

Schirmwirkung von symmetrischen Datenkabeln bis 2 GHz

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

1 Zusammenfassung und Einleitung

Mit der geplanten Einführung digitaler Datenübertragung mit 40 Gbps für Anwendungen in Rechenzentren erweitert sich der Frequenzbereich, in dem symmetrische Datenkabel für strukturierte Verkabelung betrieben werden beträchtlich. Die neuen Normen IEC 61156-9 und IEC 61156-10 Kabel für Etagenverkabelung bzw. Geräteanschlusskabel mit Übertragungseigenschaften bis 2 GHz beschreiben die Anforderungen an solche Datenkabel bis 1,6 bzw. bis 2 GHz.

Die Schirmwirkung dieser Kabel wird unter anderem durch die Kopplungsdämpfung als Überlagerung von Schirmdämpfung und Unsymmetriedämpfung beschrieben.

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 um 180° in der Phase verschobene Generatoren erzeugt werden. Eine weitere Alternative ist die Messung mit einem Mischmoden- bzw. Mixed-mode VNA (virtueller Balun).

Im folgenden Bericht werden die verschiedenen Möglichkeiten zur Messung der Kopplungsdämpfung geschirmter symmetrischer Kabel diskutiert. Dazu wurde ein TP-Anlegefeld zum Anschluss des VNA mit guten HF-Eigenschaften bis 2 GHz sowie eine Platine für den symmetrisch/unsymmetrischen Abschluss für geschirmte symmetrische Paare entwickelt.

Innerhalb der gegebenen Randbedingungen zeigen Messungen mit dem Triaxialverfahren mit Standardrohr und mit offenem Rohr sowie Messungen mit Absorberzangen gute Übereinstimmung.

2 Schirmungsparameter

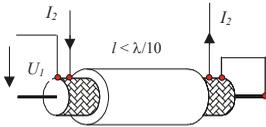
2.1 Allgemeines

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. Im Fall, dass zur Signalübertragung symmetrische Leiterpaare verwendet werden, trägt auch deren Symmetrie zusätzlich zum Schirm zur gesamten Schirmwirkung der Konstruktion bei.

Die 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 Schirms auf der gestörten Seite zu dem Störstrom I_2 auf der anderen Seite des Schirms. Die Dimension des Kopplungswiderstandes ist Milliohm pro Meter. Er ist nach der Definition an elektrisch kurzen Prüflingen messbar.



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

Bild 1: Definition des Kopplungswiderstandes

2.3 Schirmdämpfung

Die Schirmdämpfung a_S ist ein Maß für die Güte des Schirms und anwendbar für elektrisch lange Prüflinge. Sie ist das logarithmische Verhältnis von eingespeister Leistung P_1 zu abgestrahlter maximaler Leistung $P_{r,max}$ bzw. $P_{2,max}$. Mit dem zur Normalisierungs-Wert $Z_S = 150$ Ohm ergibt sich:

$$a_S = 10 \cdot \lg \left| \frac{P_1}{P_{r,max}} \right| = 10 \cdot \lg \left| \frac{P_1}{P_{2,max}} \cdot \frac{2 \cdot Z_S}{R} \right| \text{ dB}, \quad a_S = 20 \cdot \lg \left| \frac{U_1}{U_{2,max}} \right| + 10 \cdot \lg \left[\frac{2 \cdot Z_S}{Z_1} \right] \text{ dB}, \quad (2a,b)$$

Einzelheiten zur Messung der Schirmdämpfung sowie die Definition der Variablen sind in IEC 62153-4-1 und in IEC 62153-4-4 beschrieben.

Mit dem Normalisierungs-Wert für den Außenraum Z_S von 150 Ohm ergibt sich die Schirmdämpfung für geschirmte symmetrische Paare (common mode) zu:

$$a_S = 10 \cdot \lg \left| \frac{P_{com}}{P_{r,max}} \right| \text{ dB}, \quad a_S = 20 \cdot \lg \left| \frac{U_{com}}{U_{2,max}} \right| + 10 \cdot \lg \left[\frac{2 \cdot Z_S}{Z_{com}} \right] \text{ dB}, \quad (3a,b)$$

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, ähnlich wie bei einem Koaxialkabel.

