} \quad (3)$$

für niedrige Frequenzen wird die Summenfunktion zu:

$$\left| S_{n,f} \right| \rightarrow 1 \quad (4)$$



**Bild 2** Summenfunktion

Der Schnittpunkt zwischen den asymptotischen Werten für tiefe und hohe Frequenzen ist die sogenannte Grenzfrequenz  $f_c$ . Diese Frequenz gibt die Bedingung für lange elektrische Kabel:

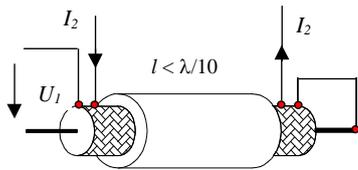
$$f_{c,n} \cdot l \geq \frac{c_0}{\pi \cdot |\sqrt{\epsilon_{r1}} \pm \sqrt{\epsilon_{r2}}|} \quad (5)$$

### 1.2 Schirmungsparameter koaxialer Kabel

In [1, 21] wird die Kopplung durch einen Kabelschirm ausführlich beschrieben. Im Folgenden ist eine kurze Zusammenfassung der Literatur zusammengestellt.

### 1.3 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 [21, 22].

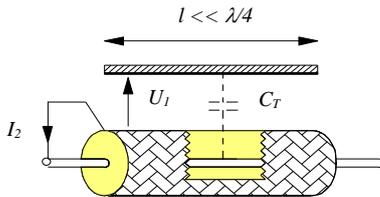


$$Z_T = \frac{U_1}{I_2 \cdot l} \quad (6)$$

**Bild 3** Definition des Kopplungswiderstands

### 1.4 Kopplungsadmittanz

Die Durchgriffskapazität  $C_T$  wird durch die normierte Größe der Kopplungsadmittanz  $Y_T$  erfasst.



$$Y_T = \frac{I_2}{U_1 \cdot l} = j\omega \cdot C_T \quad (7)$$

**Bild 4** Definition der Kopplungsadmittanz

Die Kopplungsadmittanz ist für ein elektrisch kurzes Kabelstück definiert als Quotient des durch die kapazitive Kopplung im Sekundärkreis verursachten Stroms im Schirm zur Spannung im Primärkreis bezogen auf die Längeneinheit [21].

Die Durchgriffskapazität  $C_T$  und damit die kapazitive Koppeladmittanz  $Y_T$  sind abhängig von der Permittivität und Geometrie des äußeren Stromkreises. Um eine von der Permittivität und Geometrie des Außenkreises unabhängige Größe zu haben, die auch mit dem Kopplungswiderstand  $Z_T$  vergleichbar ist, wird die kapazitive Koppelimpedanz  $Z_F$  eingeführt [1, 2].

$$Z_F = Z_1 \cdot Z_2 \cdot Y_T \quad (8)$$

### 1.5 Schirmdämpfung

Die Schirmdämpfung ist definiert als das logarithmische Verhältnis der in das angepasst abgeschlossene Kabel eingespeisten Leistung und der maximalen Spitzenleistung im angepassten äußeren Stromkreis in einem Frequenzbereich, in dem das Kabel elektrisch lang ist [6, 23]. Aus Bild 5 ist zu erkennen, dass die maximale Spitzenleistung für elektrische lange Kabel mit Geflechschirm über die Frequenz konstant ist.

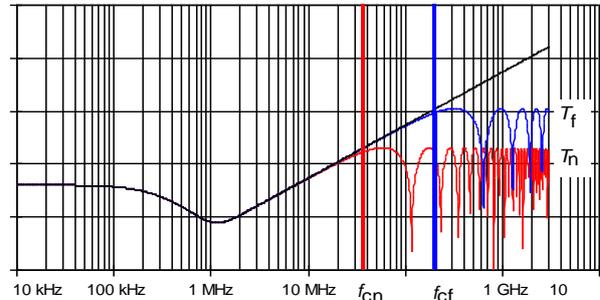
$$a_s = 10 \log_{10} \left| \frac{P_1}{P_{2,\max}} \right| \quad (9)$$

$$= 20 \log_{10} [\max\{Env(T_n); Env(T_f)\}] \quad (10)$$

Einzelheiten zur Messung der Schirmdämpfung sind in IEC 62153-4-4 [21, 23] beschrieben.

## 1.6 Kopplungsübertragungsfunktion des Kabelschirmes

Die elektromagnetische Beeinflussung zwischen Kabel und Umgebung ist im Prinzip das Übersprechen zwischen zwei Leitungen und wird durch kapazitive und magnetische Kopplung verursacht. Aus Gleichung 11 ist zu sehen, am nahen Ende addieren sich die magnetische und kapazitive Kopplung, während sie sich am fernen Ende subtrahieren, [1, 3, 4,].



**Bild 5** Berechnete Kopplungsübertragungsfunktion ( $l = 1 \text{ m}$ ;  $\epsilon_{r1} = 2,3$ ;  $\epsilon_{r2} = 1$ ;  $Z_F = 0$ )

Der Kopplungswiderstand  $Z_T$  und die kapazitive Koppelimpedanz  $Z_F$  homogener Schirme sind über die Kabellänge konstant. Die Integration entlang des Kabels kann dann leicht gelöst werden. Für angepasste Leitungen wird die Kopplungsübertragungsfunktion dann ausgedrückt durch [1, 2]:

$$T_{s,n} = (Z_F \pm Z_T) \cdot \frac{1}{\sqrt{Z_1 \cdot Z_2}} \cdot \frac{l}{2} \cdot S_n \quad (11)$$

Abb. 5 zeigt die Wirkung der Summenfunktion  $S$ . Wird das Kabel elektrisch lang (Gl. 5), beginnt die Kopplungsübertragungsfunktion mit einer konstanten Hüllkurve zu schwingen.

