

# EMV von SPE Steckern und Anschlusskabeln

Ralf Damm, Bernhard Mund, bda connectivity GmbH Asslar, Germany

[ralf.damm@bda-c.com](mailto:ralf.damm@bda-c.com), [bernhard.mund@bda-c.com](mailto:bernhard.mund@bda-c.com)

Holger Brosch, Thomas Schmid, Rosenberger Hochfrequenztechnik, Fridolfing, Germany

[holger.brosch@rosenberger.com](mailto:holger.brosch@rosenberger.com), [thomas.schmid@rosenberger.com](mailto:thomas.schmid@rosenberger.com)

## 1 Kurzfassung und Einleitung

Die neue Single Pair Ethernet-Technologie (SPE) auf Basis von Übertragungsstandards nach IEEE 802.3cg wird auf verschiedenen Ebenen implementiert, z.B. in neuen Automobilgenerationen und kann dort CAN- und andere Bussysteme ersetzen. Im industriellen Bereich bietet SPE eine Alternative für vorhandene Feldbussysteme.

Bei SPE-Anwendungen ist allgemein eine hohe elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) gefordert. Dies gilt insbesondere auch für SPE-Stecker und SPE-Anschlusskabel.

Die EMV bzw. Schirmwirkung geschirmter symmetrischer Kabel wird in der IEC 62153-4-9 durch die Kopplungsdämpfung  $a_c$  ab ca. 30 MHz beschrieben. Mit der Erweiterung der IEC 62153-4-9Amd1 zu tiefen Frequenzen hin, kann jetzt auch die "Kopplungsdämpfung bei tiefen Frequenzen" (Low Frequency Coupling Attenuation, LFCA) ab 100 kHz gemessen werden. Dies gilt sinngemäß auch für Stecker und Kabelassemblies für die die IEC 62153-4-7 Anwendung findet. Bei der Durchführung der Messungen werden hohe Anforderungen an die Symmetrie und die Empfindlichkeit des Messaufbaus gestellt.

Der folgende Beitrag beschreibt entsprechende Messverfahren der Kopplungsdämpfung von SPE-Kabeln, -Steckern und -Anschlusskabeln im Bereich von 100 kHz aufwärts. Messergebnisse werden dargestellt und diskutiert.

## 2 Schirmungsparameter

### 2.1 Allgemeines

Die physikalischen Grundlagen zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirm- bzw. Kopplungsdämpfung an Kabeln, Steckern und sonstigen Komponenten mit dem Triaxialverfahren sind in der Literatur ausführlich beschrieben, siehe u.a. [1], [2], [3], [11].

Für koaxiale Kabel, Stecker und Komponenten gilt bei Frequenzen bis ca. 30 MHz der Kopplungswiderstand  $Z_T$  und ab 30 MHz und die Schirmdämpfung  $a_s$  als Maß für die Schirmwirkung.

Bei geschirmten symmetrischen Kabeln, Steckern und Komponenten ist die Kopplungsdämpfung  $a_c$  das Maß für die Schirmeffizienz und ist maßgeblich für die EMV der damit realisierten Systeme verantwortlich. Die Kopplungsdämpfung symmetrischer Paare ist proportional zur Unsymmetriedämpfung des symmetrischen Paares und der Schirmdämpfung des Schirms.

Während bisher nach IEC 62153-4-9 die Kopplungsdämpfung erst ab ca. 30 MHz gemessen werden konnte, kann gemäß der Ergänzung IEC 62153-4-9Amd1 jetzt auch die Kopplungsdämpfung bei tiefen Frequenzen, (im englischen Sprachgebrauch als Low Frequency Coupling Attenuation, LFCA bezeichnet) ab 100 kHz gemessen werden.

## 2.2 Unsymmetriedämpfung

Geschirmte symmetrische Paare können gemäß Bild 1 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 gesamte rücklaufende Strom  $-I$ , ähnlich wie bei einem Koaxialkabel [3], [4], [5].

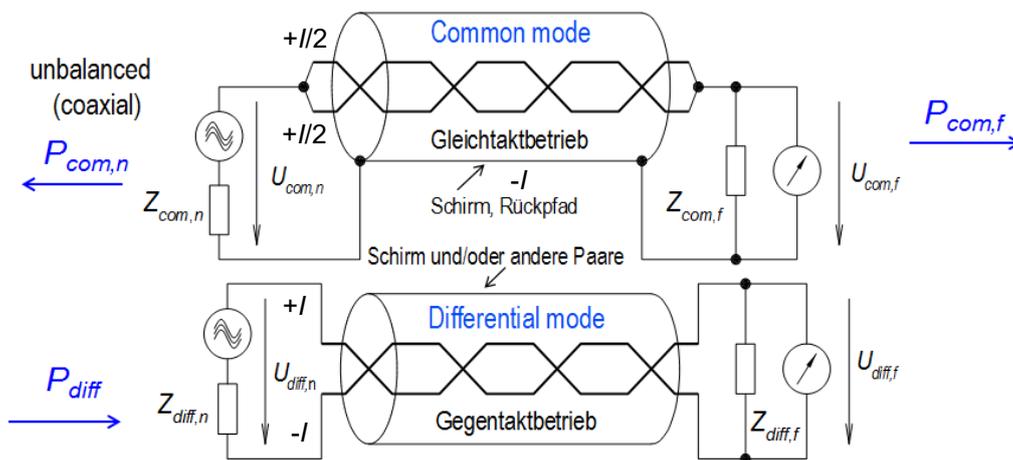
Bei einem idealen Kabel sind beide Betriebsarten voneinander entkoppelt, bei realen Kabeln finden jedoch aufgrund von Kabelunsymmetrien Kopplungen zwischen den beiden Betriebsarten statt.