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 Gegenteilssystem in das Gleichtaktssystem überkoppelt, (oder umgekehrt).

$$a_U = 10 \cdot \lg \left| \frac{P_{diff}}{P_{com}} \right| \text{ dB}, \quad = 20 \cdot \lg \left| \frac{U_{diff}}{U_{com}} \right| + 10 \cdot \lg \left[\frac{Z_{com}}{Z_{diff}} \right] \text{ dB}, \quad (4a,b)$$

Sie ist das logarithmische Verhältnis von eingespeister Leistung im Gegentaktbetrieb P_{diff} zu der in den Gleichtaktbetrieb übergekoppelten Leistung P_{com} .

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, [EN 50289-1-9].

2.5 Kopplungsdämpfung

Die Kopplungsdämpfung a_c beschreibt die gesamte Effektivität gegen elektromagnetische Beeinflussung (EMB) und berücksichtigt sowohl die Wirkung des Schirms als auch die Symmetrie des Paares. In erster Näherung kann die Kopplungsdämpfung als Summe aus der Unsymmetrie des Paares und der Schirmdämpfung des Schirmes betrachtet werden. [IEC 62153-4-9]

$$a_c = a_u + a_s \quad (5)$$

Da für die Schirmdämpfung nach IEC 62153-4-4 nur die Einhüllende bzw. der max-Wert genommen wird, muss Gleichung (5) $a_c = a_u + a_{s,\text{max}}$ lauten und gilt so auch nur für den unteren Frequenzbereich, (bis ca. 500 MHz).

3 Messung der Kopplungsdämpfung

Die Messung der Kopplungsdämpfung von symmetrischen Leitungen erfolgt entweder mit Absorberzangen (Bild 2) oder mit einem triaxialen Messaufbau (Bild 3 und 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. Dagegen sind beim triaxialen Aufbau Umgebungseinflüsse durch den geschlossenen Aufbau ausgeschlossen.

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. Das Triaxialverfahren zur Messung der Kopplungsdämpfung wird daher gegenüber dem Zangenverfahren bevorzugt.

Zur Messung der Kopplungsdämpfung wird ein differentielles Signal benötigt. Dies kann z. B. mit einem Symmetrieübertrager (Balun) erzeugt werden, (siehe Bild 2). 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, (True-mode-VNA).

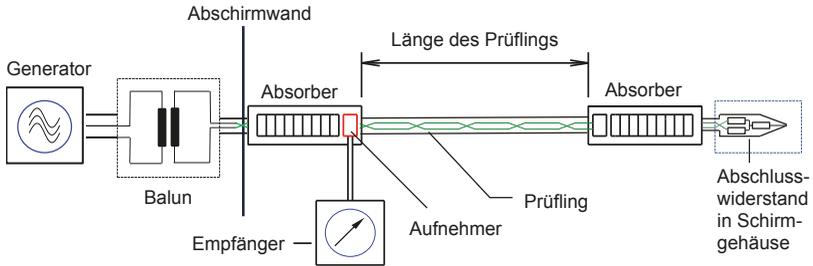


Bild 2: Messung der Kopplungsdämpfung nach IEC 62153-4-5 mit Balun und Zweitor-VNA

Eine weitere Alternative ist die Messung mit einem "Mixed-mode" -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 Übertragungseigenschaften symmetrischer Paare wird damit nicht mehr vom Symmetrieübertrager sondern allein durch den VNA und die Anschlusstechnik begrenzt. Messungen mit Mixed-mode-VNA sind in [5] ausführlich beschrieben.