## 2 Unsymmetriedämpfung symmetrischer Paare

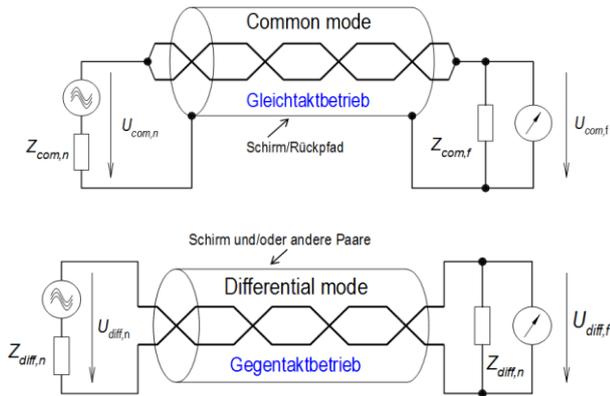
### 2.1 Allgemeines

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  $-I$ . 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, 8, 9].

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  $P_{\text{diff}}$  zu

der in den Gleichtaktbetrieb übergekoppelten Leistung  $P_{com}$ .

$$a_u = 10 \cdot \log(P_{diff}/P_{com}) \quad (12)$$



**Bild 6** Gegentakt- und Gleichtaktbetrieb eines geschirmten symmetrischen Kabels

Für tiefe Frequenzen nimmt die Unsymmetriedämpfung mit wachsender Länge ab. Mit steigender Frequenz und/oder Länge nähert sich die Unsymmetriedämpfung - ähnlich wie die Schirmdämpfung - asymptotisch einem Grenzwert an (systematische Kopplung vorausgesetzt). Die Unsymmetrie lässt sich sowohl für das sendernahe als auch für das senderferne Ende eines Kabels ermitteln [5, 6, 27].

## 2.2 Funktion der Unsymmetriedämpfung symmetrischer Paare

Unterschiedliche Durchmesser der Aderisolation, ungleiche Verdrillung und unterschiedliche Abstände der Adern zum Schirm sind einige Gründe für die Unsymmetrie des Paares. Die Unsymmetrie wird durch die kapazitive Unsymmetrie gegen Erde  $e$  (Querunsymmetrie) und die Differenz von Induktivität und Widerstand zwischen den beiden Drähten  $r$  (Längsunsymmetrie) verursacht [3, 8, 9].

$$e = C_{10} - C_{20} \quad (13)$$

$$r = (R_2 + j\omega L_2) - (R_1 + j\omega L_1) \quad (14)$$

Die Kopplung zwischen den beiden Betriebsarten wird dann ausgedrückt durch:

$$T_{u,n} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{Z_{diff} Z_{com}}} j\omega \int_0^l \left[ e(x) Z_{diff} Z_{com} + \frac{r(x)}{j\omega} \right] \cdot e^{-(\gamma_{diff} + \gamma_{com}) \cdot x} dx \quad (15)$$

$$T_{u,f} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{Z_{diff} Z_{com}}} j\omega \int_0^l \left[ e(x) Z_{diff} Z_{com} - \frac{r(x)}{j\omega} \right] \cdot e^{(\gamma_{diff} - \gamma_{com}) \cdot (l-x)} dx \quad (16)$$

Dabei ist  $Z_{diff}$  der Wellenwiderstand im Gegentaktbetrieb (balanced) und  $Z_{com}$  der Wellenwiderstand im Gleichtaktbetrieb (unbalanced), [8].

Dies sind im Prinzip die gleichen Übertragungsfunktionen wie bei der Kopplung durch den Schirm. Das Integral kann nur gelöst werden, wenn die Verteilung der Unsymmetrie über die Kabellänge bekannt ist. Bei einer über die Kabellänge konstanten Unsymmetrie ergibt sich die

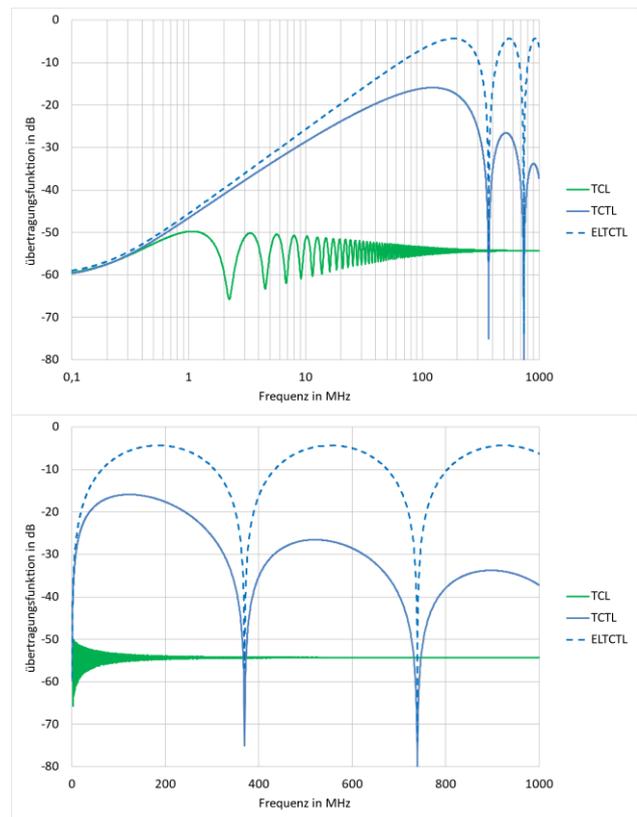
Übertragungsfunktion der Unsymmetrie wie bei Kabelschirmen [8] zu:

$$T_{u,n} = j\omega (e \cdot Z_{diff} \cdot Z_{com} \pm r) \cdot \frac{1}{\sqrt{Z_{diff} Z_{com}}} \cdot \frac{l}{4} \cdot S_f \quad (17)$$

Wenn dann das Kabel elektrisch lang ist, ergibt sich das gleiche Phänomen wie bei der Kopplung durch den Schirm. Abhängig von der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Gegentakt- und Gleichtaktschaltung nähert sich die Hüllkurve der Übertragungsfunktion der Unsymmetriedämpfung einem konstanten Wert, der frequenz- und längenunabhängig ist.