Die Unsymmetriedämpfung  $a_u$  (die Modenkonversion) eines symmetrischen Kabels beschreibt wie viel Leistung vom Gegentaktsystem in das Gleichtaktsystem überkoppelt (oder umgekehrt). Sie kann als logarithmisches Verhältnis von eingespeister Leistung im Gegentaktbetrieb  $P_d$  zu der in den Gleichtaktbetrieb übergekoppelten Leistung  $P_c$  ausgedrückt werden zu:

$$a_u = 10 \cdot \log(P_d / P_c) \quad (1)$$

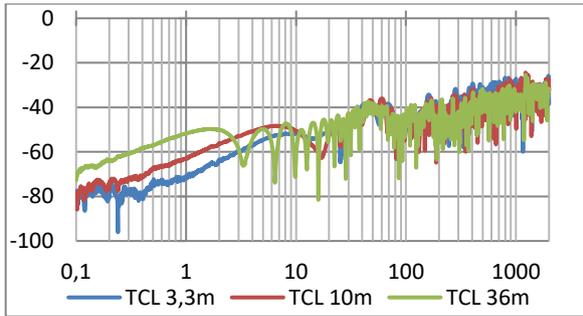
Unterschiedliche Leiterwiderstände, Isolationsdurchmesser, Aderkapazitäten, ungleichmäßige Verseilung und wechselnde Abstände der Innenleiter zum Schirm sind z.B. Ursachen für die Unsymmetrie.

Die Unsymmetriedämpfung kann nach EN 50289-1-9 mit einem Mehrtor-VNA und einem sogenannten "virtuellem Balun" gemessen werden. Dabei ergibt sich die Unsymmetriedämpfung am nahen Ende als Scd11 (TCL) und die Unsymmetriedämpfung am fernen Ende als Scd21 (TCTL).

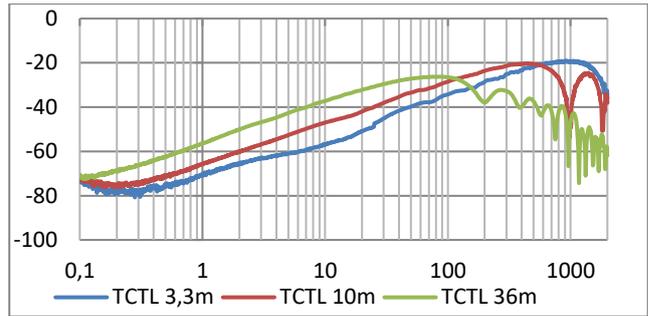


**Bild 1: Gleichtakt- und Gegentaktbetrieb geschirmter symmetrischer Paare**

Für tiefe Frequenzen nimmt die Unsymmetriedämpfung mit der Länge ab, d.h. kürzere Längen haben eine höhere Unsymmetriedämpfung, siehe Bild 2a und 2b. Mit steigender Frequenz und/oder Länge nähert sich die Unsymmetriedämpfung - ähnlich wie die Schirmdämpfung - asymptotisch einem Grenzwert an, siehe Bilder 2a und 2b.



**Bild 2a, Unsymmetriedämpfung eines geschirmten SPE-Kabels am nahen Ende (TCL), verschiedene Längen**



**Bild 2b, Unsymmetriedämpfung eines geschirmten SPE-Kabels am fernen Ende, (TCTL), verschiedene Längen**

## 2.3 Kopplungsdämpfung

Die Kopplungsdämpfung geschirmter symmetrischer Paare beschreibt die gesamte Wirkung gegen elektromagnetische Interferenz (EMI) und berücksichtigt sowohl die Wirkung des Schirms als auch die Modenkonversion bzw. die Unsymmetriedämpfung des Paares. In erster Näherung (und bei niedrigen Frequenzen) kann die Kopplungsdämpfung  $a_c$  eines einzelnen geschirmten symmetrischen Paares als die Summe der Unsymmetriedämpfung am nahen Ende des versilbten Paares und der Schirmwirkung des Schirms betrachtet werden.

Bei mehrpaarigen symmetrischen Kabeln ist der Einfluss der parallel laufenden Paare zu berücksichtigen, da diese als zusätzliche Schirmung wirken, [3].

## 2.4 Kopplungsdämpfung bei tiefen Frequenzen, LFCA

Bisher wurde an koaxialen und an symmetrischen Kabelschirmen und Komponenten bei tiefen Frequenzen bis ca. 30 MHz nur der Kopplungswiderstand gemessen. Allerdings wird dabei der Einfluss der Unsymmetriedämpfung des symmetrischen Paares nicht erfasst.

Die Erweiterung der IEC 62153-4-9Amd1 beschreibt die Messung der Kopplungsdämpfung bei tiefen Frequenzen (LFCA) an symmetrischen Kabeln ab 100 kHz. Der Messaufbau ist der gleiche wie der Aufbau zur Messung der Kopplungsdämpfung bei höheren Frequenzen, [5]. Die Messung der LFCA kann analog auch für SPE-Stecker und SPE-Anschlusskabel erfolgen. Die entsprechende Ergänzung der IEC 62153-4-7 ist bei IEC TC 46/WG5 in Vorbereitung.

# 3 Messen der Kopplungsdämpfung mit dem Triaxialverfahren

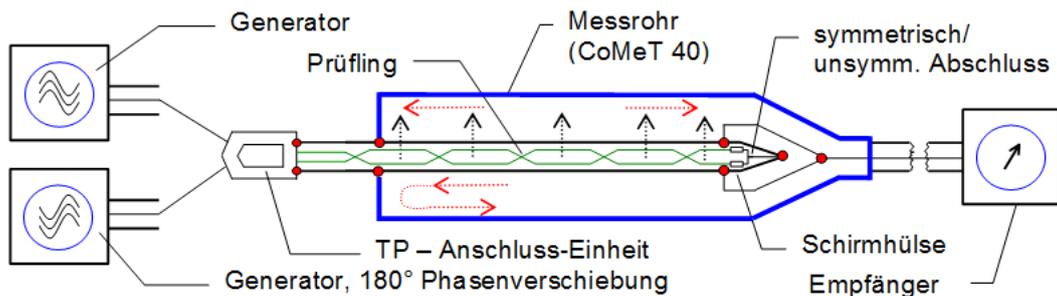
## 3.1 Allgemeines

Die Kopplungsdämpfung geschirmter symmetrischer SPE-Kabel kann nach IEC 62153-4-9 mit dem Triaxialverfahren gemessen werden, siehe Bild 3.

