

Messen der Schirmwirkung elektrischer Kabel

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

Dr. Lauri Halme, Aalto University, Helsinki
Otakaari 5 A, FI-00076 Aalto, Finland, lauri.halme@aalto.fi

1 Kurzfassung

Der Begriff "Elektromagnetische Umweltverschmutzung" beschreibt die ständige Zunahme gewünschter und ungewünschter elektromagnetischer Strahlung in unserer Umgebung. Dies gilt sowohl für Einrichtungen und Komponenten der Kommunikationstechnik als auch für Systeme der allgemeinen Elektrotechnik.

Problematisch ist u.a. die Koexistenz von Funkdiensten wie z.B. 4G/LTE mit Kabelnetzwerken im gleichen Frequenzbereich.

Um das Verbindungselement Kabel und damit auch Einrichtungen und Systeme sowohl gegen elektrische Emission als auch gegen Immission zu schützen, werden Kabel mit elektrisch leitenden Schirmen versehen.

Die Schirmwirkung von Kabeln und Komponenten wird, in Abhängigkeit von Länge und Frequenz als Kopplungswiderstand oder als Schirm- bzw. die Kopplungsdämpfung gemessen.

Neue Anwendungen wie z.B. Kabel und Komponenten für Elektrofahrzeuge erforderten die Überarbeitung der Normen der Reihe IEC 62135-4 zur Messung der Schirmwirkung von Kabeln, Steckern und Komponenten.

Der folgende Vortrag gibt einen Überblick über die verschiedenen international genormten Messverfahren zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirm- bzw. Kopplungsdämpfung von Kabeln und Komponenten und diskutiert die Unterschiede dieser Verfahren. Die Änderungen bzw. die Anpassungen der Normen der Reihe IEC 62135-4 an aktuelle Problemstellungen bei der Messung der Schirmwirkung mit dem Triaxialverfahren werden beschrieben.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Kopplungswiderstand und kapazitive Kopplung

Der Kopplungswiderstand bzw. die Transferimpedanz ist das Maß für die Schirmwirkung geschirmter elektrischer Leitungen und Komponenten bei Frequenzen bis ca. 30 MHz.

Durch äußere magnetische Felder wird im Kabelschirm ein Störstrom induziert, welcher an der inneren Oberfläche des Schirms einen Spannungsabfall verursacht. Dieser Spannungsabfall wirkt nun im, vom Kabelschirm geschützten Leitungssystem und beeinflusst die in diesem Leitungssystem übertragenen Signale.

Je kleiner der Spannungsabfall am Schirm ist, umso besser ist die Schirmwirkung gegen von außen wirkende Störfelder. Ein Maß hierfür ist der Kopplungswiderstand R_K , im englischen Transfer impedance Z_T genannt.

$$Z_T \cdot I = \frac{U_1}{I_2} \quad (1a) \quad Z_T \text{ dB}(\Omega) = +20 \cdot \log_{10} \left(\frac{|Z_T|}{1\Omega} \right) \quad (1b)$$

Der Kopplungswiderstand Z_T ist definiert als das Verhältnis des Spannungsabfalls U_2 längs des Schirmes auf der gestörten Seite zu dem Störstrom I_1 auf der anderen Seite des Schirmes.

Die Dimension des Kopplungswiderstandes ist Ohm pro Meter bzw. Milliohm pro Meter. In der aktuellen Normung wird der Kopplungswiderstand zum Teil auch als logarithmisches Verhältnis in Dezibel, bezogen auf 1Ω , angegeben, (1b).

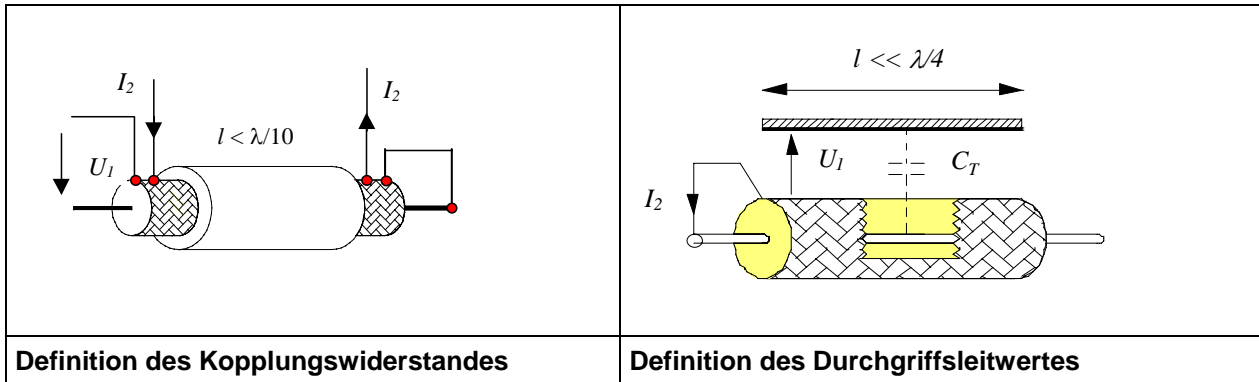


Bild 1 - Definition des Kopplungswiderstandes und des Durchgriffsleitwertes

Der Kopplungswiderstand kann nur an elektrisch kurzen Elementen gemessen werden. Nach EN 50289-1-6 bzw. nach IEC 62153-4 gilt:

für elektrisch kurz:

$$f \leq \frac{c_0}{10 \cdot l \cdot \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad (2a)$$

bzw. elektrisch lang:

$$f \geq \frac{c_0}{2 \cdot l \cdot \left| \sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}} \right|} \quad (2b)$$

Obleich der Kopplungswiderstand demnach nur die galvanische und magnetische Kopplung umfaßt, ist es üblich ihn auch als eine Größe zu benutzen, welche die Wirkung der Kopplungskapazität C_T durch den Kabelschirm einschließt. In diesem Fall spricht man vom äquivalenten Kopplungswiderstand Z_{TE} , der die Wirkung der galvanischen, magnetischen und kapazitiven Kopplung umfaßt.

Wenn man den kapazitiven Durchgriff getrennt erfassen will, gibt es als kennzeichnende Größe den Durchgriffsleitwert Y_T . Er ist, für ein elektrisch kurzes Stück Kabel, definiert als Verhältnis des Stroms, den die kapazitive Kopplung im gestörten Stromkreis verursacht, zur Spannung im störenden Kreis, bezogen auf die Längeneinheit.

$$Y_T = \frac{I_2}{U_1 \cdot l} = j\omega \cdot C_T \quad (3)$$

Bei elektrisch kurzen Kabellängen, wo die Wellenausbreitung unbeachtet bleiben kann, können die auf die Längeneinheit bezogenen Größen der Schirmung unmittelbar für die Berechnung einer Störspannung herangezogen werden. Im Bereich höherer Frequenzen werden die Zusammenhänge jedoch ähnlich kompliziert wie bei den Übertragungseigenschaften einer einfachen Leitung in Abhängigkeit von Widerstands- und Ableitungsbelag und von den Abschlusswiderständen, [1].