Wenn die Geschwindigkeitsdifferenz jedoch klein ist, dann erhöht sich die Übertragungsfunktion am fernen Ende um 20 dB pro Dekade über den gesamten Frequenzbereich ( $S_f = 1$ ). In der Praxis treten jedoch kleine systematische Kopplungen zusammen mit statistischen Kopplungen auf. Damit erhöht sich  $T_{u,n}$  um ca. 10 dB pro Dekade und  $T_{u,f}$  um weniger als 20 dB pro Dekade [5, 8].

Bild 7 zeigt die gerechnete Unsymmetrie eines Paares mit einer Kapazitäts-Unsymmetrie von 1,2 pF/m und einer Widerstands-Unsymmetrie von 4,5  $\Omega$ /km [10].



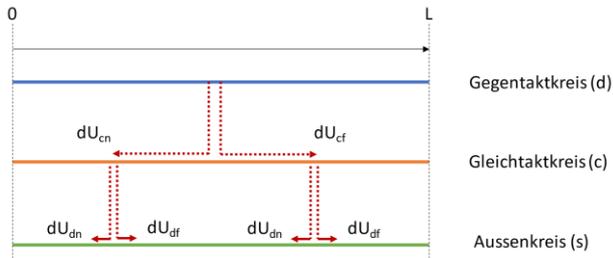
**Bild 7** Gerechnete Unsymmetrie TCL, TCTL und ELTCTL eines symmetrischen Paares von 50 m, mit logarithmischer und linearer Frequenzskala

## 3 Kopplungsübertragungsfunktion geschirmter symmetrischer Paare

Die Kopplungsdämpfung ergibt sich aus der sukzessiven Kopplung vom Gegentaktbetrieb zum Gleichtaktbetrieb

und vom Gleichtaktbetrieb zur Umgebung (oder umgekehrt). Die Kopplungsdämpfung wird häufig überschlagsmäßig als Summe der Unsymmetriedämpfung und Schirmdämpfung angenommen (dB Werte).

Genau genommen sind die Verhältnisse aber komplizierter. Bei der Kopplung vom Gegentaktbetrieb in den Gleichtaktbetrieb breitet sich eine Welle zum nahen Ende und eine zweite Welle zum fernen Ende aus. Beide Teilwellen wiederum koppeln in die Umgebung mit jeweils einer Welle, die sich zum nahen und zum fernen Ende ausbreitet, siehe Bild 8.



**Bild 8** sukzessive Kopplung

Alle Teilwellen müssen phasenrichtig über die gesamte Kopplungslänge aufsummiert (integriert) werden. Für homogene Schirme und bei systematischer Kopplung vom Gegen- in den Gleichtaktbetrieb und Anpassung der Stromkreise ergibt sich für die Kopplung vom Gegentaktbetrieb in die Umgebung [14]:

$$T_n \sqrt{\frac{Z_s}{Z_d}} = \frac{\Re_{sn} \Re_{uf}}{Z_c Z_d} \frac{1}{\gamma_c - \gamma_d} \left\{ \frac{e^{-(\gamma_s + \gamma_d)L} - 1}{\gamma_s + \gamma_d} - \frac{e^{-(\gamma_s + \gamma_c)L} - 1}{\gamma_s + \gamma_c} \right\} + \frac{\Re_{sn} \Re_{um}}{Z_c Z_d} \frac{1}{\gamma_d + \gamma_c} \left\{ \frac{e^{-(\gamma_d + \gamma_s)L} - 1}{\gamma_d + \gamma_s} - \frac{e^{-(\gamma_d + \gamma_c)L} - 1}{\gamma_s - \gamma_c} \right\} \quad (18)$$

$$T_f \sqrt{\frac{Z_s}{Z_d}} = \frac{\Re_{sf} \Re_{uf}}{Z_d Z_c} \frac{1}{(\gamma_d - \gamma_c)} e^{-\gamma_s L} \left\{ \frac{e^{(\gamma_s - \gamma_d)L} - 1}{(\gamma_s - \gamma_d)} - \frac{e^{(\gamma_s - \gamma_c)L} - 1}{(\gamma_s - \gamma_c)} \right\} + \frac{\Re_{sf} \Re_{um}}{Z_d Z_c} \frac{1}{(\gamma_d + \gamma_c)} e^{-\gamma_s L} \left\{ \frac{e^{(\gamma_c + \gamma_s)L} - 1}{(\gamma_c + \gamma_s)} - \frac{e^{(\gamma_s - \gamma_d)L} - 1}{(\gamma_s - \gamma_d)} \right\}$$