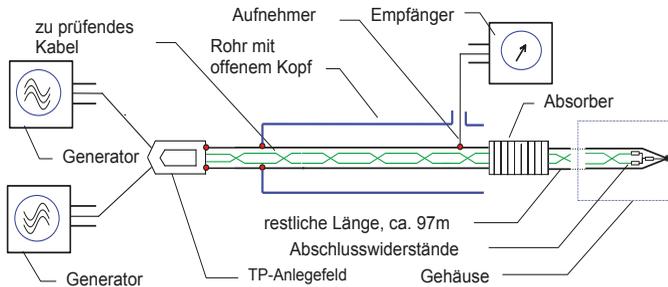


Bild 3: Messen der Kopplungsdämpfung nach IEC 62153-4-9 mit offenem Messkopf und Multiport- bzw. Mixed-mode-VNA

Als Alternative zum Verfahren mit offenem Messrohr bzw. offenem Messkopf nach IEC 62153-4-9 (Bild 3) bietet sich das Verfahren mit Standardmessrohr bzw. mit Standard-Messkopf in Anlehnung an IEC 62153-4-4 an, (Bild 4). Grundsätzlich zeigt das Verfahren mit dem offenen Messkopf gute Vergleichbarkeit zum Verfahren mit dem Standard-Messkopf.

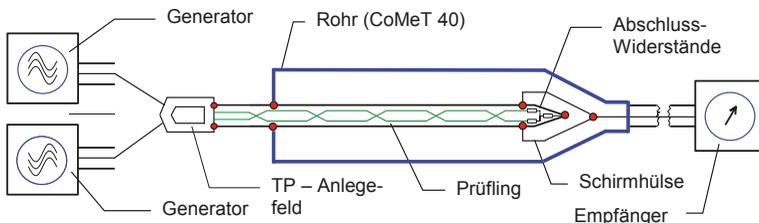


Bild 4: Messen der Kopplungsdämpfung mit Standard-Messkopf und Mixed-mode-VNA

Bild 5 zeigt den Vergleich der Schirmdämpfung an einem RG 214 mit offenem Messkopf und mit Standardkopf gemessen. Dabei ist wie üblich von den ermittelten Maximalwerten auszugehen. Korrigiert man die Messung mit offenem Kopf mit der gemessenen Dämpfung a_{tube} im äußeren System (siehe Bild 12), ergeben sich nahezu identische Werte.

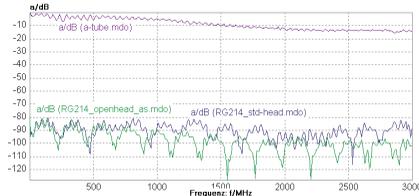


Bild 5: Schirmdämpfung eines RG 214 mit Standard- und mit offenem Messkopf

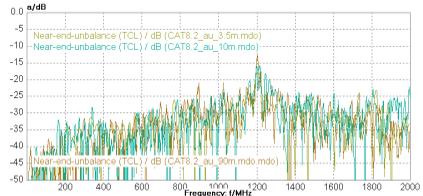


Bild 6: Unsymmetriedämpfung Cat 8.2 an verschiedenen Längen

Wegen der einfacheren Handhabung soll das Verfahren mit Standardkopf dem Verfahren mit offenem Kopf gegenübergestellt werden. Dazu wurde zunächst das Verhalten der Unsymmetriedämpfung bei verschiedenen Längen untersucht. Es wurden nur geringfügige Unterschiede bei 3m, 10m und 100m gemessen, (Bild 6).

Zum Abschluss des Prüflings in der Hülse des Standardverfahrens (Gleichtakt und Gegentakt) wurde eine entsprechende Platine (PCB) entwickelt, siehe Bild 7a. Zur Verbindung des Prüflings mit dem Mixed-Mode-VNA wurde ein Twisted-Pair-Anlegefeld (TP-Anlegefeld) mit geeigneten Übertragungseigenschaften entwickelt, (Bild 7b & Tabelle 1).