2.2 Schirmdämpfung, IEC 62153-4-4, Ausgabe 2, (46/439/CDV)

Die Schirmdämpfung a_S ist definiert als das logarithmische Verhältnis von der in das Kabel eingespeisten Leistung P_1 zu der vom Kabel abgestrahlten Leistung P_2 .

$$a_S = 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{P_1}{P_2} \right| = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{U_1}{U_2} \right| \quad (4)$$

2.3 Kopplungsdämpfung

Im Gegentakt betriebene symmetrische Kabel, Stecker, konfektionierte Kabel oder Einheiten strahlen aufgrund fertigungsbedingter Unsymmetrie im Kabel einen Teil der transportierten Leistung in die Umgebung ab.

Bei ungeschirmten symmetrischen Kabeln, Steckern, konfektionierten Kabeln oder Einheiten wird diese Abstrahlung durch die Unsymmetriedämpfung a_U beschrieben. Bei geschirmten symmetrischen Kabeln verursacht die Unsymmetrie einen Strom im Schirm der durch den Kopplungswiderstand und die kapazitive Kopplungsimpedanz in den äußeren Kreis überkoppelt. Diese Abstrahlung wird durch den Kabelschirm gedämpft und auf die die Schirmdämpfung a_S bezogen.

Die gesamte Effektivität des geschirmten symmetrischen Kabels gegen elektromagnetische Beeinflussung ergibt sich damit als Summe aus der Unsymmetriedämpfung a_U des Paares und der Schirmdämpfung a_S des Kabelschirmes. Da beide Werte üblicherweise im logarithmischen Maß angegeben werden, können diese einfach zur Kopplungsdämpfung a_C addiert werden:

$$a_C = a_U + a_S \quad (5)$$

Die Kopplungsdämpfung a_C ergibt sich aus dem logarithmischen Verhältnis der eingespeisten Leistung P_1 und den periodischen Maximalwerten der Leistung $P_{r,max}$ (die aufgrund der Spannungsspitzen U_2 in den äußeren Kreis abgestrahlt werden kann):

$$a_C = -10 \cdot \log_{10} \left(\text{Env} \left| \frac{P_{r,max}}{P_1} \right| \right) \quad (6)$$

Die Beziehung der abgestrahlten Leistung P_r zu gemessenen Leistung P_2 am Eingangswiderstand R des Empfängers ist:

$$\frac{P_S}{P_2} = \frac{P_{Smax}}{P_{2max}} = \frac{R}{2 \cdot Z_S} \quad (7)$$

Am fernen Ende ergeben sich Schwankungen der Spannung U_2 , Diese Schwankungen entstehen durch Überlagerung der, durch den Kopplungswiderstand Z_T und der kapazitiven Kopplungsimpedanz Z_F verursachten Einzelwellen, (welche beide zum nahen und zum fernen Ende wandern), sowie der am nahen Ende total reflektierten Wellen.

Zur Speisung des Prüflings ist ein Gegentaktsignal erforderlich. Dies kann über einen Zweitor-Netzwerkanalysator (Sender und Empfänger) und einen Symmetrieübertrager, oder über einen Mehrtor-Netzwerkanalysator (zwei Generatoren mit 180° Phasenverschiebung und ein Empfänger) erfolgen. Das Verfahren zur Messung der Kopplungsdämpfung mit einem Mehrtor-Netzwerkanalysator ist in Beratung.

2.4 Kopplungsübertragungsfunktion

Die Kopplungsübertragungsfunktion $T_{n,f}$ stellt den Verlauf von Kopplungswiderstand Z_T und Schirmdämpfung a_S eines Kabelschirmes über der Frequenz dar. Bei Gleichspannung bzw. bei sehr tiefen Frequenzen entspricht der Kopplungswiderstand des Kabelschirmes seinem Gleichstromwiderstand. Im Bereich zwischen 1 MHz und 10 MHz sinkt der Kopplungswiderstand durch Wirbelstromverluste im Schirm, um dann zu höheren Frequenzen hin mit ca. 20 dB/Dekade anzusteigen.

Oberhalb der Grenzfrequenzen $f_{cn,f}$ (c = cutt off, n = nah, f = fern), beginnt der Bereich der Wellenausbreitung bzw. der Bereich, in dem die untersuchten Schirme als elektrisch lang zu betrachten sind. In diesem Bereich ist die Schirmdämpfung a_S das quantitative Merkmal des Kabelschirmes.

Bei Anpassung beider Systeme ergeben sich die, von den unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten im inneren und äußeren System abhängigen Grenzfrequenzen $f_{cn,f}$ mit Bezug auf die Messlänge l zu:

$$f_{cn,f} = \frac{c_0}{\left| \sqrt{\epsilon_{r2}} \pm \sqrt{\epsilon_{r1}} \right| \cdot \pi \cdot l} \quad (8)$$

wobei $\epsilon_{r1,2}$ die relativen Dielektrizitätskonstanten des Isolationsmaterials bzw. des umgebenden Mediums (z.B. $\epsilon_{rLuft} = 1$), darstellen.

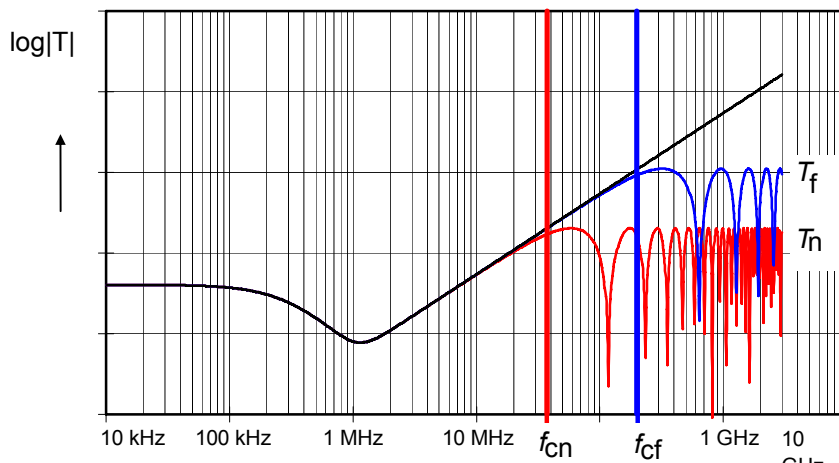


Bild 2: Gerechnete Kopplungsübertragungsfunktion $T_{n,f}$ eines Geflechtsschirms.