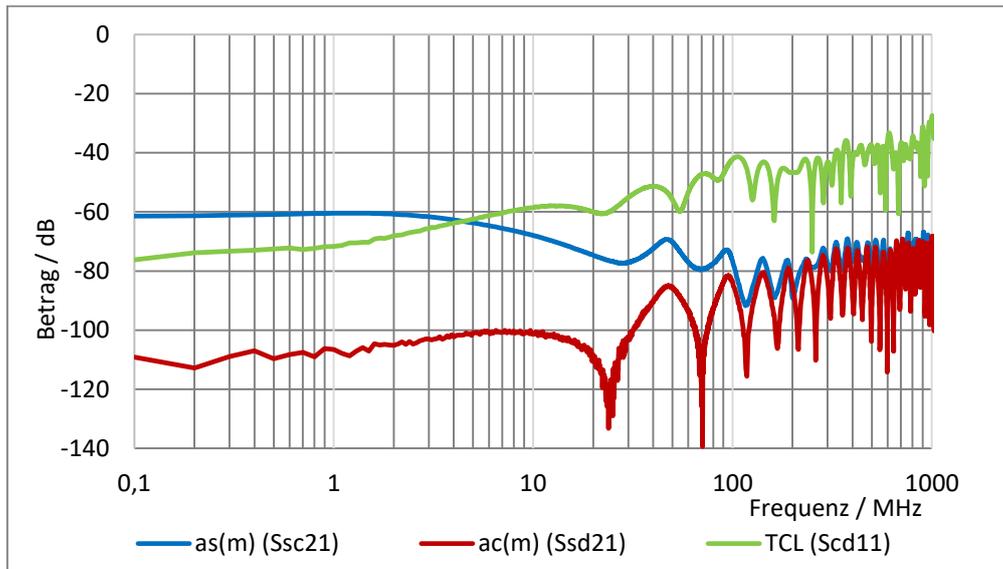
Das zu prüfende symmetrische Kabel bildet mit dem Messrohr ein Drei-Leiter-System bestehend aus dem symmetrischen Paar, dem Kabelschirm und dem Messrohr.

Das symmetrische Paar des zu prüfenden Kabels wird über zwei um 180° phasenverschobene Generatoren mit einem differentiellen 100  $\Omega$  Signal gespeist. Energie koppelt zunächst aus dem Gegentaktkreis (differential mode) in den Gleichtaktkreis (common mode) und dann aus dem Gleichtaktkreis in das Messrohr (den Außenkreis). Durch den Kurzschluss am sendernahen Ende läuft die gesamte in den Außenkreis gekoppelte Energie zum Empfänger, [5].

Messergebnisse eines symmetrischen SPE-Kabels sind in Bild 4 dargestellt.



**Bild 3: Messen der Kopplungsdämpfung eines geschirmten symmetrischen SPE-Kabels mit Mehrtor VNA bzw. mit virtuellem Balun nach IEC 62153-4-9**



**Bild 4: Unsymmetriedämpfung  $a_U$  (Scd11, TCL), Schirmdämpfung  $a_S(m)$  (Ssc21) und Kopplungsdämpfung  $a_C(m)$  CA/LFCA (Ssd21) eines SPE-Kabels 3 m, Rohwerte**

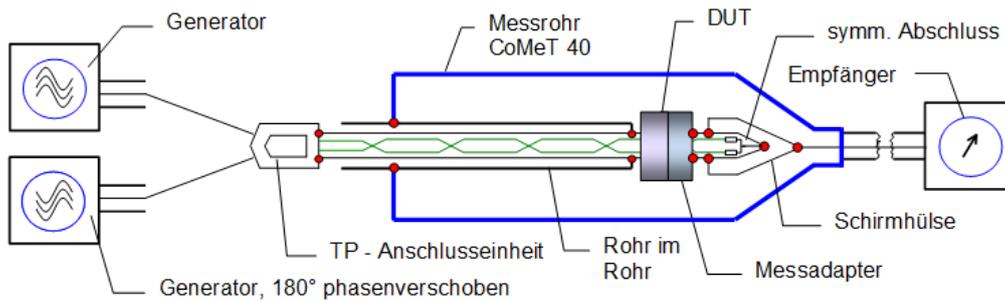
Die Messergebnisse symmetrischer Kabel verändern sich bei tiefen Frequenzen in Abhängigkeit der Messlänge. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wird in den IEC-Normen für SPE-Kabel eine Messlänge von 3 m gefordert [5].

### 3.2 Kopplungsdämpfung von SPE-Steckern

Die Norm IEC 62153-4-7Ed3 beschreibt in Anlehnung an IEC 62153-4-9 verschiedene Verfahren zur Messung der Kopplungsdämpfung von Steckern und konfektionierten Kabeln.

In Bild 5 ist der prinzipielle Messaufbau zur Messung der Kopplungsdämpfung eines geschirmten symmetrischen Steckers mit dem Rohr-in-Rohr Verfahren dargestellt. Dabei wird ein HF-dichtes Rohr in das Messrohr geschoben. Das innere Rohr bildet mit dem äußeren Rohr ein 50-Ω-System.

Das geschirmte symmetrische Anschlusskabel befindet sich im inneren Rohr. Aus mechanischen Gründen befindet sich der Kontakt zwischen dem Schirm des Anschlusskabels und dem inneren Rohr ca. 3 cm vor dem zu prüfenden Stecker. Damit wird sowohl der zu prüfende Stecker als auch Qualität der Verbindung des Steckers an das Anschlusskabel gemessen. Der gewählte Abstand zwischen Rohr-in-Rohr und Prüfobjekt sollte für Vergleichsmessungen im Prüfbericht dokumentiert werden.