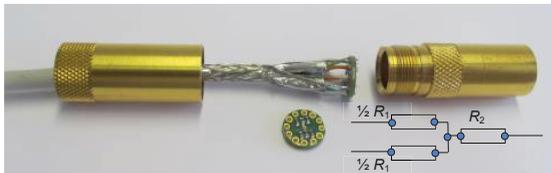


Bild 7a: Abschluss der geschirmten Paare mit PCB



Bild 7b: TP-Anlegefeld

Die Werte der Rückflussdämpfung mit dieser Platine im Gleichtakt und im Gegentaktbetrieb sind in Bild 8 dargestellt. Während bei tiefen Frequenzen schlechtere Werte bei kurzen Längen gemessen wurden, nähern sich die Werte zu hohen Frequenzen hin einem Grenzwert an.

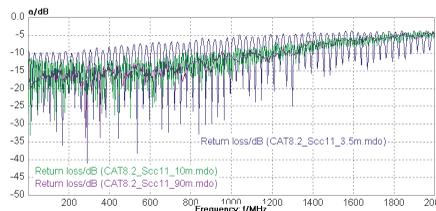


Bild 8a - Gleichtaktbetrieb

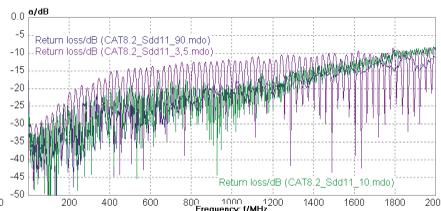


Bild 8b - Gegentaktbetrieb

Bild 8: Rückflussdämpfung mit PCB

4 Messungen

Messungen der Kopplungsdämpfung mit offenem Messkopf und mit Standard-Messkopf an einem Twinax 105 und an einem Cat 8.2 sind in den Bildern 10 und 11 zusammengestellt. Die Widerstände des PCB (Bild 7a) waren 50/50/25.