3 Messverfahren für die Schirmwirkung

3.1 Allgemeines

Bei der Messung des Kopplungswiderstandes bis ca. 30 MHz kann der Prüfling am senderfernen Ende kurzgeschlossen werden. Bei der Messung der Schirmdämpfung bei Frequenzen ab ca. 30 MHz muss der zu prüfende Stecker angepasst werden, d.h. mit seinem Wellenwiderstand abgeschlossen sein.

Bei koaxialen Systemen ist der Nennwellenwiderstand üblicherweise bekannt und die Anpassung mit dem entsprechenden Wellenwiderstand relativ einfach.

Bei Kabeln oder Steckern mit mehreren Leitungen bzw. Kontakten muss zunächst der Wellenwiderstand der zu prüfenden Kombination ermittelt werden.

Bei symmetrischen bzw. bei mehrpaarigen Kabeln und Steckern gibt es darüber hinaus verschiedene Betriebsarten, der Gleichtaktbetrieb (common mode) und der Gegentaktbetrieb (differential mode).

Bei symmetrischen Komponenten oder bei Multipin-Komponenten ist daher zunächst zu entscheiden, für welches Paar bzw. mit welcher Pin-Kombination gemessen werden soll. Weiterhin ist die Frage zu klären, ob der Kopplungswiderstand, die Kopplungsdämpfung oder die Schirmdämpfung gemessen werden soll. Diese Problematik ist in den meisten Normen zur Messung der Schirmwirkung von Steckern bisher nicht ausreichend berücksichtigt.

3.2 Verfahren mit Absorberzangen

Der Prüfling wird auf einer Länge von ca. 5 Metern zwischen zwei Absorberzangen frei aufgespannt und vom Generator mit HF-Energie beaufschlagt. Die Ferritringe der einen Zange dienen als Absorber, die andere Zange wirkt sowohl als Absorber als auch als Aufnehmer.

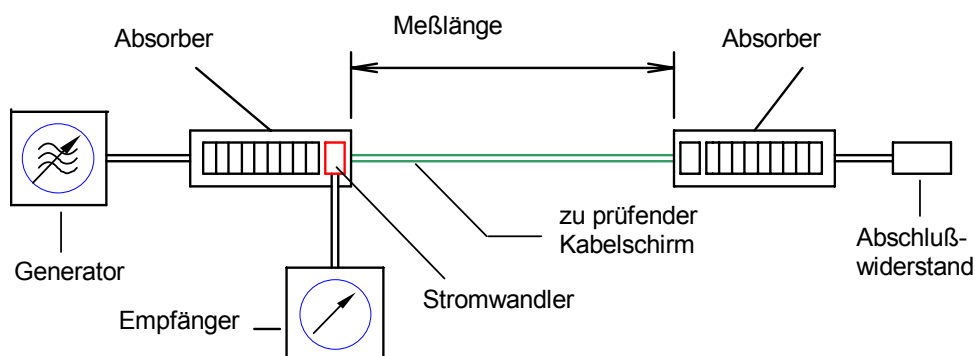


Bild 3 - Schirmdämpfung bzw. die Kopplungsdämpfung mit Absorberzangen

Es wird jeweils eine Messung am nahen und am fernen Ende durchgeführt und der schlechtere Wert als Messwert genommen.

Das Zangenverfahren ist ein "offenes" System und anfällig gegen Störungen. Zur Messung von hohen Schirmdämpfungen > 75 dB ist eine Messkabine erforderlich.

3.3 Speisedrahtverfahren

Beim Speisedrahtverfahren nach IEC 62153-4-6 und EN 50289-1-6 wird über den sogenannten Speisedraht das Signal in den Prüfling eingekoppelt.

Der Speisedraht wird über ein Koaxialkabel an den Generator angeschlossen und beaufschlagt den Prüfling mit HF-Energie. Die vom Prüfling aufgenommene Energie wird vom Empfänger gemessen. Kritisch ist hier insbesondere die breitbandige Anpassung des Speisedrahtes an den Generator.

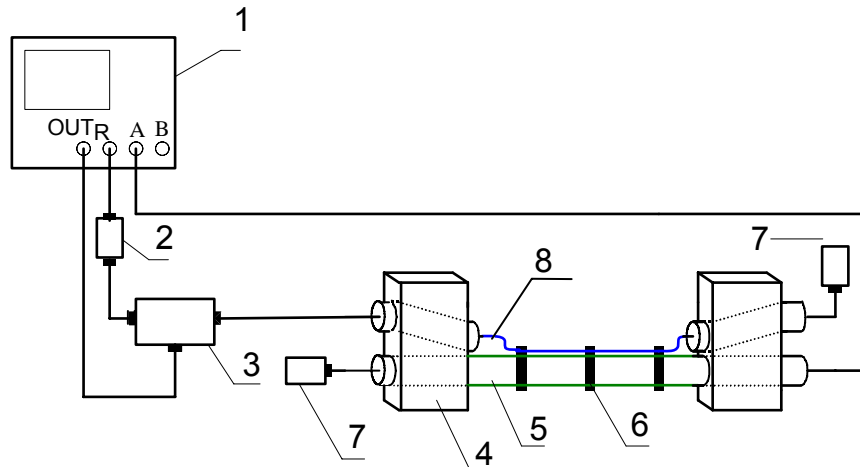


Bild 4 - Prinzipdarstellung des Speisedrahtverfahrens

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| 1 Netzwerkanalysator | 5 Prüfling |
| 2 Dämpfungsglied 20 dB | 6 Klebeband |
| 3 Leistungssteiler | 7 Abschlusswiderstand |
| 4 Anpassglieder | 8 Speisedraht |

Der Kopplungswiderstand Z_T ergibt sich aus dem logarithmischen Verhältnis A_T der Speisespannung U_1 zur eingekoppelten Spannung U_2 zu:

$$Z_T = \frac{2}{l} \cdot \sqrt{Z_1 \cdot Z_2} \cdot 10^{\frac{A_T}{20}} \quad (9)$$

mit $A_T = U_2/U_1$

Die obere Frequenzgrenze, bis zu der der Kopplungswiderstand gemessen werden kann, hängt von der Länge des Prüflings und von den Unterschieden der Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Prüflings und des Aussenraumes ab. Theoretisch reicht diese Grenze bis zu 3 GHz. In der Praxis lässt sich diese Grenze kaum erreichen, da die geforderte, breitbandige Anpassung des Speisedrahtes von mindestens 10 dB Probleme bereitet.