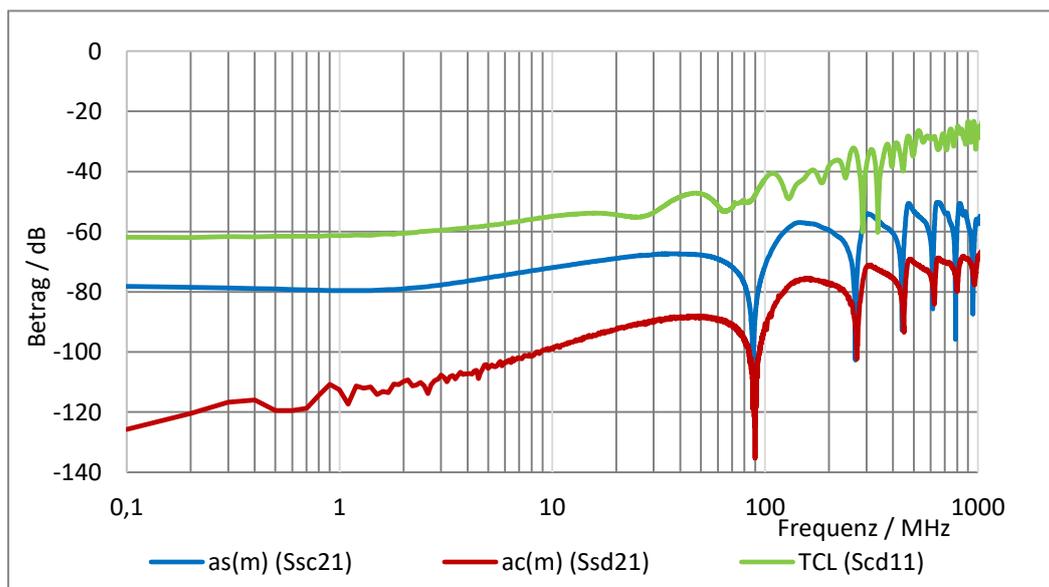


**Bild 5: Messen der Kopplungsämpfung eines symmetrischen Steckers mit Rohr-in-Rohr nach IEC 62153-4-7**

Um einen definierten Beitrag der Modenkonversion der Speiseleitung zu erreichen, wird analog zu den entsprechenden Kabelnormen eine Messlänge von 3 m vorgeschlagen. Die Transmissionsämpfung des Speisekabels wird nach IEC 62153-4-7Ed3 nicht berücksichtigt. Bild 6 zeigt ein zur Messung vorbereitetes SPE-Steckerpaar mit der für die Messung benötigten Terminierung und den Kabelschirmklemmvorrichtungen nebst CoMeT40 Messkopf.

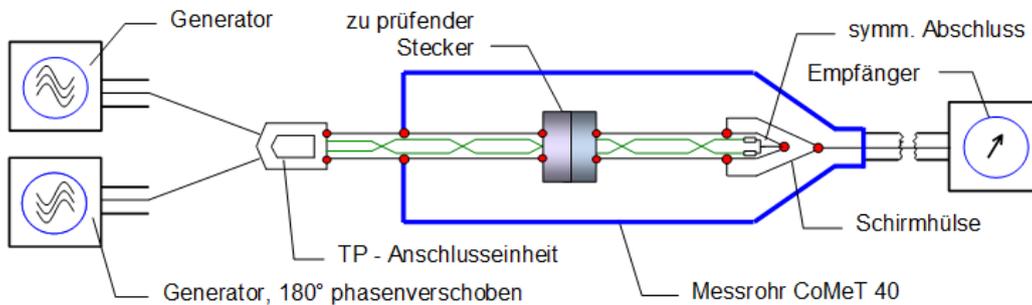


**Bild 6: Anschluss am Messkopf mit Rohr-in-Rohr und Messadapter aus paarigem Stecker**

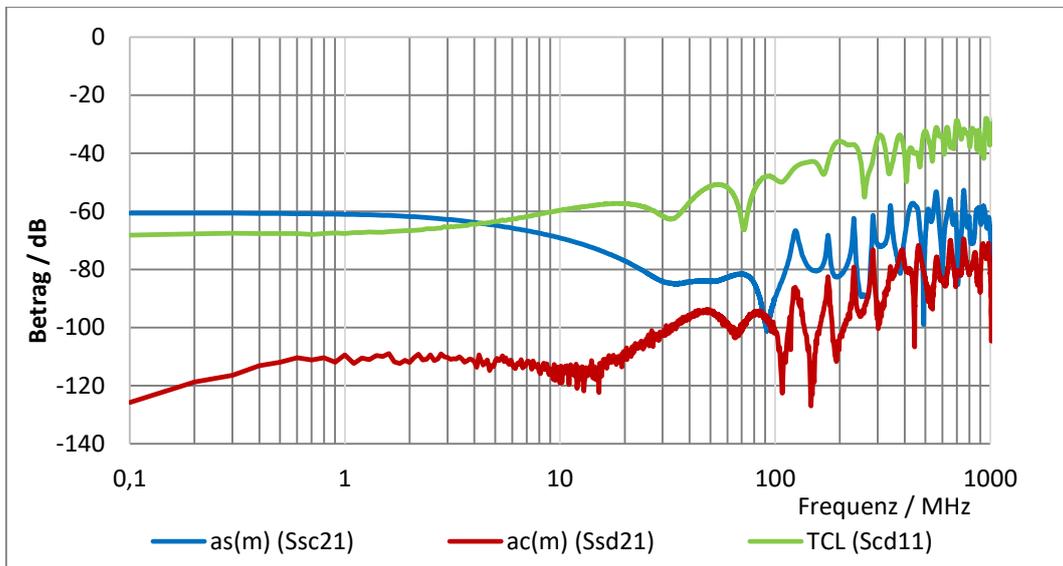


**Bild 7: Unsymmetriedämpfung  $a_U$  (Scd11, TCL), Schirmdämpfung  $a_S(m)$  (Ssc21) und Kopplungsämpfung  $a_C(m)$  CA/LFCA (Ssd21) eines SPE-Steckers mit 3 m Rohr-in-Rohr nach Bild 5, Rohrwerte**

Eine weitere Möglichkeit zur Messung einer paarigen Steckeranordnung ist in Bild 8 dargestellt. Hierbei befindet sich das Steckerpaar in der Mitte des Messrohres. Im Unterschied zum Messaufbau nach Bild 5 wird der Beitrag der Speise- und Terminierungsleitungen nicht durch Rohr-in-Rohr-Anwendung eliminiert, sondern der Verkopplung durch die Steckverbinder überlagert. Diese Anordnung ermöglicht die Messung von langen SPE-Kabelassemblies (>3m), wobei diese in der Mitte getrennt und an den Enden gesteckt werden.



