

## EMV-Parameter von einpaarigen Ethernet Kabeln

---



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



28. ITG-Fachtagung Kommunikationskabelnetze, 14. Dezember 2021



1

---

## Inhalt

- Physikalische Grundlagen
  - Triaxialverfahren
  - Summenfunktion, Kopplungsübertragungsfunktion
  - Gegentakt- & Gleichtaktbetrieb
  - Funktion der Unsymmetriedämpfung
- Messen der Kopplungsdämpfung symmetrischer Kabel
- Modell zur Berechnung der Kopplungsdämpfung
  - 6-Tor S-Matrix
- Messungen
  - LFCA, Vergleich Simulation & Messung
  - Rundversuch an Single Pair Ethernet, SPE
  - Ungeschirmte symmetrische Paare
  - Alien Crosstalk
- Ausblick & Diskussion

2

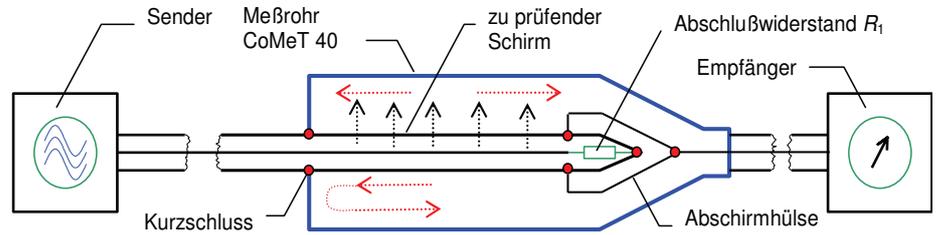
# Messen mit dem Triaxial-Verfahren, Prinzip

## Kopplungswiderstand und Schirm- oder Kopplungsdämpfung

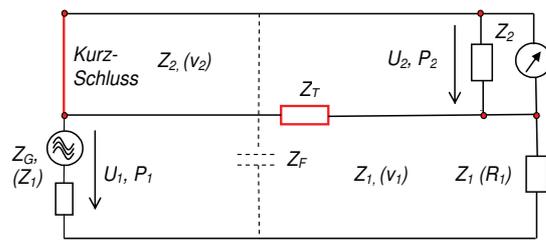
DC bis über 9 GHz mit einem Messaufbau

Die Welle, die durch den Schirm ins Messrohr koppelt, breitet sich zunächst in beide Richtungen aus.

Durch den Kurzschluss am nahen Ende ergibt sich eine Totalreflexion der Welle. Die gesamte gekoppelte Energie läuft zum Empfänger und wird dort gemessen.

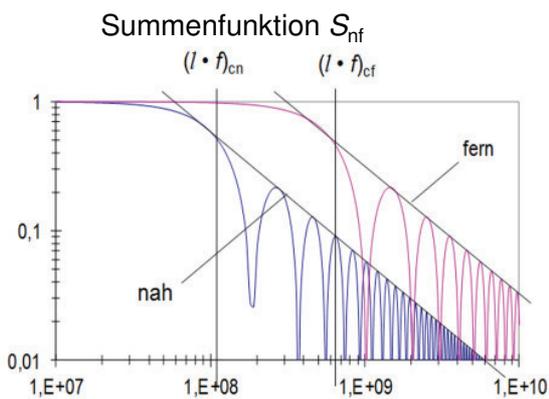


IEC 62153-4-3 Ed2 Kopplungswiderstand  
IEC 62153-4-4 Ed2 Schirmdämpfung



Ersatzschaltbild

## Summenfunktion $S_{nf}$ & Kopplungsübertragungsfunktion $T_{n,f}$



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

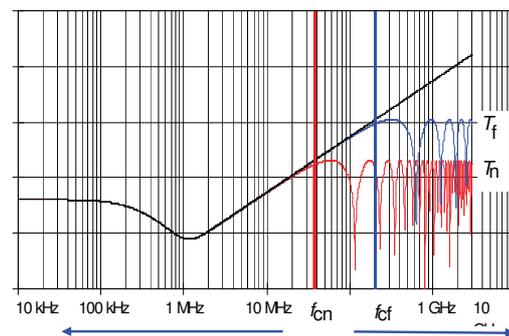
$\sim \sin x/x$   $\beta$  beinhaltet die Phasenkonstanten des inneren und des äußeren Kreises