Zu Berechnung der Schirmdämpfung aus dem gemessenen Spannungsverhältnis U_1/U_2 müssen die Wellenwiderstände von Prüfling und Aussenraum bekannt sein.

Auch das Speisedrahtverfahren ist ein offenes System und damit anfällig gegen Störungen von Außen. Anschlussleitungen und Abschlusswiderstände müssen daher sorgfältig geschirmt werden. Zur Messung von niedrigen Kopplungswiderständen (< 50 mΩ/m) ist eine Messkabine erforderlich. Die Anwendung des Speisedrahtverfahrens erfordert einige Erfahrung.

3.4 Zusammenstellung der Messverfahren

Für die Messung der Schirm- bzw. Kopplungsdämpfung für metallische Kommunikationskabel gibt es zahlreiche Messverfahren mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen.

Tabelle 1 - Messverfahren von Kopplungswiderstand und Schirm- bzw. Kopplungsdämpfung für metallische Kommunikationskabel

Norm	Kurz-Titel	Prinzip	Frequenzbereich
EN 50289-1-6	Elektromagnetisches Verhalten von Kommunikationskabeln, Deutsche Fassung	Zangenverfahren, Speisedrahtverfahren, Triaxialverfahren (2 x)	vier verschiedene Verfahren
IEC 62153-4-2	Schirm- und Kopplungsdämpfung - Verfahren mit gespeister Zange	Zangenverfahren, gespeiste Zange	Schirmdämpfung 30 MHz bis 1 GHz
IEC 62153-4-3 (EN 50289-1-6)	Kopplungswiderstand Triaxialverfahren (IEC 61196-1, DIN 47250-4, VG 95373-15)	Triaxialverfahren	Kopplungswiderstand bis 100 MHz
IEC 62153-4-4 (EN 50289-1-6)	Geschirmtes Messverfahren zur Messung der Schirmdämpfung "as" bis zu und über 3 GHz	Triaxialverfahren	Schirmdämpfung 30 MHz bis 12 (20) GHz
IEC 62153-4-5 (EN 50289-1-6)	Kopplungsdämpfung oder Schirmdämpfung - Verfahren mit Absorberzangen	Zangenverfahren, Zange als Aufnehmer	Schirm- Kopplungsdämpfung 30 MHz bis 1 (2,5) GHz
IEC 62153-4-6 (EN 50289-1-6)	Kopplungswiderstand - Speisedrahtverfahren	Speisedrahtverfahren	Kopplungswiderstand bis 100 MHz (1 GHz)
IEC 62153-4-9	Kopplungsdämpfung von geschirmten symmetrischen Kabeln – Triaxialverfahren	Triaxialverfahren	Kopplungsdämpfung, DC bis 2 (3) GHz
VG 95373 Teil 41	Elektromagnetische Verträglichkeit - Elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten - Teil 41: Meßverfahren für geschirmte Kabel und schirmende Kabelschutzschläuche	Triaxialverfahren, Speisedrahtverfahren und Verfahren mit Helmholtz-Spule	Kopplungswiderstand bis ca. 100 MHz
IEC 61726	Strahlenkammer, (Reverberation chamber or mode-stirred chamber)	Verfahren mit Antennen	bis 40 GHz

4 Kopplungswiderstand, Triaxialverfahren

4.1 Allgemeines

Das Triaxialverfahren zur Messung des Kopplungswiderstandes bis ca. 100 MHz ist eines der klassischen und lange bekannten und genormten Verfahren zur Ermittlung der Schirmwirkung von Kabeln, (ehem. DIN 47250 Teil 4 bzw. IEC 96-1).

Mit dem Kabelfernsehen und den damit verbundenen Kabelnetzen ergab sich Anfang der 1980er Jahre die Forderung, die Schirmwirkung von Kabeln bis zu 1 GHz zu messen. Dazu wurde mit Beteiligung Deutscher Experten das Verfahren mit Absorberzangen entwickelt und genormt, (DIN 47250 Teil 6 und IEC 96-1).

Später wurde dann u.a. mit Beteiligung von Experten der Schweizer Post das Speisedrahtverfahren entwickelt, mit dem der Kopplungswiderstand auch bei Frequenzen über 100 MHz gemessen werden kann. Beide Verfahren sind Verfahren mit offenem Aufbau, zur Messung höherer Schirmwerte sind Messkabinen erforderlich.

Um die Messungen bei hohen Frequenzen zu vereinfachen und um auch bei hochgeschirmten Kabeln ohne Messkabine messen zu können, wurde Ende der 1980er von Otto Breidenbach, Kabelmetal Nürnberg, die Idee aufgegriffen, das bekannte Kopplungsmessrohr des Triaxialverfahrens zu verlängern und neben dem Kopplungswiderstand auch die Schirmdämpfung mit einem Messaufbau zu messen.

Inzwischen gibt es zahlreiche genormte Varianten des Triaxialverfahrens für unterschiedliche Anwendungen. Das Triaxialverfahren ist im Bereich Kabel und Stecker das am weitesten verbreitete und eingesetzte Messverfahren.

Die Messung des Kopplungswiderstandes ist in IEC 62153-4-3 und in EN 50289-1-6 beschrieben, für die Messung der Schirmdämpfung gilt das Triaxialverfahren nach IEC 62153-4-4 bzw. EN 50289-1-6.

Sowohl IEC 62153-4-3 als auch IEC 62153-4-4 befinden sich zurzeit in Überarbeitung (46/471/FDIS und 46/439/CDV). Die Änderungen der beiden Normen sind nachfolgend beschrieben.

4.2 IEC 62153-4-3, Ausgabe 2,

Es gibt in der neuen Ausgabe der IEC 62153-4-3Ed2 jetzt drei unterschiedliche Prüfverfahren:

- Prüfverfahren A:** Angepasster innerer Kreis mit Dämpfungswiderstand R_2 im Aussenkreis,
- Prüfverfahren B:** Innerer Kreis mit Abschlusswiderstand und äußerer Kreis ohne Dämpfungswiderstand,
- Prüfverfahren C:** (Fehlangepasst)-Kurzschluss- Kurzschluss ohne Dämpfungswiderstand