**Bild 8: Messen der Kopplungsdämpfung  $a_c$  (Scd21), eines SPE-Steckerpaars in der Rohrmittle**

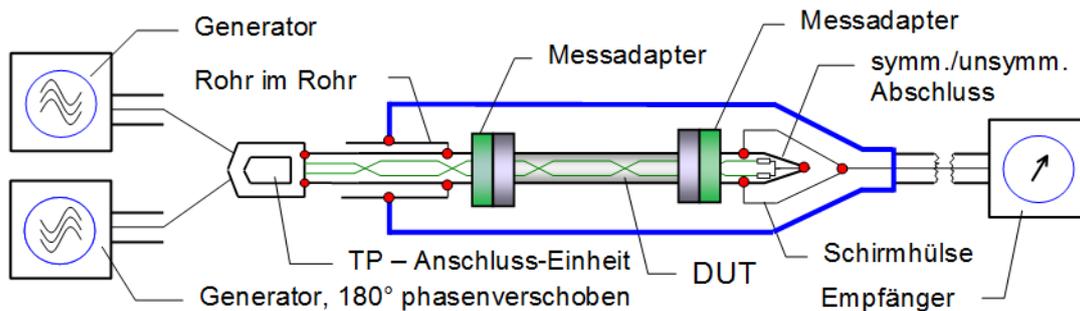


**Bild 9: Kopplungsdämpfung  $a_c(m)$  (Scd21), Schirmdämpfung  $a_s(m)$  (Scc21) und Unsymmetrie-dämpfung  $a_u$  (Scd11) eines SPE-Steckerpaars in der Rohrmittle, 3 m, Rohrwerte**

### 3.3 Kopplungsdämpfung von konfektionierten Kabeln

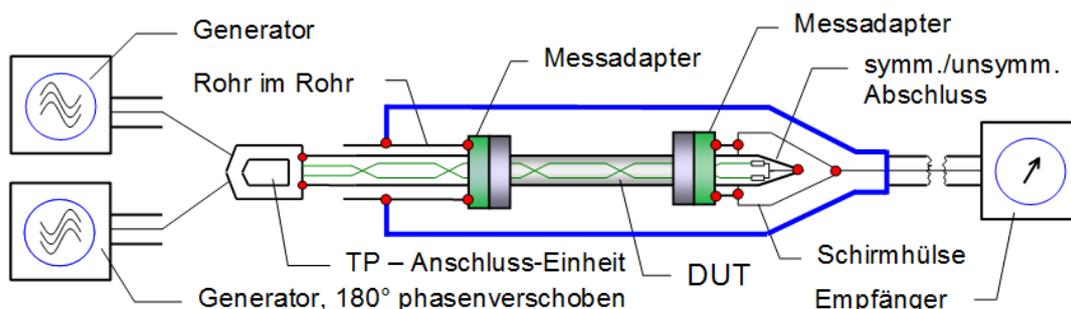
Sind SPE-Kabelassemblies kürzer als 3m, können Messungen zerstörungsfrei in der Messanordnung nach Bild 10a durchgeführt werden. Hierbei ist die Adaptierung mit Hilfe von konfektionierten Kabelenden realisiert, wobei die Schirmanbindung zum Rohr-in-Rohr und zur Schirmhülse im Bereich des Kabelschirmes stattfindet.

Bild 11 zeigt die zugehörigen Messergebnisse von 3 je 2 m langen SPE-Kabelassemblies. Im Diagramm dargestellt sind wieder die Rohwerte der Schirmdämpfung und der Kopplungsdämpfung sowie die Modenkonzersion am nahen Ende (TCL). Die festgestellten Exemplarstreuungen zeigen auf der dB-Skala den größten Ausschlag bei der Kopplungsdämpfung, wobei zu beachten gilt, dass es sich hier um eine logarithmische Darstellung handelt und sich die linearen Beträge der Streuungen ähnlich sind.