für niedrige Frequenzen wird die Summenfunktion zu: für hohe Frequenzen wird der asymptotische Wert zu:

$$|S_n| \rightarrow 1$$

$$|S_n| \rightarrow \frac{2}{(\beta_1 \pm \beta_2) \cdot l}$$

## Kopplungsübertragungsfunktion $T_{n,f}$



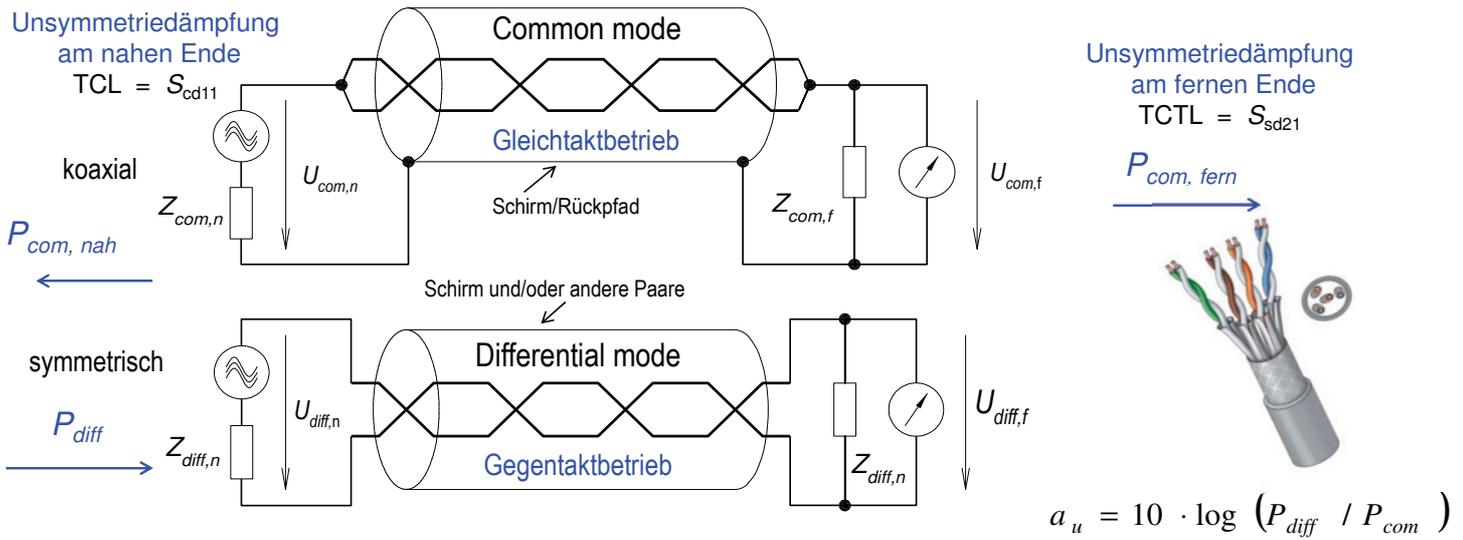
Kopplungswiderstand Schirmdämpfung

Frequenzverlauf von  $Z_T$  und  $a_s$

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

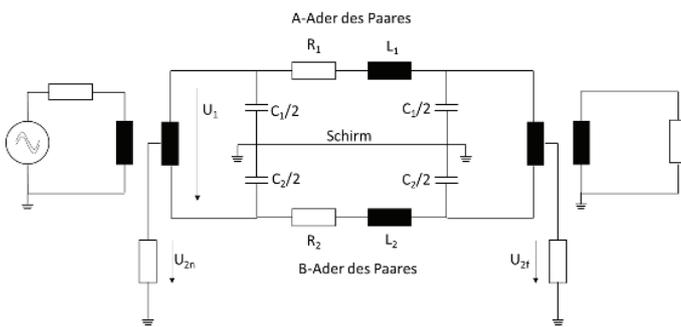
Die Kopplungsübertragungsfunktion  $T_{nf}$  ergibt sich aus der Multiplikation des äquivalenten Kopplungswiderstandes  $Z_{TE}$  und der Summenfunktion  $S_{nf}$

# Gegentakt- und Gleichtaktbetrieb



Die **Unsymmetriedämpfung**  $a_u$  eines symmetrischen Paares beschreibt im logarithmischen Maß, wie viel Leistung vom **Gegentaktssystem** in das **Gleichtaktsystem** überkoppelt (oder umgekehrt). Sie ist das logarithmische Verhältnis von eingespeister Leistung im Gegentaktbetrieb  $P_{diff}$  zu der in den Gleichtaktbetrieb übergekoppelten Leistung  $P_{com}$ .