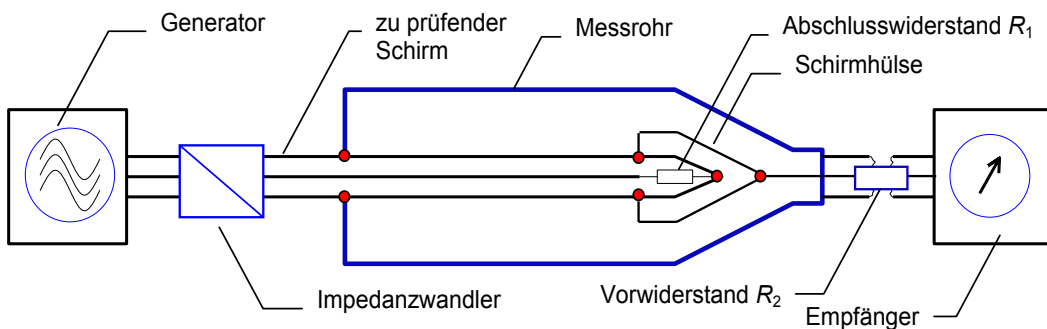


Bild 5a - Prüfverfahren A: Angepasster innerer Kreis mit Dämpfungswiderstand R_2 im Aussenkreis

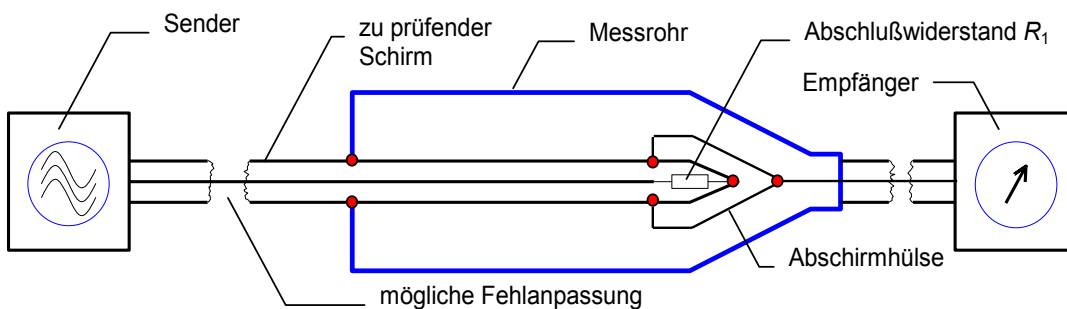


Bild 5b - Prüfverfahren B: Innerer Kreis mit Abschlusswiderstand und äußerer Kreis ohne Dämpfungswiderstand.

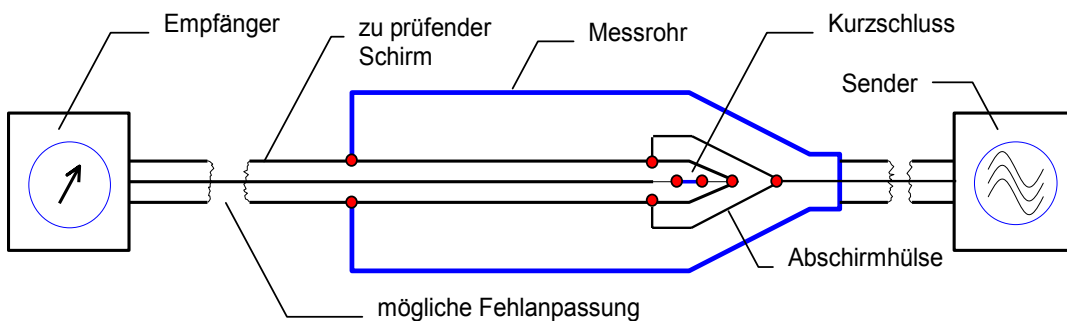


Bild 5c - Prüfverfahren C: (Fehlangepasst)-Kurzschluss- Kurzschluss ohne Dämpfungswiderstand.

Bild 5 – Verschiedene Prüfaufbauten der Ausgabe 2 der IEC 62153-4-3 und 62153-4-4

4.3 Prüfverfahren A: Angepasster innerer Kreis mit Dämpfungs- bzw. Vorwiderstand

Bei diesem Verfahren wird der innere Kreis (Prüfling) mit einem angepassten Lastwiderstand abgeschlossen ($R_1 = Z_1$); der innere Kreis wird als der störende Kreis angesehen; d.h. er wird vom Generator gespeist. Falls der Wellenwiderstand des inneren Kreises unbekannt ist, kann er z.B. mit dem "open-short"-Verfahren nach Anhang A der IEC 62153-4-3Ed.2 gemessen werden.

Der Schirm des zu prüfenden Kabels oder der zu prüfenden Komponente wird am sendernahen Ende mit dem Messrohr kurzgeschlossen. Am ferneren Ende wird der Messkopf über den Dämpfungswiderstand R_2 an den Empfänger angeschlossen.

Falls der Wellenwiderstand des Prüflings vom Wellenwiderstand des Generators abweicht, wird ein Impedanzwandler eingesetzt. Falls kein handelsüblicher Impedanzwandler verfügbar ist, kann er z.B. nach Anhang B der IEC 62153-4-3Ed2 selbst hergestellt werden.

Der Vorteil des Verfahrens A liegt in der hohen Grenzfrequenz. Allerdings wird der Dynamikbereich durch den Dämpfungswiderstand und durch den Impedanzwandler eingeschränkt. Der Dämpfungswiderstand R_2 ergibt sich nach IEC 62153-4-3 zu:

$$R_2 = A \times 60 \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) - 50 \quad \text{mit } A = \sqrt{2} \text{ oder } A = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} \quad (10a, 10b)$$

dabei ist

D	der Innendurchmesser des Rohres;
d	der Aussendurchmesser des Kabelschirms;
ϵ_{r1}	die Dielektrizitätskonstante des inneren Kreises;
ϵ_{r2}	die Dielektrizitätskonstante des äußeren Kreises.

4.4 Prüfverfahren B: Innerer Kreis mit Abschlusswiderstand und äußerer Kreis ohne Dämpfungs- bzw. Vorwiderstand

Dieses Verfahren ist das gleiche wie Verfahren A: Angepasster innerer Kreis mit Abschlusswiderstand R_1 , allerdings ohne Impedanzwandler und ohne den Dämpfungswiderstand R_2 . Dieses Verfahren hat eine höhere Dynamik. Der Abschlusswiderstand R_1 sollte vorzugsweise dem Wellenwiderstand Z_1 des Prüflings entsprechen, ($R_1 = Z_1$).

4.5 Prüfverfahren C: (Fehlangepasst)-Kurzschluss- Kurzschluss ohne Dämpfungs- bzw. Vorwiderstand

Bei diesem Verfahren sind sowohl der innere als auch der äußere Kreis an einem Ende kurzgeschlossen; d.h. der Dämpfungswiderstand R_2 und der Abschlusswiderstand R_1 werden durch Kurzschlüsse ersetzt. Ein Impedanzwandler wird nicht eingesetzt, (siehe Bild 1c).