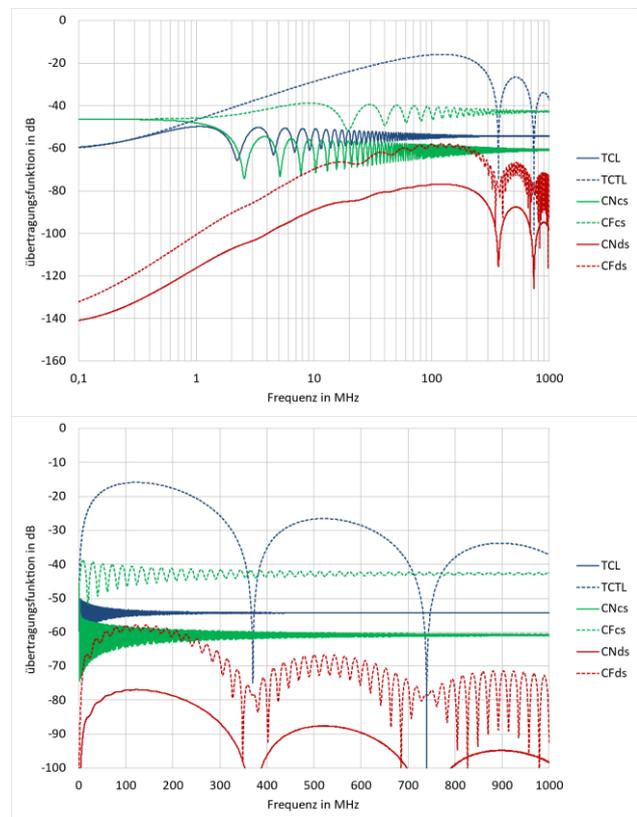
Wobei  $R_s$  und  $R_u$  die resultierende Kopplungsimpedanz des Schirmes bzw. der Unsymmetrie sind:

$$\Re_{s_f} = \frac{Z_F \pm Z_T}{2} \quad \Re_{u_f} = \frac{1}{2} (Z_d Z_c j \omega \epsilon \pm r) \quad (19)$$

Bild 9 zeigt die gerechneten Kopplungsübertragungsfunktionen eines geschirmten Paares mit 50 m Länge. Hierbei wurde wie in Bild 7 mit einer Kapazitäts-Unsymmetrie von 1,2 nF/km und einer Widerstands-Unsymmetrie von 4,5  $\Omega$ /km gerechnet. Als Schirm wurde ein Geflecht mit einem Gleichstromwiderstand von 13,6  $\Omega$ /km und einer Kopplungsinduktivität von 0,93  $\mu$ H/km angenommen. Die Kopplungsdämpfung des Schirmes beträgt bei hohen Frequenzen am nahen Ende 60 dB (CNcs) und am fernen Ende 43 dB (CFcs). Bei hohen Frequenzen entspricht die Einhüllende der Kopplungsdämpfung vom Gegentaktbetrieb in den Aussenkreis am fernen Ende (CFds) in etwa der Summe der Einhüllenden von Unsymmetriedämpfung am fernen Ende

(TCTL) und der Kopplungsdämpfung des Schirmes am fernen Ende (CFcs). Am nahen Ende hingegen entspricht sie der Summe von TCTL und der Kopplungsdämpfung des Schirmes am nahen Ende (CNcs).

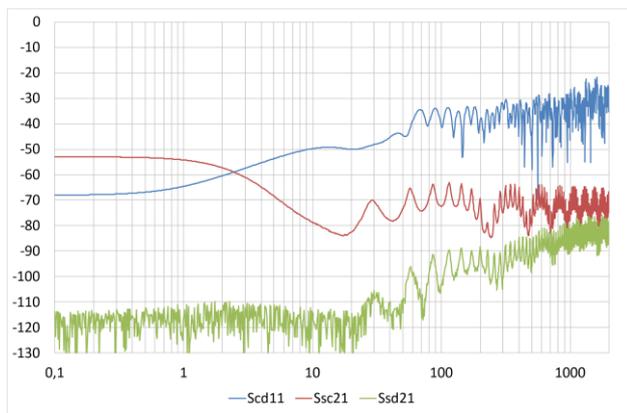
Die in Bild 9 dargestellte Betrachtung gilt für angepasste Kreise. Beim triaxialen Verfahren ist der Außenkreis nicht angepasst. Am nahen Ende ist ein Kurzschluss zwischen dem Messrohr und dem Schirm des Prüflings und das ferne Ende ist mit der Eingangsimpedanz des Messempfängers (VNA) abgeschlossen. Der Kurzschluss am nahen Ende hat den Vorteil, dass die Nahkopplung voll reflektiert wird und sich der Fernkopplung überlagert, d.h. nur eine Messung ist nötig. Der Einfluss der Reflexionen durch die Fehlanpassung, sowie der Effekt der Eigensymmetrie des Messaufbaus (z.B. Symmetrieübertrager) und des Rauschniveaus des VNA können über die Anwendung der 6-Tor S-Matrix der Schirmeffektivität berücksichtigt werden [14].



**Bild 9** Gerechnete Kopplungsübertragungsfunktionen eines geschirmten Paares mit systematischer Kopplung und 50 m Länge, mit logarithmischer und linearer Frequenzskala

Bild 10 zeigt die gerechneten Rohdaten der Unsymmetriedämpfung am nahen Ende (Scd11), der Schirmdämpfung (Ssc21) und der Kopplungsdämpfung (Ssd21) eines einpaarig geschirmten AWG23/1 Kabels für eine Kopplungslänge von 5m. Die Berechnungen wurden für einen triaxialen Messaufbau mit Kurzschluss am nahen Ende des Aussenkreises und Abschluss mit der VNA Impedanz (50  $\Omega$ ) am fernen Ende durchgeführt. Ferner wurde die Fehlanpassung durch Abschluss des Gleichtaktkreises ( $Z \approx 33 \Omega$ ) mit einem Abschlusswiderstand von 25  $\Omega$  berücksichtigt.

Das Rauschniveau des VNA wurde als 120 dB angenommen. Als Eigensymmetrie wurden die Werte eines guten Anlegefeldes angenommen.