## Unsymmetriedämpfung symmetrischer Paare



- Unsymmetrie wird verursacht u. a. durch Fertigungstoleranzen beim:  
 Drahtzug, Aderextrusion und Paarverseilung
- Sie wird ausgedrückt durch die Quer- und Längsunsymmetrie

$$e = C_{10} - C_{20}$$

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

### Kopplung zwischen Gegen- und Gleichtaktbetrieb

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

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

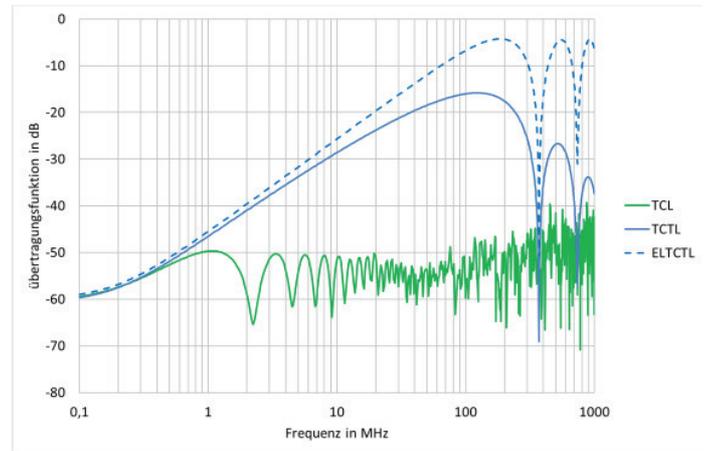
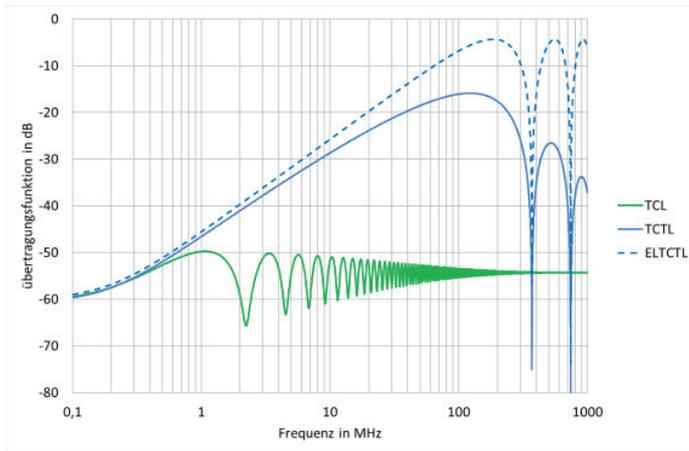
Bei konstanter Kopplung über die Länge ergibt sich mit der Summenfunktion  $S$ , ähnlich wie bei der Schirmdämpfung die Funktion der Unsymmetriedämpfung zu:

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

## Unsymmetriedämpfung symmetrischer Paare

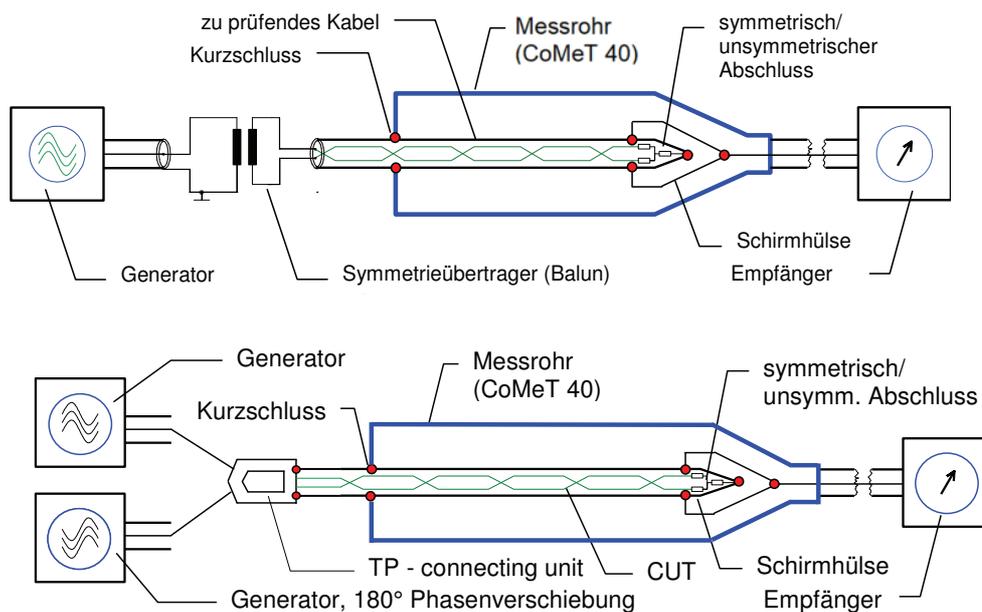
Konstante Kopplung  
 Erdkopplung 1200 pF/km  
 Widerstandsunsymmetrie 4,5 Ω/km

Statistische Kopplung  
 Erdkopplung (1200 ± 400) pF/km  
 Widerstandsunsymmetrie 4,5 Ω/km



7

## Kopplungsdämpfung LFCA/CA mit Balun und mit virtuellem Balun bis 2 GHz

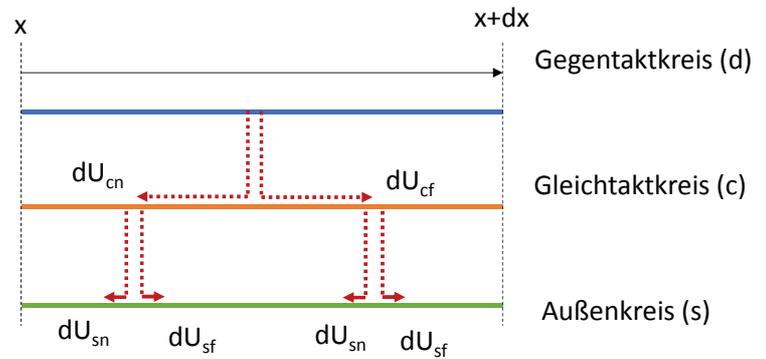


IEC 62153-4-9Ed2 + Amd1

8

## Modell zur Berechnung der Kopplungsdämpfung

- Die Kopplungsdämpfung ergibt sich aus der sukzessiven Kopplung vom Gegentakt- in den Gleichtaktkreis und dann vom Gleichtaktkreis in die Umgebung (oder umgekehrt).
- Betrachtet wird ein infinitesimal kurzes Segment.
- Bei der Kopplung vom Gegen- in den Gleichtaktkreis (über die Unsymmetrie) breitet sich jeweils eine Welle zum nahen und zum fernen Ende aus.
- Jede dieser Wellen koppelt dann in den Außenkreis (über den Schirm) und generiert wiederum 2 Wellen, die sich zum nahen und fernen Ende ausbreiten.
- Die resultierende Welle am nahen und fernen Ende ergibt sich aus der phasenrichtigen Integration aller Teilwellen entlang des Kabels.



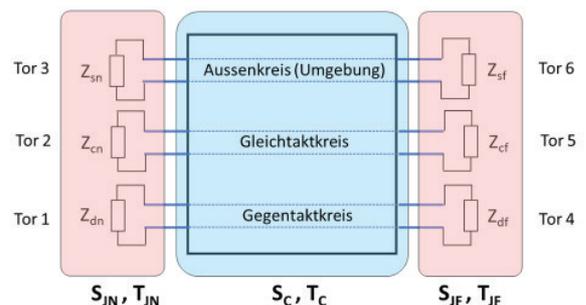
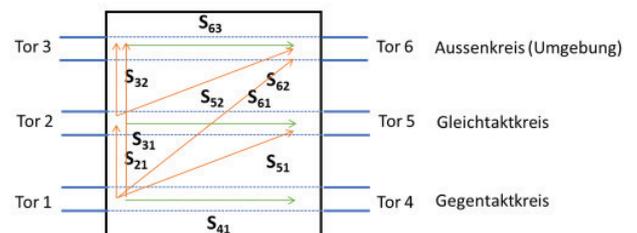
9