Im Gegensatz zu Verfahren A und B speist der Generator bei Verfahren C den äußeren Kreis (das Messrohr) und der innere Kreis (das zu prüfende Kabel) wird an den Empfänger angeschlossen. Bei dieser Prüfeinrichtung wird der Einfluss der kapazitiven Kopplung durch die Kurzschlüsse im inneren und im äußeren Kreis unterdrückt. Das Verfahren ist sehr empfindlich und daher geeignet, sehr niedrige Kopplungswiderstände zu messen, (bis zu $1 \mu\Omega/m$ und niedriger).

4.6 Messung und Auswertung

Der Streuparameter a_{meas} bzw. die Dämpfung S_{21} ist bei allen Verfahren (vorzugsweise mit logarithmischer Frequenzachse) über den gesamten, für den Kopplungswiderstand festgelegten Frequenzbereich und an den gleichen Punkten wie während des Kalibrierens zu messen.

$$a_{\text{meas}} = 10 \cdot \log_{10} |P_1 / P_2| = -20 \cdot \log_{10} |S_{21}| \quad (11)$$

dabei ist:

P_1	die Leistung, die in den inneren Kreis eingespeist wird;
P_2	die Leistung im äußeren Kreis.

Die Herleitung der nachfolgenden Gleichungen für die jeweiligen Messverfahren kann z.B. über ein T-Glied erfolgen; sie ist u.a. im Anhang D der IEC 62153-4-3Ed2 beschrieben. Die unterschiedlichen Wellenwiderstände die auf der Primär- und Sekundärseite eines Impedanzwandlers sind in (12) und (13) mit Z_p und Z_s bzw. mit Z_0 und Z_1 enthalten. Gleichung (14), Messen mit Fehlanpassung, kann daher nicht direkt aus 13 abgeleitet werden.

Die Umwandlung der gemessenen Dämpfung a_{meas} bzw. S_{21} der jeweiligen Messverfahren in den Kopplungswiderstand geschieht nach folgender allgemeiner Gleichung (für alle Verfahren gültig):

$$Z_T = \frac{\left(R_1 + Z_0 \frac{Z_s}{Z_p} \right) (R_2 + Z_0)}{2Z_0 \sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}}} \frac{1}{L_c} \cdot 10^{\left\{ \frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}} - a_{\text{pad}}}{20} \right\}} \quad (12)$$

Daraus ergeben sich für die verschiedenen Verfahren folgende Gleichungen:

Verfahren A:

$$Z_T = \frac{R_1 (Z_0 + R_2)}{Z_0 \cdot L_c} \cdot 10^{\left\{ \frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}} - (a_{\text{pad}} + 10 \log_{10} (Z_0 / Z_1))}{20} \right\}} \quad (13)$$

Verfahren B:

$$Z_T = \frac{R_1 + Z_0}{2L_c} \cdot 10^{\left\{ \frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}}}{20} \right\}} \quad (14)$$

Verfahren C:

$$Z_T = \frac{Z_0}{2L_c} \cdot 10^{\left\{ \frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}}}{20} \right\}} \quad (15)$$

dabei ist:

- Z_0 der Systemwellenwiderstand (üblicherweise 50 Ω),
- Z_1 der Wellenwiderstand des inneren Kreises bzw. des Prüflings,
- Z_T der Kopplungswiderstand,
- Z_p Wellenwiderstand auf der Primärseite des Impedanzwandlers
- Z_s Wellenwiderstand auf der Sekundärseite des Impedanzwandlers
- a_{meas} die gemessene Dämpfung,
- a_{cal} die Dämpfung der Verbindungskabel, falls nicht während des Kalibrierens der Prüfeinrichtung eliminiert,
- a_{pad} die Dämpfung des Impedanzwandlers,
- L_c die Kopplungslänge,
- R_1 der Abschlusswiderstand im inneren Kreis.
- R_2 Dämpfungswiderstand (Serienwiderstand) im äußeren Kreis,

5 Schirmdämpfung, IEC 62153-4-4, Ausgabe 2

Die Schirmdämpfung a_S ist definiert als das logarithmische Verhältnis von der, in das Kabel eingespeisten Leistung P_1 zu der, vom Kabel abgestrahlten Leistung P_2 .

$$a_S = 10 \log |P_1 / P_2| = 20 \log |U_1 / U_2| \quad (16)$$

Änderungen zu Ausgabe 1: Die Norm IEC 62153-4-4 wurde erweitert und auf die Erfordernisse bei der Messung von geschirmten Kabeln mit nicht standardisierten Wellenwiderständen angepasst, z.B. HV-Kabel mit ca. 10 Ohm Wellenwiderstand.

Nach Ausgabe 1 der IEC 62153-4-4 wurde die Schirmdämpfung bei angepassten Verhältnissen, (siehe Bild 5a) gemessen, (Abschluss des Prüflings mit seinem Wellenwiderstand, ($R_1 = Z_1$), und Anpassung des Prüflings an den Wellenwiderstand des Generators mit einem Impedanzwandler).

Ausgabe 2 der IEC 62153-4-4 erlaubt jetzt sowohl die Messung mit Anpassung als auch mit Fehlanpassung zwischen Sender und Prüfling. Ein Impedanzwandler ist nicht mehr erforderlich.

Lediglich der Prüfling wird am senderfernen Ende mit seinem Wellenwiderstand abgeschlossen. Bei der Messung mit Fehlanpassung ist zunächst der Wellenwiderstand des Kabels bzw. des Prüflings zu ermitteln, z.B. mit dem "open-short" Verfahren nach Anhang A der IEC 62153-4-4.

Der Messaufbau nach Ausgabe 2 der IEC 62153-4-4 entspricht Bild 5b.

Die Schirmdämpfung a_s , welche mit den Ergebnissen des Zangenverfahrens vergleichbar ist, ergibt sich bei Fehlanpassung und mit dem normalisierten Wert $Z_s = 150 \Omega$ zu:

$$a_s = 10 \log_{10} \left| \frac{P_1}{P_{r,\max}} \right| = 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{P_1}{P_{2,\max}} \cdot \frac{2 \cdot Z_s}{Z_1} \right| \quad (17)$$

$$= Env \left\{ -20 \cdot \log_{10} |S_{21}| + 10 \cdot \log_{10} |1 - r^2| + 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{300 \Omega}{Z_1} \right| \right\} \quad (18)$$

dabei ist:

a_s die Schirmdämpfung bezogen auf den normalisierten Wellenwiderstand der Umgebung von 150Ω in dB,

Env die minimale Hüllkurve der gemessenen Werte, in dB,

r der Reflexionsfaktor $= \left| \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1} \right|$ (19)

Z_0 der System-Wellenwiderstand bzw. der Generatorwiderstand, in Ω , (üblicherweise 50Ω),

Z_1 der Wellenwiderstand des Prüflings, in Ω .