**Bild 10** Gerechnete Nah-Unsymmetriedämpfung (Scd11) sowie Schirmdämpfung (Ssc21) und Kopplungsdämpfung (Ssd21) eines einpaarig geschirmten AWG23/1 Kabels, Kopplungslänge 5 m, Rohwerte.

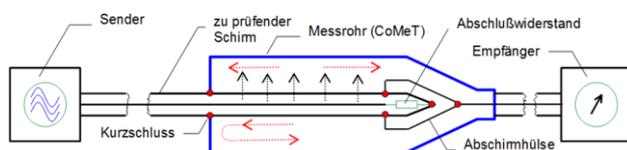
Bei tiefen Frequenzen ist der Einfluss der Eigensymmetrie und des Rauschniveaus zu erkennen, bei hohen Frequenzen ist die Überlagerung der Nahkopplung mit der Fernkopplung durch die Fehlanpassung im Außenkreis erkennbar. Die Berechnungen stimmen gut mit Messungen überein (siehe Bild 16)

Bei einpaarigen ungeschirmten Kabeln ist die Kopplungsdämpfung gleich der Unsymmetriedämpfung [13].

## 4 Messverfahren

### 4.1 Triaxialverfahren

Das triaxiale Grundsystem nach Abb. 9 besteht aus zwei gekoppelten Systemen; dabei wird das innere System vom Prüfling und das äußere System vom Messrohr und dem Außenleiter des Prüflings gebildet. (Der Innenleiter des äußeren Systems ist der Außenleiter des inneren Systems). Am nahen Ende ist der Schirm des Prüflings durch einen Kurzschluss mit dem Messrohr verbunden. Dieses Prinzip gilt sowohl für koaxiale als auch für geschirmte symmetrische Kabel. Das grundlegende triaxiale Verfahren ist als IEC 62153-4-3 und als IEC 62153-4-4 genormt, siehe Bild 11, [22, 23].

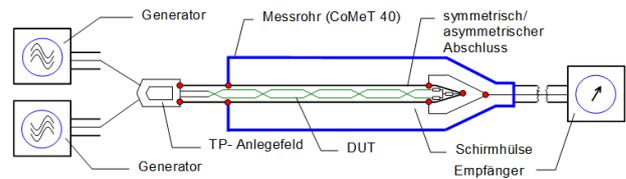


**Bild 11** Triaxialverfahren, Prinzip

### 4.2 Kopplungsdämpfung mit virtuellem Symmetrieübertrager

Um Unsymmetrie- und Kopplungsdämpfung von symmetrischen Paaren zu messen, wird ein Gegentaktsignal benötigt. Balunlose Messverfahren mit einem Mehrtor-VNA und die Anwendung der entsprechenden Mixed-

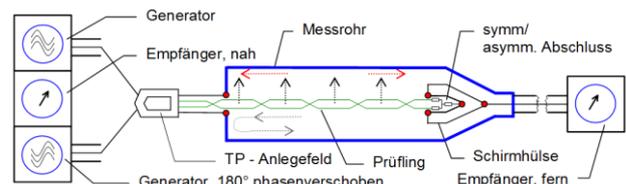
Mode S-Parameter haben sich mittlerweile auch für triaxiale Kopplungsdämpfungsmessungen etabliert, [10, 11].



**Bild 12** Messen der Kopplungsdämpfung [25]

Abbildung 12 zeigt den Messaufbau zur Messung der Kopplungsdämpfung nach IEC 62153-4-9 [25]. Der gleiche Messaufbau wird auch zur Messung der Kopplungsdämpfung bei tiefen Frequenzen, LFCA, eingesetzt.

Abbildung 13 zeigt den Messaufbau zur Messung der Kopplungsdämpfung und der LFCA ungeschirmter Paare nach IEC 62153-4-9, Amd1 [26]. Im Gegensatz zum allgemeinen Triaxialverfahren und zur Messung der Kopplungsdämpfung kann hier Nah- und Fern-Kopplungsdämpfung getrennt gemessen werden. Weil kein Kurzschluss zwischen Schirm und Rohr existiert, entspricht die Leistung im Außenkreis der des Common-Modes.



**Bild 13** Messen der Kopplungsdämpfung ungeschirmter Kabel nach IEC 62153-4-9 Amd1.

## 5 Kopplungsdämpfung bei tiefen Frequenzen (LFCA)

### 5.1 Allgemeines

Die untere Grenzfrequenz  $f_c$  zur Messung der Kopplungsdämpfung nach IEC 62153-4-9 Ed2 ist gegeben durch:

$$f_c > \frac{c_0}{2 \times l \times |\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}|} \quad (20)$$

Das heißt, die Kopplungsdämpfung geschirmter symmetrischer Paare mit überschaubarer Länge kann erst von etwa 30 MHz an aufwärts gemessen werden.

Die Schirmwirkung geschirmter symmetrischer Paare bei niedrigeren Frequenzen könnte durch die differentiellen Transferimpedanz  $Z_{Tdiff}$  beschrieben werden, die den Kopplungswiderstand des Schirms und die Unsymmetrie des Paares berücksichtigt.