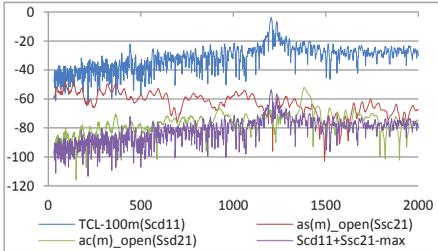


Bild 10a: Twinax – Offener Kopf, 3m/100m

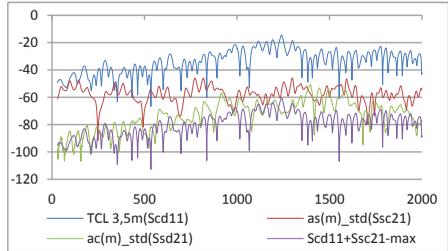


Bild 10b: Twinax - Standard Kopf, 3m

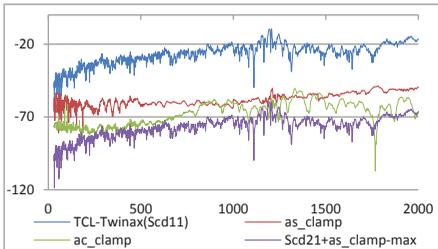


Bild 10c: Twinax 105 – Absorberzangen

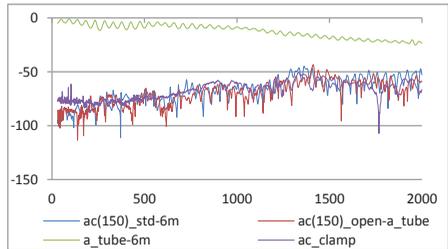


Bild 10d: Twinax 105 – Zusammenstellung ac, 6m

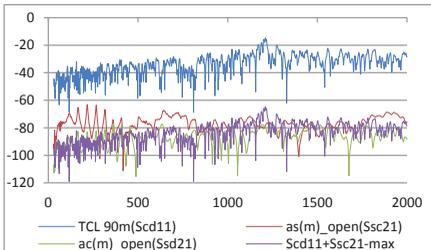


Bild 11a: Cat 8.2 - Offener Kopf, 3m/90m

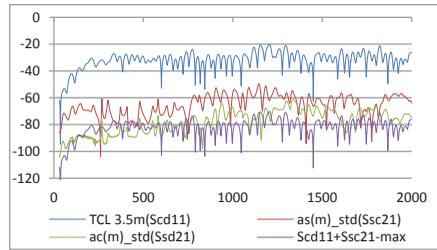


Bild 11b: Cat 8.2– Standard Kopf, 3m

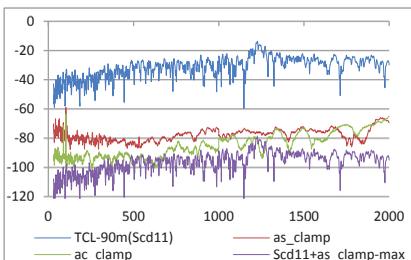


Bild 12c: Cat 8.2 - Absorberzangen

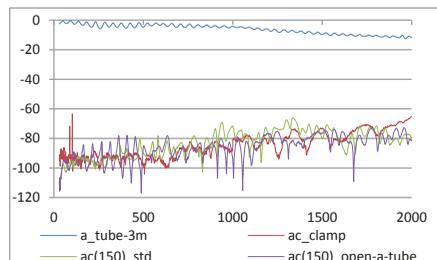


Bild 12d: Cat 8.2, Zusammenstellung ac

Die Messungen wurden mit einem R&S ZNB 8 4-Tor VNA, mit dem bedea CoMeT System und mit Lüthi Absorberzangen im HF- und EMV Labor von bedea durchgeführt. Die Messungen in den Bildern 10d und 11d sind auf den Normalisierungs-Wert $Z_S = 150 \text{ Ohm}$ korrigierte Werte nach IEC 62153-4-4 sowie mit a_{tube} korrigiert; alle anderen Messungen sind Rohwerte.

Das Vorbereiten der Prüfmuster sowie der Messaufbau müssen sehr sorgfältig durchgeführt werden. Die Prüfmuster müssen zentrisch im Messrohr angeordnet werden, z.B. mit einer Schaumeinlage. Beim Zangenverfahren sind hochgeschirmte Messkabel sowie eine geschirmte Messkammer erforderlich.

5 Auswertung der Messung (Vorschlag)

Das Spannungsverhältnis $U_{\text{diff}}/U_{2\text{max}}$ ist zu messen und mit den Betriebsdämpfungen der Anschlussleitungen und des Anlegefeldes zu korrigieren. Im Fall der Messung mit offenem Kopf ist die Betriebsdämpfung $a_{\text{tube}} = 20 \cdot \lg(U_1/U_2)$ des äußeren Systems nach Bild 12 zu messen.

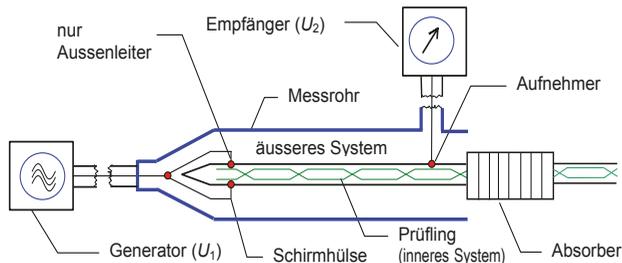


Bild 12: Messen der Betriebsdämpfung a_{tube}

Die Kopplungsdämpfung a_c ergibt sich dann zu:

$$a_c = 10 \cdot \lg \left[\frac{P_{\text{diff}}}{P_{\text{com}}} \right] + 10 \cdot \lg \left[\frac{P_{\text{com}}}{P_{r,\text{max}}} \right] \text{ dB}, \quad (4a + 3a)$$

$$a_c = 20 \cdot \lg \left[\frac{U_{\text{diff}}}{U_{\text{com}}} \right] + 10 \cdot \lg \left[\frac{Z_{\text{com}}}{Z_{\text{diff}}} \right] + 20 \cdot \lg \left[\frac{U_{\text{com}}}{U_{2,\text{max}}} \right] + 10 \cdot \lg \left[\frac{2 \cdot Z_S}{Z_{\text{com}}} \right] \text{ dB}, \quad (4b + 3b)$$