## Modell zur Berechnung der Kopplungsdämpfung

$$\frac{U_{sn}}{U_d} = -\frac{1}{Z_c Z_d} \Re_{sn} \left[ \int_{y=0}^L \int_{x=0}^y \Re_{uf}(x) e^{-(\gamma_d - \gamma_c)x} e^{-(\gamma_c + \gamma_c)y} dx dy + \int_{y=0}^L \int_{x=y}^L \Re_{un}(x) e^{-(\gamma_d + \gamma_c)x} e^{-(\gamma_c - \gamma_c)y} dx dy \right]$$

$$\frac{U_{sf}}{U_d} = -\frac{1}{Z_c Z_d} \Re_{sf} e^{-\gamma_d L} \left[ \int_{y=0}^L \int_{x=0}^y \Re_{uf}(x) e^{-(\gamma_d - \gamma_c)x} e^{(\gamma_c - \gamma_c)y} dx dy + \int_{y=0}^L \int_{x=y}^L \Re_{un}(x) e^{-(\gamma_d + \gamma_c)x} e^{(\gamma_c + \gamma_c)y} dx dy \right]$$

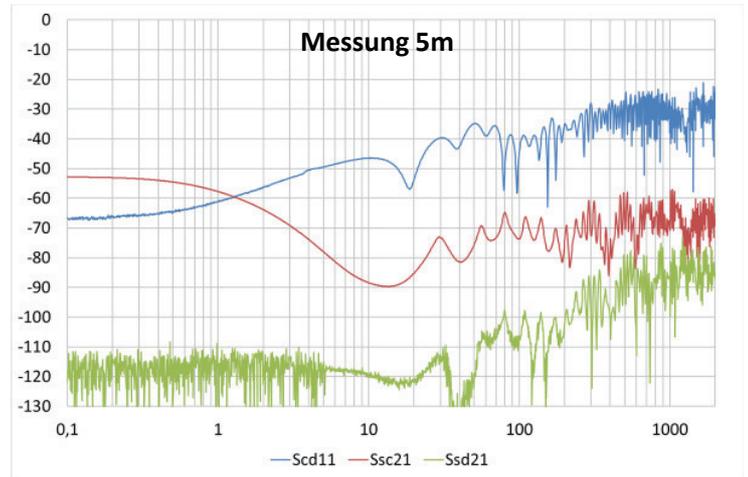
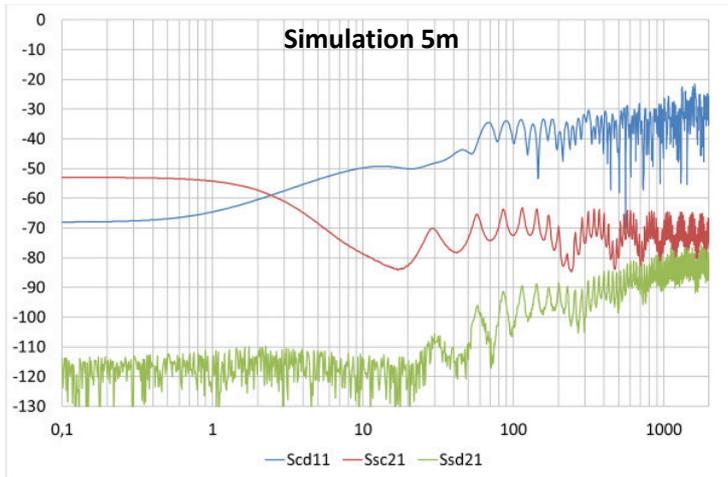
- Mit den so etablierten Kopplungsgleichungen kann die 6-Tor S-Matrix der Schirmwirkung aufgestellt werden.
- Mit der Theorie von Mehrtores kann die Schirmwirkung von kaskadierten Komponenten (Kabel, Stecker, Buchsen...) erfasst werden.
- In der gleichen Weise kann der Einfluss des Messaufbaus (Eigensymmetrie, Rauschniveau, Abschlusswiderstand...) berücksichtigt werden.