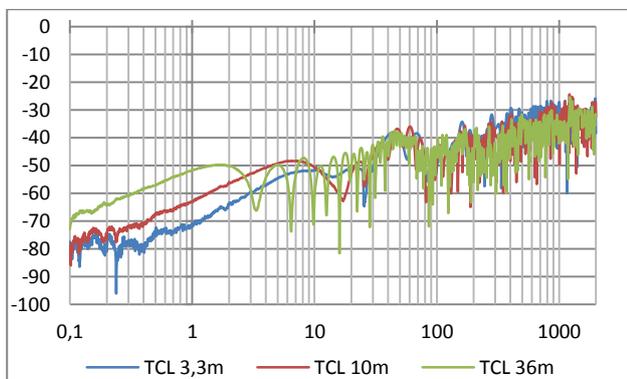
Der Kopplungswiderstand  $Z_T$  eines Kabelschirms wird in der Regel als invariant zum verwendeten Prüfverfahren und der Prüflänge angesehen. Die "differentielle Kopplungsimpedanz  $Z_{Tdiff}$  hängt jedoch von der Symmetrie des Paares ab und ist daher eine Variante der Länge und der Symmetrie.  $Z_{Tdiff}$  ist für ungeschirmte Paare ungeeignet.

Daher, und um Verwechslungen mit dem Kopplungswiderstand zu vermeiden, wird  $Z_{Tdiff}$  nicht für symmetrische Kabel verwendet.

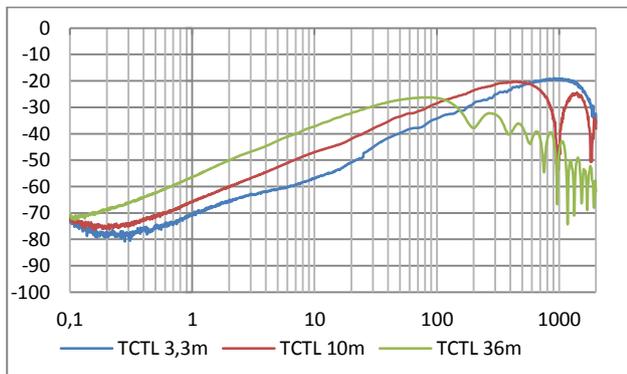
## 5.2 Geschirmte einpaarige Kabel

Als Alternative wird die Kopplungsdämpfung bei tiefen Frequenzen "Low Frequency Coupling Attenuation" LFCA für geschirmte und ungeschirmte Paare als Maß für die Kopplungsdämpfung bei tiefen Frequenzen eingeführt [26]. Der Messaufbau ist der gleiche wie bei der Kopplungsdämpfung nach Bild 12, allerdings kann die Messung im Prinzip bei DC bzw. einigen kHz gestartet werden.

Die Kopplungsdämpfung LFCA bei niedriger Frequenz beinhaltet die Unsymmetriedämpfung des Paares, den Kopplungswiderstand des Schirms (falls vorhanden) bei niedrigeren Frequenzen und die Schirmdämpfung des Schirms bei höheren Frequenzen.



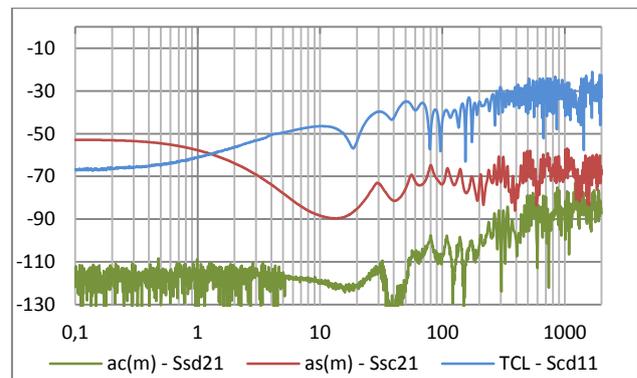
**Bild 14** Nah-Unsymmetriedämpfung TCL bei verschiedenen Längen an einem einpaarigen geschirmten AWG23/1 Kabel



**Bild 15** Fern-Unsymmetriedämpfung TCTL bei verschiedenen Längen an einem einpaarigen geschirmten AWG23/1 Kabel

Die Bilder 14 bis 16 zeigen Nah- und Fern-Unsymmetriedämpfung, Schirmdämpfung und schließlich die Rohwerte der LFCA an einem einpaarigen AWG 23/1 Kabel.

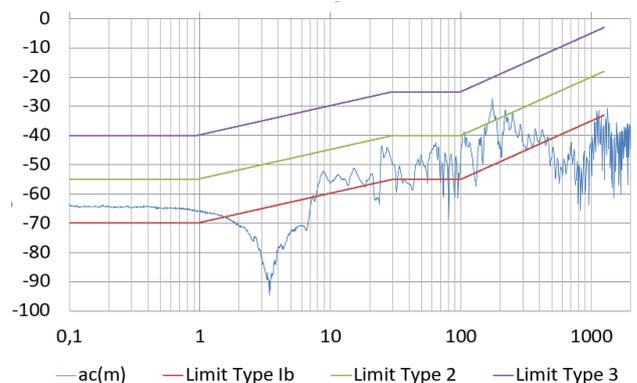
Die Längenabhängigkeit und der Frequenzverlauf der Unsymmetriedämpfung ist gut vergleichbar mit den Berechnungen nach Kapitel 2.2. Ferner ist der resultierende Verlauf der LFCA/CA gut vergleichbar mit der Modellierung nach Kapitel 3 (siehe Bild 10).



**Bild 16** Nah-Unsymmetriedämpfung sowie Schirmdämpfung und Kopplungsdämpfung eines einpaarig geschirmten AWG23/1 Kabels, Messlänge 5 m, Rohwerte

## 5.3 Ungeschirmte einpaarige Kabel

Bei ungeschirmten symmetrischen Paaren wird das innere System aus dem symmetrischen Paar (im Gegentaktbetrieb) und das äußere System aus Messrohr und dem Gleichtaktbetrieb des symmetrischen Paares gebildet. Da am ungeschirmten Paar keine Abschirmung vorhanden ist, gibt es am nahen Ende keinen Kurzschluss wie beim triaxialen Grundsystem gemäß Abbildung 11 und Abbildung 12. Daher können Kopplungsmessungen an beiden Enden durchgeführt werden. Abbildung 11 zeigt die Konfiguration für die Messung der Kopplung am nahen Ende [13].