und mit der Korrektur der Betriebsdämpfung a_{tube} bei offenem Messrohr:

$$a_c = 20 \cdot \lg \left[\frac{U_{\text{diff}}}{U_{2,\text{max}}} \right] + 10 \cdot \lg \left[\frac{2 \cdot Z_S}{Z_{\text{diff}}} \right] - a_{\text{tube}} \text{ dB}, \quad (6)$$

$$\text{dabei ist } a_{\text{tube}} = 20 \cdot \lg [U_1/U_2] \quad (7)$$

6 Fazit

Im Hinblick auf die Sicherstellung einer verlässlichen Messung der Kopplungsdämpfung bei hohen Frequenzen sind mehrere technische Randbedingungen einzuhalten und Probleme zu lösen. Für den hier betrachteten Frequenzbereich von einigen 100 MHz bis zu und über 2 GHz kann die Einspeisung und Detektion des Signals mit der Methode der Mischmoden-Parameter erfolgen.

Moderne Netzwerkanalysatoren verfügen über entsprechende Möglichkeiten. Ein Anlegefeld zur Kontaktierung paariger Kabel mit guten HF-Eigenschaften bis 2 GHz wurde hierzu neu gestaltet.

Bei der Messung mit dem Triaxialverfahren mit Standard-Messrohr 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 Rückflussdämpfung des Prüflings sollte auch bei einer Messlänge von 3 m erfahrungsgemäß besser als etwa 10 dB sein. Dazu wurde eine verbesserte Version eines symmetrisch/unsymmetrischen Abschlusses entwickelt.

Tabelle 1 – Eigenschaften des TP-Anlegefeldes

Wellenwiderstand, Primärseite	2 x 50 Ω
Wellenwiderstand, Sekundärseite, (25 Ω common mode bei Abschluss mit 50 Ω)	1 x 100 Ω differential (25 Ω Common mode)
Unsymmetriedämpfung, Sekundärseite (offen)	> 40 dB
Unsymmetriedämpfung, Sekundärseite (abgeschlossen)	> 40 dB
Betriebsdämpfung, Primärseite (Kurzschluss)	< 0,2 dB
Betriebsdämpfung, Sekundärseite (back to back)	< 0,8 dB

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.

Vorteile des Triaxialverfahrens sind u.a. der geschlossene Messaufbau sowie die Möglichkeit, mit gleicher Prüfeinrichtung (bei kürzerer Messlänge) auch den Kopplungswiderstand des Schirmes messen zu können. Neben der Weiterentwicklung der Anlegefelder und der PCBs ist das Verhalten des offenen Messkopfes Gegenstand weiterer Untersuchungen. Diese sollen der Überarbeitung der Norm IEC 62153-4-9 dienen.

7 Literaturangaben

- [1] Thomas Hähner, Bernhard Mund – EMV-Verhalten symmetrischer Kabel – EMC Journal 4/1997
- [2] Thomas Hähner, Bernhard Mund – Test methods for screening and balance of communications cables; Proceedings of EMC Zurich, 1999, pp. 533-538
- [3] Bernhard Mund - EMV von Kabeln, Steckern und Komponenten mit dem Triaxialverfahren, emv 2014, Düsseldorf, 11. – 13. März 2014.
- [4] Alexander Schmidt, Messtechnische Charakterisierung der Schirmwirkung von Kabeln, Steckern und Komponenten, Diplomarbeit, bedea Berkenhoff & Drebes GmbH, Asslar, September 2015.
- [5] Bernhard Mund und Christian Pfeiler, Balunless measurement of coupling attenuation of screened balanced cables up to 2 GHz, Proceedings of the 64th IWCS Conference, Atlanta, GA, USA, October 2015, pp 509 - 518