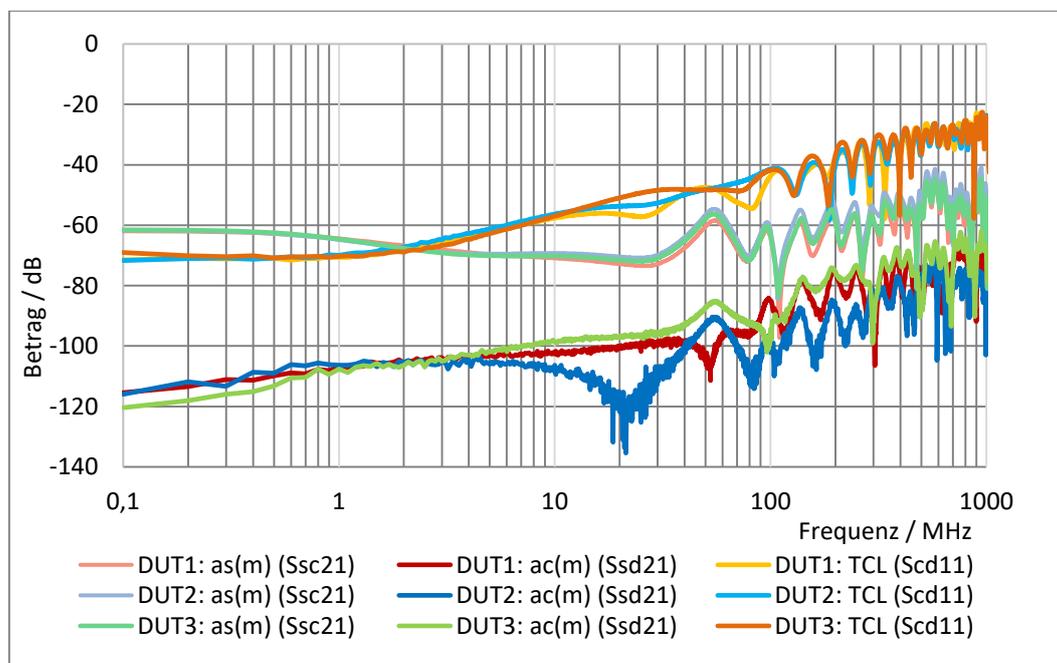


**Bild 10a: Messen der Kopplungsdämpfung  $a_c$  eines symmetrischen Assemblies mit Rohr-in-Rohr Verfahren nach IEC 62153-4-7, Adaptierung mit konfektionierten Kabelenden**

Idealerweise wird diese Messung in einer Anordnung nach Bild 10b mit geeigneten Messadaptern durchgeführt, wobei die Schirmanbindung der Adapteraußenleiter direkt zum Rohr-in-Rohr und zur Schirmhülle stattfindet. Diese Maßnahme reduziert ungewollte Einkopplungen und damit Messfehler.



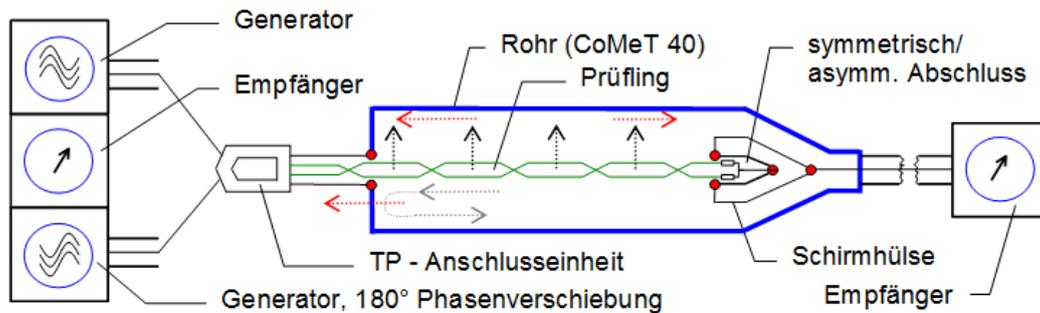
**Bild 10b: Messen der Kopplungsdämpfung  $a_c$  eines symmetrischen Assemblies mit Rohr-in-Rohr Verfahren nach IEC 62153-4-7 mit Messadapter**



**Bild 11: Kopplungsdämpfung  $a_c(m)$  (Ssd21), Schirmdämpfung  $a_s(m)$  (Scc21) und Unsymmetriedämpfung  $a_u$  (Scd11) von drei SPE-Assemblies nach Bild 10a, Rohrwerte**

### 3.4 Ungeschirmte symmetrische Kabel und Stecker

Bei ungeschirmten symmetrischen Paaren besteht das innere System aus dem ungeschirmten Prüfobjekt das im differentiellen Modus gespeist wird. Das äußere System wird von dem Messrohr und dem Gleichtaktbetrieb des Prüfobjektes (common mode) gebildet. Da es beim ungeschirmten Paar keinen Schirm gibt, entfällt der Kurzschluss am nahen Ende. Die Welle zum nahen Ende hin wird nicht reflektiert und läuft zurück zu den Generatoren. Daher können Kopplungsmessungen ungeschirmter Kabel an beiden Enden durchgeführt werden.



**Bild 12: Messen der Kopplungsdämpfung ungeschirmter symmetrischer Kabel**

Die Welle die in Bild 12 zum nahen Ende hin läuft, kann als S-Parameter  $S_{cd11}$  gemessen werden; sie kann als Kopplungsdämpfung am nahen Ende betrachtet werden. Der Parameter  $S_{cd11}$  ist im Bereich der Kabelnormung auch als Unsymmetriedämpfung am nahen Ende (TCL) des ungeschirmten Kabels definiert ist, [3], [4], [5].

Die Messung ungeschirmter SPE-Stecker und Assemblies kann in gleicher Weise erfolgen.

### 4 Abschlusswiderstände

Das innere System der Messanordnung ist bei der Prüfung in geeigneter Weise abzuschließen, Ziel ist hierbei sowohl die Vermeidung von Stehwellen als auch die Vermeidung einer zusätzlichen, durch Unsymmetrie erzeugten Modenkonversion. Nach Bild 13a ist der Gegentaktbetrieb mit  $100 \Omega$  und der Gleichtaktbetrieb mit  $25 \Omega$  abgeschlossen

Während die Unsymmetrie der Abschlusswiderstände bei hohen Frequenzen im Vergleich zu der typischen Unsymmetrie der Prüfobjekte vernachlässigbar ist, kann die Unsymmetrie der Abschlusswiderstände bei tiefen Frequenzen Werte erreichen, die die Unsymmetrie der Prüflinge übersteigt und die Messergebnisse verfälscht.

Nach IEC 60512-28-100 sind für die Messung der Kopplungsdämpfung symmetrischer Stecker Abschlusswiderstände von  $50 \Omega$  mit einer Toleranz von  $\pm 0,1\%$  gefordert. Damit ergibt sich im ungünstigsten Fall eine Widerstandsunsymmetrie von 66 dB, siehe Bild 13b.