**Bild 17** LFCA und CA an einem ungeschirmten einpaarigen Kabel, Messlänge 3 m, im Vergleich mit verschiedenen Grenzwertkurven

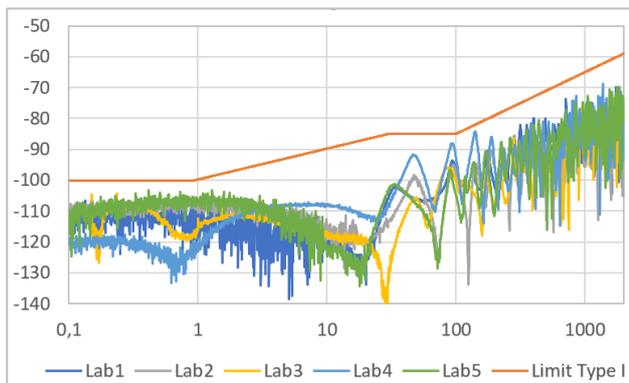
Die Welle, die sich zum nahen Ende hin ausbreitet, wird als Kopplung am nahen Ende betrachtet. Sie kann als Scd11 gemessen werden, wobei Scd11 auch die Unsymmetriedämpfung am nahen Ende (TCL) des ungeschirmten symmetrischen Kabels ist. Damit ergibt sich, dass die Kopplungsdämpfung eines ungeschirmten symmetrischen Paares am nahen Ende gleich seiner Unsymmetriedämpfung ist. Das gleiche ergibt sich im Prinzip für das ferne Ende; die Kopplungsdämpfung am fernen Ende entspricht der Unsymmetriedämpfung TCTL am fernen Ende [13].

Das Bild 17 zeigt exemplarisch eine Messung von LFCA und CA und einem ungeschirmten einpaarigen Kabel.

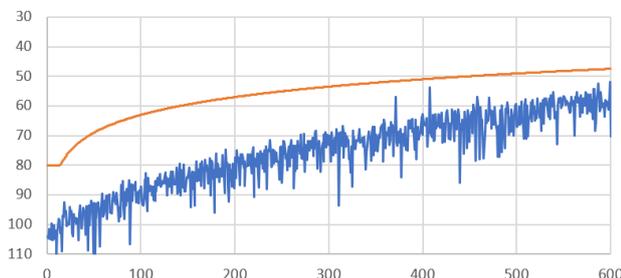
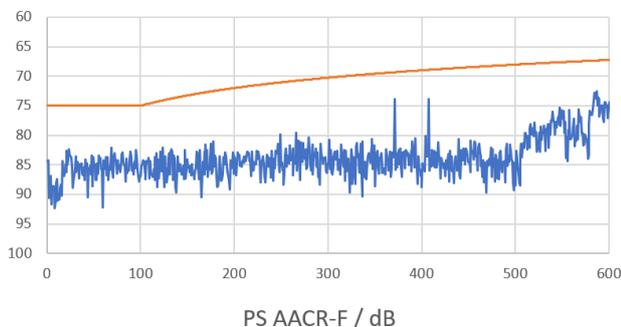
Dabei werden verschiedene Grenzwertkurve als Vergleich gezeigt. Es ist zu erkennen, dass sich auch ungeschirmte einpaarige Kabel in die vorgeschlagenen Grenzwert-Kategorien Type I bis Type 3 einordnen lassen.

## 6 Auswertung des Rundversuches

Angeregt von der Single Pair Ethernet System Alliance [16] werden verschiedene einpaarige geschirmte Kabel untersucht und in mehreren Laboren der beteiligten Partner gemessen. Die dabei gewonnenen Messergebnisse bilden eine Grundlage des vorliegenden Berichts. Bild 18 zeigt die Messung von LFCA und CA an einem hochgeschirmten AWG 26/7 Kabel. Dieses Kabel ist mit einer längslaufende Aluminium-Folie und einem Geflecht mit einer optischen Bedeckung von etwa 80% ausgestattet.



**Bild 18** LFCA/CA Messungen verschiedener Labore an Mustern eines AWG 26/7 Kabels eines Fertigungsloses PS ANEXT / dB



**Bild 19** Alien-Crosstalk Messung „6 around 1“ an einem hochgeschirmten einpaarigen AWG 22/7 Kabel, Messlänge 100 m

Es ist zu erkennen, dass die Grenze Type I nach den aktuellen Normentwürfen eingehalten wird. Type I ist die Grenze mit den anspruchsvollsten Werten.

Es kann davon ausgegangen werden, dass mit weniger aufwendigen Schirmkonstruktionen schwächere Anforderungen erfüllt werden können. Die Messergebnisse der verschiedenen Labore sind gut vergleichbar. Dieses lässt zudem auf eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen schließen.

Eine Alien Crosstalk Messungen an einem Kabel mit ähnlicher Schirmkonstruktion zeigt Bild 19. Die Grenzwerte der aktuellen Ausgabe von IEC 61156-11 werden erfüllt. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass Kabel, die die Anforderungen für LFCA/CA nach Type I einhalten, auch die Alien-Crosstalk Anforderungen erfüllen.

## 7 Conclusion

In diesem Beitrag wird die LFCA in den Rahmen der üblichen Verfahren zur Bewertung der Schirmeigenschaften gestellt und mit Simulationsrechnungen verglichen. Es werden die Ergebnisse eines „Round Robin Tests“ symmetrischer einpaariger Kabel zusammengestellt. Weiterhin wird die Eignung des LFCA Messverfahrens zur Beurteilung der Schirmwirkung ungeschirmter symmetrischer Kabel diskutiert, da die genannten Normen für einpaarige Verkabelung und Kabel auch ungeschirmte Konstruktionen umfassen.