10

## Kopplungsdämpfung: Vergleich von Messung und Simulation

### Einpaarig geschirmtes AWG23/1 Kabel



← Low Frequency Coupling Attenuation

→ Coupling Attenuation

← Low Frequency Coupling Attenuation

→ Coupling Attenuation

11

## Messungen an Kabeln, Round Robin

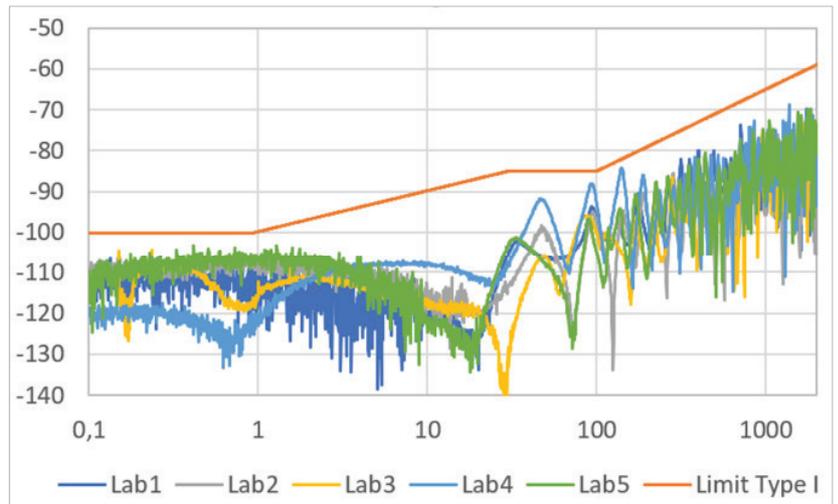
- Round Robin Test organisiert von der Single Pair Ethernet System Alliance
- Fünf Labore beteiligt:
  - bda connectivity GmbH
  - Dätwyler IT Infra AG
  - Draka Comteq Germany GmbH & Co. KG
  - Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG
  - Weidmueller Interface GmbH & Co. KG
- Verschiedene hochgeschirmte Kabelmuster mit unterschiedlichen Abmessungen AWG26/7, AWG23/1, AWG22/7, AWG18/1
- Messung von NF/HF Parametern, LFCA/CA, Alien Crosstalk
- Verwendung der Ergebnisse für die Normentwicklung



12

## LFCA/CA geschirmt in 5 Laboren

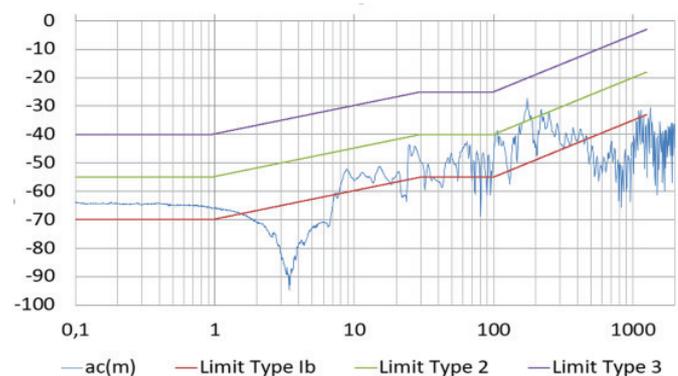
- Messungen von hochgeschirmten Kabelmustern mit Leiter-Abmessung AWG 22/7
- LFCA/CA 3 m triaxiale Methode
  - Oberhalb 30 MHz: elektrisch lang, Kopplungsdämpfung
  - Unterhalb 30 MHz: elektrisch kurz, LFCA
- Type I Grenzwerte
- Grenzwertkurve passt zur Messung
- Gute Vergleichbarkeit zwischen den Laboren
- Gute Reproduzierbarkeit



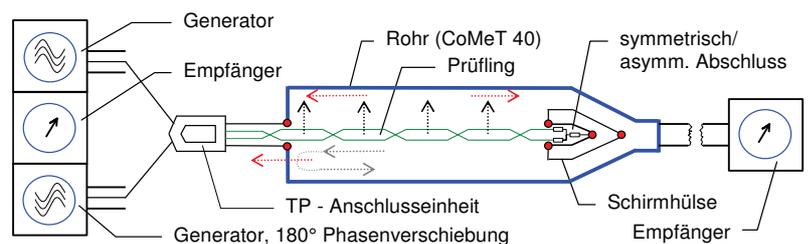
13

## LFCA/CA an einem ungeschirmten Kabelmuster

- Messungen eines ungeschirmten Kabelmusters mit AWG26/7
- LFCA/CA 3m triaxiale Methode
- Type Ib bis Type III Grenzwerte
- Es erscheint möglich, auch ungeschirmte Kabel anhand der Grenzkurven zu bewerten.
- Weitere Untersuchungen notwendig
- Alien-Crosstalk Anforderungen werden höchstwahrscheinlich nicht erfüllt □ Messungen in Installation notwendig