Der Term $|1 - r^2|$ stellt hier die Reflexionsdämpfung durch die Fehlanpassung zwischen Generator und Prüfling dar. Bei einer Fehlanpassung von 50Ω Generatorwiderstand auf 10Ω des Prüflings ergibt sich damit ein Korrekturwert von ca. 2,5 dB.

6 Kopplungsdämpfung

Die Messung der Kopplungsdämpfung von symmetrischen Leitungen erfolgt entweder mit Absorberzangen oder einem triaxialen Messaufbau nach folgenden Normen:

- IEC 62153-4-5, Kopplungsdämpfung oder Schirmdämpfung – Verfahren mit Absorberzangen
- IEC 62153-4-9, Kopplungsdämpfung von geschirmten symmetrischen Kabeln – Triaxialverfahren

Die Messung mit Absorberzangen hat einige Nachteile gegenüber der Messung mit dem triaxialen Aufbau:

Mit Absorberzangen sollte die Messung in geschirmten Räumen erfolgen um Umgebungseinflüsse auszuschließen. Dagegen sind beim triaxialen Aufbau Umgebungseinflüsse durch den Aufbau selbst ausgeschlossen.

Es existieren Zangen 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. Daher wird vorzugsweise der triaxiale Aufbau nach IEC 62153-4-9 verwendet.

Zur Messung der Kopplungsdämpfung wird ein differentielles Signal benötigt. Dies kann z.B. über einen Symmetrieübertrager (Balun) erzeugt werden, der den coaxialen Ausgang eines 50-Ohm Netzwerkanalysators in ein differentielles Signal von 100 Ohm des Prüflings wandelt. Handelsübliche Symmetrieübertrager sind allerdings nur bis ca. 1,2 GHz verfügbar.

Alternativ zu einem Symmetrieübertrager kann ein symmetrisches Signal auch mit einem Netzwerkanalysator mit zwei Generatoren, die um 180° phasenverschoben sind, erzeugt werden. Damit kann die Kopplungsdämpfung bis zu und über 3 GHz gemessen werden. Allerdings sind solche Geräte kaum verfügbar. Eine weitere häufig angewendete Alternative ist die Messung mit einem Mehrtor-VNA und der Anwendung der entsprechenden Mischmoden S-Parameter.

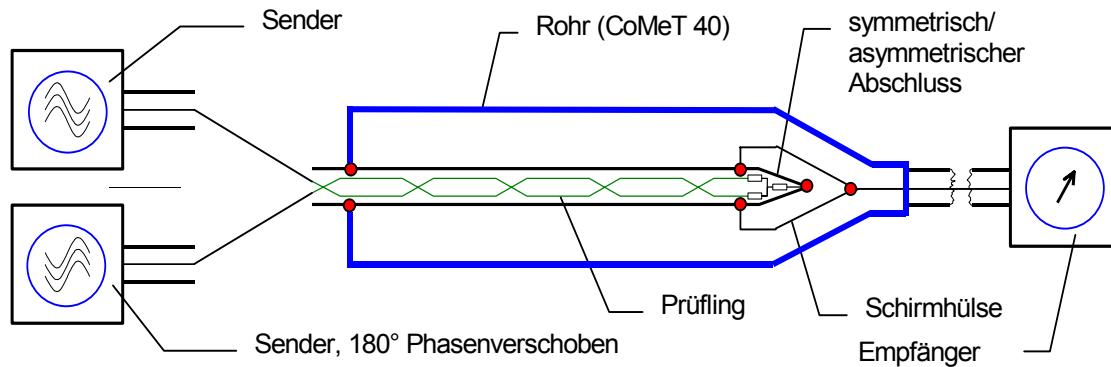


Bild 6 - Messung der Kopplungsdämpfung mit Multiport VNA, Prinzip

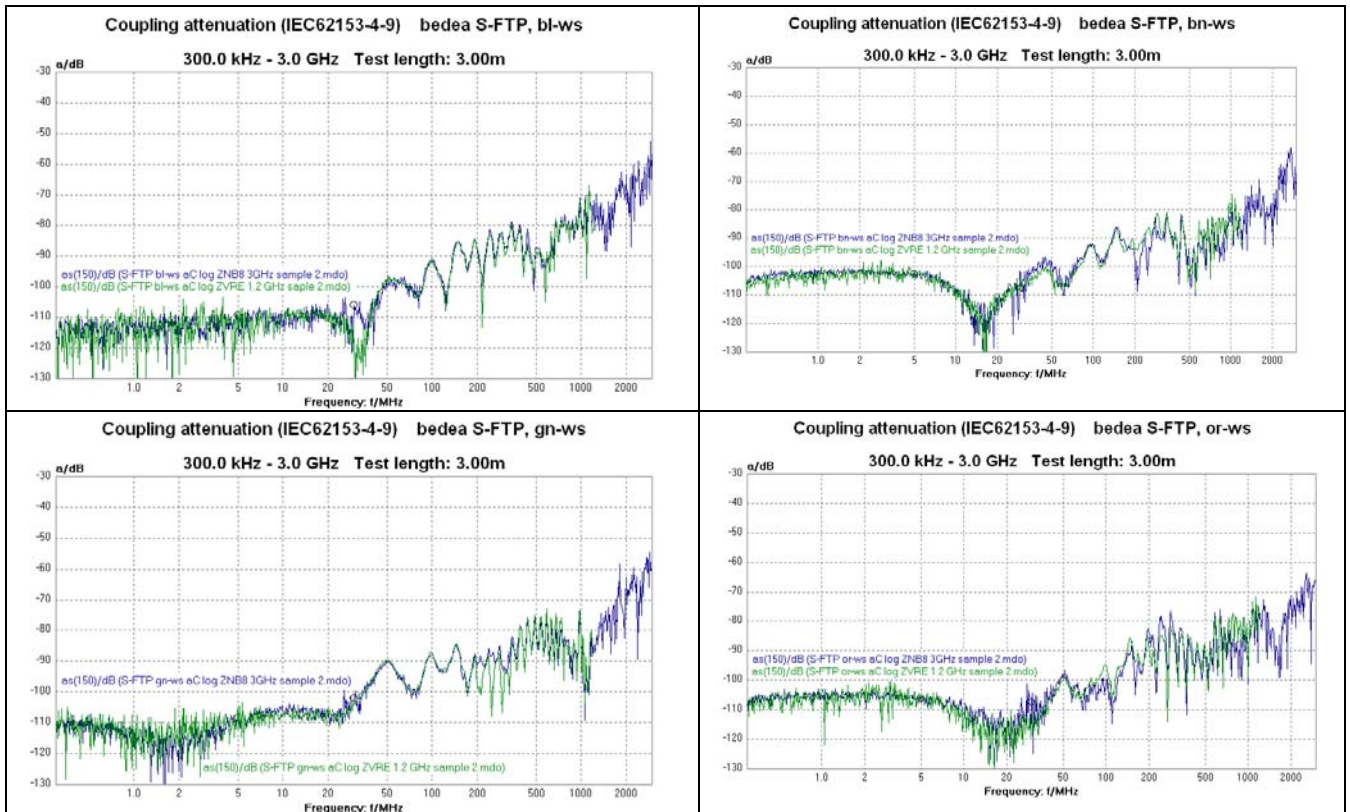


Bild 7 - Messung der Kopplungsdämpfung mit Balun und mit Multiport-NWA

Der Vergleich der Messung mit Balun und mit Multiport-NWA (balunless) zeigt sehr gute Übereinstimmung der Kurven. Die Norm IEC 62153-4-9 soll auf Anwendungen mit Multiport-NWAs erweitert werden.