	$R_1$	$R_2$	$R_2 - R_1$	Unsymmetrie $S_{cd11}$
	50	50,1	0,1	-66,0
	50	50,08	0,08	-68,0
	50	50,06	0,06	-70,5
	50	50,04	0,04	-74,0
	50	50,02	0,02	-80,0
	50	50,01	0,01	-86,0
	<b>Bild 13a: Abschluss nach IEC 60512-28-100</b>	<b>Bild 13b: Modenkonversion durch Widerstands-toleranz</b>		

Die Widerstandsunsymmetrie  $a_{u,r}$  ergibt sich zu:

$$a_{u,r} = 20 \cdot \log \frac{\Delta R}{4 \cdot \sqrt{Z_{\text{diff}} \cdot Z_{\text{com}}}} \quad (2)$$

mit:

$\Delta R$  Widerstandsabweichung zwischen den beiden Widerständen in  $\Omega$

$Z_{\text{diff}}$  Wellenwiderstand des Gegentaktbetriebes

$Z_{\text{com}}$  Wellenwiderstand des Gleichtaktbetriebes

Die Widerstandsunsymmetrie von Widerständen mit einer Toleranz von 0,1 % liegt im Bereich der Systemunsymmetrie des gesamten Mess-Systems. Eine Widerstandstoleranz von 0,1 % wird daher als ausreichend betrachtet.

## 5 Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit

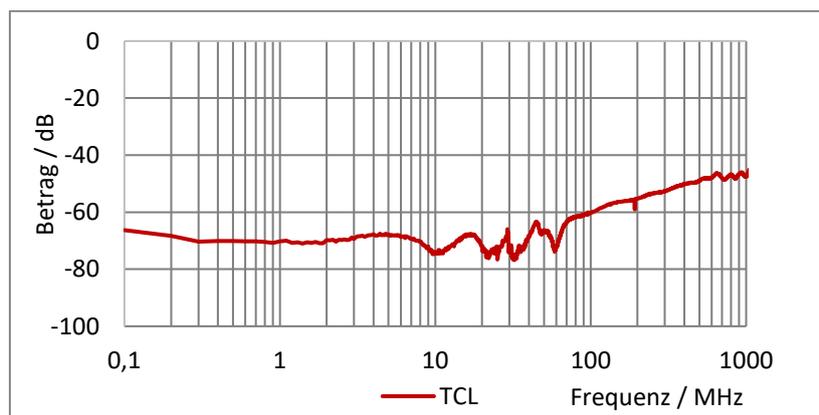
Geschirmte symmetrische Kabel sind instabile Gebilde. Sie können Ihre Eigenschaften durch Zug-, Druck- und Biegebelastung verändern. Bei mehrfachem Einbau desselben Prüflings mit Stecker bzw. desselben Assemblies wurden abweichende Messergebnisse erzielt.

Diese Abweichungen sind Gegenstand weiterer Untersuchungen u.a. bei IEC TC 46/WG5.

## 6 Kalibrierung und System-Verifikation

Bei Messungen von Unsymmetrie und Kopplungsdämpfung mit Viertor-VNAs ist es obligatorisch, den Analysator zu kalibrieren. Dies kann mit einem elektronischen e-cal-kit oder von Hand durchgeführt werden. Die gewählte Kalibrierebene befindet sich dabei am Ende der Messkabel. Zur Messung der Kopplungsdämpfung sind ferner phasenstabile Kabel zu verwenden.

Selbst optimal kalibrierte und phasenstabilisierte Messgeräte (VNA, Messleitungen und Anschlusseinheiten) zeigen einen bestimmten frequenzabhängigen Verlauf bei einer Systemmodenumwandlung. Dieser Wert liegt bei niedrigen Frequenzen zwischen -80 und -70 dB und steigt mit ansteigenden Frequenzen auf etwa -60 bis -40 dB an. Je nach Phasenlage überlagert sich diese Systemmodenumwandlung der Modenumwandlung des Prüflings konstruktiv oder destruktiv.



**Bild 14: Systemverifikation durch Messung des TCL am offenen TP-Anlegefeld**

Das Ergebnis der Messung wird dadurch verfälscht und insbesondere dann sehr stark, wenn der Betrag der Modenumwandlung des Testobjekts sich dem Betrag der Systemmodenumwandlung nähert oder sogar unterschreitet.

Alle Messungen der Kopplungsdämpfung bei tiefen Frequenzen können Opfer solcher Überlagerungen sein. Die Systemwerte sollten daher aufgezeichnet und in die Analyse der Messunsicherheiten einbezogen werden. Eine Schätzung der Systemmodenumwandlung kann z.B. durch Aufzeichnen des reflektierten Modenumwandlungsparameters  $S_{cd11}$  eines TP-Anlegfeldes mit einer offenen Schleife erfolgen, siehe Bild 14.

Eine Reduzierung des Systemrauschen kann insbesondere bei der Messung der Kopplungsdämpfung erforderlich sein. Dies wird durch Anwendung einer möglichst hohen Messsignalleistung und einer niedrigen Messbandbreite erzielt. Ergänzend dazu kann bei verschiedenen Mehrtr-VNAs der AGC mode (Automatic Gain Control) eingestellt werden. Dies sollte aber erst nach der Kalibration des VNAs erfolgen.

## 7 Darstellung der Messergebnisse

Gemäß IEC 62153-4-7Ed3 und IEC 62153-4-9Ed2 Gleichung (15) sind die Messergebnisse der Kopplungsdämpfung aus dem gemessenen Spannungsverhältnis  $U_{diff}/U_{2,max}$  zu berechnen. Um die Kopplungsdämpfung  $a_c$  mit Messungen mit Absorberzangen zu vergleichen, wurde in den Normen ein willkürlich eingesetzter normalisierter Wert  $Z_s = 150 \Omega$  eingeführt.