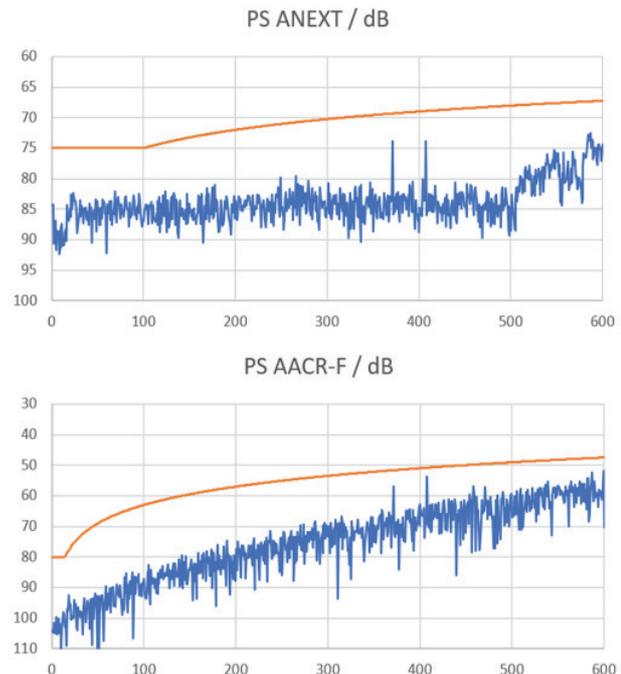
Kopplungsdämpfung ungeschirmter Paare IEC 62153-4-9 Amd1 (nahes & fernes Ende)



14

## Alien Crosstalk

- Messungen an hochgeschirmten Kabelmustern mit Leiter-Abmessung AWG22/7 und Type I LFCA/CA
- 100 m 6-around-1 Anordnung
- Grenzwertkurve wird erfüllt
- Es kann angenommen werden, dass mit Type I LFCA/CA die Alien-Crosstalk Anforderungen immer (per Design) erfüllt werden.
- Prüfung für Type Ib notwendig, um zu zeigen, dass auch diese Performance ausreicht, die Alien-Crosstalk Anforderungen zu erfüllen.
- Ungeschirmte Kabel sind von diesem Ansatz ausgenommen



15

## Zusammenfassung

- Die [Summenfunktion](#) beschreibt das Verhalten gekoppelter Systeme über der Frequenz.
- Aus der [Summenfunktion](#) ergibt sich die [Kopplungsübertragungsfunktion](#) von Kabelschirmen ([koaxial](#)) und die die [Funktion der Unsymmetriedämpfung](#) geschirmter symmetrischer Paare.
- Das [Modell der Kopplungsdämpfung](#) beschreibt die sukzessive Kopplung vom Gegentakt- in den Gleichtaktkreis und dann vom Gleichtaktkreis in die Umgebung bzw. das Messrohr (oder umgekehrt).
- Messverfahren für [LFCA/CA](#) ist das [Triaxialverfahren](#) nach IEC 62153-4-9 & 62153-4-9 Amd1. LFCA Grenzwerte für 3 m Messlänge
- Der Vergleich von [Messung](#) und [Simulation](#) eines einpaarig geschirmten AWG23/1 Kabels zeigt sehr gute Übereinstimmung.
- Ein von der [Single Pair Ethernet System Alliance](#) organisierter [Round Robin](#) Test an verschiedenen hochgeschirmten SPE-Kabeln LFCA/CA in 5 Laboren zeigt ebenfalls sehr gute Übereinstimmung.
- [Auch ungeschirmte](#) symmetrische Paare können im Triaxialverfahren und anhand der Grenzkurven bewertet werden.
- [Alien Crosstalk](#) Messungen von Type I geschirmten Kabeln halten die Grenzwerte ein; Erwartung „per Design“
- Die gemachten Ergebnisse fließen auch in die Normenarbeit ein, u.a. bei [IEC TC46/WG5](#) und [SC46C/WG7](#)

16