LFCA und CA nach der Triaxialmethode sind gut vergleichbar zwischen verschiedenen Laboren, was gute Reproduzierbarkeit impliziert. Für die untersuchten hochgeschirmten Muster erscheint die in den Normentwürfen vorgeschlagene Grenze Type I angemessen. Dass mit weniger Materialeinsatz geringere Schirmeigenschaften erreicht werden können, ist naheliegend. Die gemessenen LFCA/CA Kurven sind gut vergleichbar mit den Simulationen.

Der an einem dieser Muster gemessene Alien-Crosstalk erfüllt die Anforderungen nach der derzeit veröffentlichten Norm. Daher kann davon ausgegangen werden, dass Kabel, die die Schirmeigenschaften nach Type I haben, aufgrund der Bauart die Anforderungen an den Alien-Crosstalk erfüllen. Ob dies allerdings auch für den Type Ib gilt, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

## 8 Acknowledgement

Die Autoren danken der Single Pair Ethernet System Alliance für die Durchführung des Rundversuches, auf dessen Ergebnissen dieser Beitrag basiert. Die Labore der folgenden Firmen waren an den Messungen beteiligt:

- bda connectivity GmbH
- Dätwyler IT Infra AG
- Draka Comteq Germany GmbH & Co. KG
- Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG
- Weidmueller Interface GmbH & Co. KG

## 9 Literatur

- [1] Halme, L./Szentkuti, B.: The background for electromagnetic screening measurements of cylindrical screens. Tech. Rep. PTT(1988) Nr. 3
- [2] L. Halme, R. Kytönen: Background and introduction to EM screening (shielding) behaviours and measurements of coaxial and symmetrical cables, cable assemblies and connectors, Colloquium on screening effectiveness measurements, Savoy Place London, 6 May 1998, Reference No:1998/452
- [3] W. Klein: Die Theorie des Nebensprechens auf Leitungen, Springer Verlag 1955
- [4] H. Kaden: Wirbelströme und Schirme in der Nachrichtentechnik, Springer Verlag 1959
- [5] B. Deutsch, S. Mohr, A. Roller, H. Rost: Elektrische Nachrichten Kabel, Siemens 1998
- [6] O. Breitenbach, T. Hähner, B. Mund: Screening of cables in the MHz to GHz frequency range extended application of a simple measuring method. Colloquium on screening effectiveness measurements, Savoy Place London, 6 May 1998, Reference No:1998/452
- [7] T. Hähner, B. Mund: EMV-Verhalten symmetrischer Kabel, EMC Journal 4/1997
- [8] Thomas Hähner, Bernhard Mund: Test methods for screening and balance of communications cables; Proceedings of EMC Zurich, 1999, pp. 533-538
- [9] T. Hähner, B. Mund: Background, content and future of the EMC measurement standard prEN 50289-1-6, Open/shielded test methods, 2000 International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 198-202
- [10] 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
- [11] Bernhard Mund, Christian Pfeiler: Balunless measurement of coupling attenuation of screened balanced cables up to 2 GHz, Proceedings of the 64th IWCS Conference, Atlanta, GA, USA, Oct. 2015
- [12] Thomas Hähner, Bernhard Mund, Thomas Schmid: History and recent trends of Triaxial test procedure, Proceedings of the 67th IWCS Conference, Providence, RI, US, October 2018
- [13] Thomas Hähner, Bernhard Mund, Thomas Schmid: Screening effectiveness of unscreened balanced pairs, EMC Barcelona 2019
- [14] Thomas Hähner: Model of Coupling Attenuation and the 6-port Scattering Matrix of screening effectiveness of Channels and Links, IEC/TC46 WG5 Web Meeting 2020-10-30, Meeting document Web\_201030\_01
- [15] Peter Fischer, Dick Gigon, Laurent Van Rysselberghe, Vincent Arbet-Engels: Improved measurement accuracy based on the design of novel baluns meeting the stringent latest standard requirements, Proceedings of the 68th IWCS Conference, Charlotte, NC, US, October 2019
- [16] Single Pair Ethernet System Alliance e.V.; <https://singlepairethernet.com>

## 10 Normen

- [21] IEC 62153-4-1, Introduction to electromagnetic (EMC) screening measurements
- [22] IEC 62153-4-3, Metallic communication cable test methods - Part 4-3: Electromagnetic compatibility (EMC) - Surface transfer impedance - Triaxial method
- [23] IEC 62153-4-4, Metallic communication cable test methods - Part 4-3: Electromagnetic compatibility (EMC) – Screening attenuation - Triaxial method
- [24] IEC 62153-4-5, Metallic communication cables test methods - Part 4-5: Electromagnetic compatibility (EMC) - Coupling or screening attenuation - Absorbing clamp method
- [25] IEC 62153-4-9, Metallic communication cable test methods - Part 4-9: Electromagnetic compatibility (EMC) - Coupling attenuation of screened balanced cables, triaxial method
- [26] IEC 62153-4-9, Amd1, Ed2
- [27] EN 50289-1-9, Communication cables - Specifications for test methods Part 1-9: Electrical test methods - Unbalance attenuation (transverse conversion loss TCL transverse conversion transfer loss TCTL)

Die Autoren sind Mitglieder der IEC TC 46 Familie in verschiedenen Funktionen, u.a. auch Mitarbeiter bei IEC TC 46/WG5, Screening effectiveness, mit Thomas Hähner als Convenor.