Damit ergibt sich die Kopplungsdämpfung  $a_c$  zu:

$$a_c = 20 \log_{10} \left| \frac{U_{diff}}{U_{2,max}} \right| + 10 \log_{10} \left[ \frac{2Z_s}{Z_{diff}} \right] \quad (15)$$

Dabei ist:

- $U_{diff}$  Eingangsspannung am Prüfobjekt in V
- $U_{2,max}$  maximale Spannung am Ausgang des Messrohres in V
- $Z_{diff}$  Wellenwiderstand des symmetrischen Prüfobjektes in  $\Omega$
- $Z_s$  willkürlich eingesetzter normalisierter Wert  $Z_s = 150 \Omega$

Mit  $Z_s = 150 \Omega$  und  $Z_{diff} = 100 \Omega$  ergibt sich ein Korrekturwert  $10 \log_{10} \left| \frac{2Z_s}{Z_{diff}} \right|$  von 4,8 dB.

Durch die unterschiedlichen Wellenwiderstände  $Z_{diff}$  des symmetrischen Prüfobjektes von  $100 \Omega$  und des Eingangswiderstandes des Netzwerkanalysators  $Z_0$  von  $50 \Omega$  entspricht das gemessene Spannungsverhältnis  $U_{diff}/U_{2,max}$  nicht dem S-Parameter  $S_{sd21}$ .

Da der Term  $U_{diff}/U_{2,max}$  bei der Berechnung der Kopplungsdämpfung nach IEC 62153-4-9Ed2 häufig als S-Parameter  $S_{sd21}$  interpretiert wird, wird von IEC TC 46/WG5 folgende neue Darstellung der Messergebnisse vorgeschlagen:

$$a_c = -20 \log_{10} |S_{sd21}| + 10 \log_{10} \left| \frac{Z_{diff}}{Z_0} \right| + 10 \log_{10} \left| \frac{2Z_s}{Z_{diff}} \right|$$

$$a_c = -20 \log_{10} |S_{sd21}| + 10 \log_{10} \left| \frac{2Z_s}{Z_0} \right|$$

Mit  $Z_s = 150 \Omega$  und  $Z_0 = 50 \Omega$  ergibt sich ein Korrekturwert  $10 \log_{10} \left| \frac{2Z_s}{Z_0} \right|$  von 7,8 dB.

Ob eine solche Korrektur auch für die Kopplungsdämpfung bei tiefen Frequenzen sinnvoll ist, ist Gegenstand weiterer Diskussionen.

Die in diesem Bericht dargestellten Messwerte der Schirmdämpfung  $a_s(m)$  und der Kopplungsdämpfung  $a_c(m)$  sind daher Rohwerte, d.h. ohne Umrechnung auf einen normalisierten Wert von  $Z_s = 150 \Omega$ .

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kopplungsdämpfung von symmetrischen Steckern und Assemblies kann nach IEC 62153-4-7 mit dem Rohr-in-Rohr Verfahren gemessen werden. In Anlehnung an die Ergänzung der IEC 62153-4-9Amd1 kann jetzt auch die Kopplungsdämpfung LFCA von Steckern und Assemblies bei tiefen Frequenzen ab 100 kHz gemessen werden.

Um einen definierten Beitrag der Unsymmetriedämpfung bzw. der Modenkonversion des Speisekabels zu erreichen, wird bei der Messung von Steckern, analog zur Messung symmetrischer Kabel eine Messlänge von 3 m vorgeschlagen. Damit ist gleichzeitig die Vergleichbarkeit der Messungen verschiedener Labore gewährleistet.

Abhängig von der niedrigsten zu messenden Frequenz werden hohe Anforderungen an die Symmetrie der Abschlusswiderstände gestellt. Eine Widerstandstoleranz von 0,1 % wird als ausreichend betrachtet.

Die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse nach wiederholtem Einbau sind Gegenstand weiterer Untersuchungen, u.a. bei IEC TC 46/WG5. Die Position des zu prüfenden Steckers im Messrohr (mittig, nah am Messkopf oder nah am Kurzschluss) sowie die erforderliche Messlänge beim Rohr-in-Rohr Verfahren ist ebenfalls Gegenstand weiterer Untersuchungen, u.a. bei IEC TC 46/WG5.

Die Korrektur der Transmissionsdämpfung des Speisekabels nach IEC 62153-4-7Ed3 in den jeweiligen Messaufbauten ist mit IEC TC 46/WG5 zu diskutieren.

Die vollständige Überarbeitung der IEC 62153-4-7 ist bei IEC TC 46/WG5 in Vorbereitung.

## 9 Literatur

- [1] Thomas Hähner, Bernhard Mund: Test methods for screening and balance of communications cables; Proceedings of EMC Zurich, 1999, pp. 533-538
- [2] Bernhard Mund, EMV von Kabeln, Steckern und HV-Komponenten mit dem Triaxialverfahren, 7. Anwenderkongress Steckverbinder, Vogel Verlag Würzburg, 18./19. Juni 2013
- [3] T. Hähner, B. Mund, & T. Schmid, History and recent trends of Triaxial test procedure, Proceedings of the 67th IWCS Conference, Providence, RI, US, October 2018
- [4] Bernhard Mund & Thomas Schmid: Schirmwirkung ungeschirmter symmetrischer Paare, 13. Anwenderkongress Steckverbinder, Vogel Verlag Würzburg, 01. - 03. Juli 2019
- [5] T. Hähner, C. Pfeiler, B. Mund & T. Schmid: EMV – Parameter von einpaarigen Ethernet Kabeln, 28. ITG-Fachtagung Kommunikationskabelnetze - 14./15.12. 2021 in Köln

## 10 Normen

- [11] IEC TR 62153-4-1 – Introduction to electromagnetic (EMC) screening measurements
- [12] IEC 62153-4-7Ed3 – Test method for measuring of transfer impedance  $Z_T$  and screening attenuation  $a_s$  or coupling attenuation  $a_c$  of connectors and assemblies up to and above 3 GHz - Triaxial tube in tube method
- [13] IEC 62153-4-9Ed2 – Coupling attenuation of screened balanced cables, triaxial method
- [14] EN 50289-1-9 – Elektrische Prüfverfahren – Unsymmetriedämpfung