7 Symmetrische Kabel, Stecker und Komponenten

7.1 Allgemeines

Bei der Messung der Schirmwirkung von symmetrischen Kabeln, Steckern und Komponenten ist zunächst zu entscheiden, ob Kopplungswiderstand, Schirmdämpfung oder Kopplungsdämpfung gemessen werden soll. Die Bilder 8a bis 8c gelten für das Vorbereiten von mehrpoligen Steckern und sinngemäß von mehradrigen Kabeln.

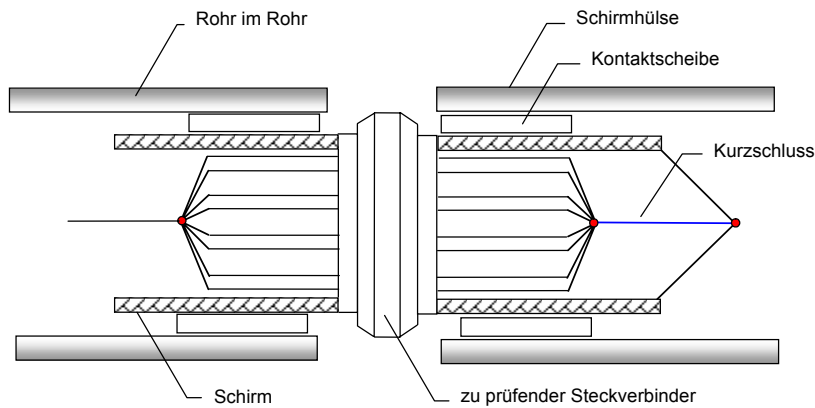


Bild 8a – Vorbereitung eines 4-paarigen Datensteckers mit Kurzschluss

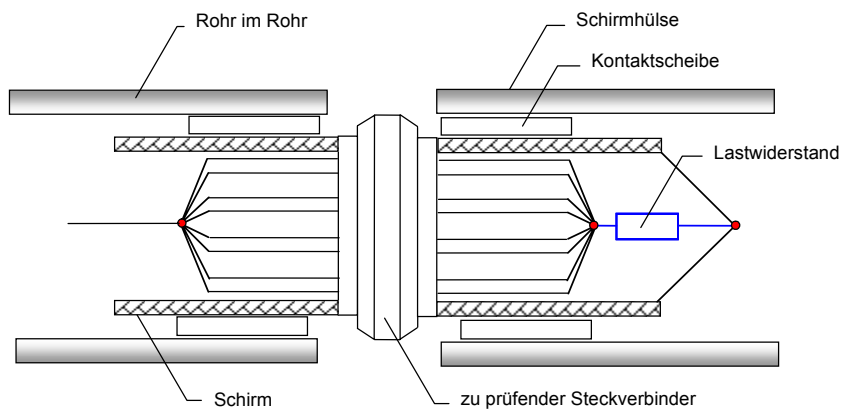


Bild 8b – Vorbereitung eines 4-paarigen Datensteckers mit Abschluss

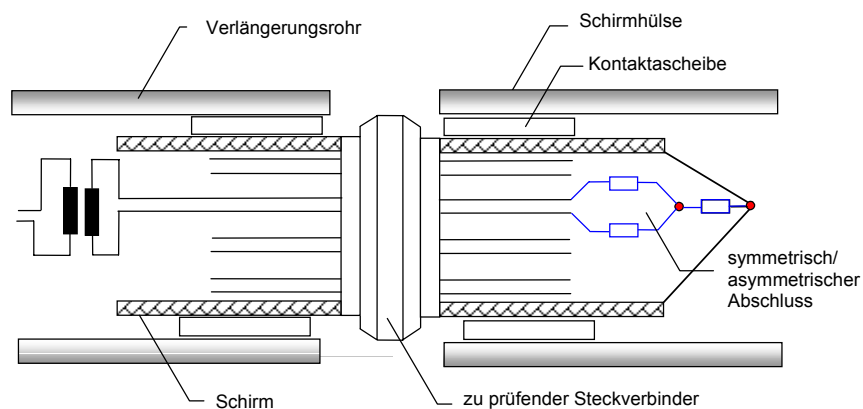


Bild 8c – Vorbereitung eines 4-paarigen Datenstecker mit symmetrisch- asymmetrischem Abschluss für Triaxialverfahren

Bild 8 – Vorbereitung von mehradrigen Kabeln bzw. von mehrpoligen Steckern

IEC 605/06

Der Kopplungswiderstand von symmetrischer Kabeln, Steckern und Komponenten kann sowohl mit Anpassung als auch mit Fehlanpassung des Prüflings (Bilder 8a bis 8c), gemessen werden. Zur Messung der Schirmdämpfung ist Anpassung über einen Lastwiderstand (Bild 8b) oder über einen symmetrisch-/asymmetrischen Abschluss (Bild 8c) erforderlich.

Mit dem symmetrisch-asymmetrischen Abschluss kann je nach Speisung (koaxial oder symmetrisch) der Kopplungswiderstand und die Schirmdämpfung oder die Kopplungsdämpfung gemessen werden. Der Messaufbau muss dazu nicht geändert werden.

8 Rohr im Rohr-Verfahren nach IEC 62153-4-7

Die Messung des Kopplungswiderstandes und der Schirmdämpfung von Steckern und von konfektionierten mit dem Triaxialverfahren ist in IEC 62153-4-7 beschrieben. Um auch bei tieferen Frequenzen anstelle des Kopplungswiderstandes die Schirmdämpfung von Steckern messen zu können, wurde hier das "Rohr im Rohr"-Verfahren eingeführt.

Mit einem HF-dichten Verlängerungsrohr wird der elektrisch kurze Stecker verlängert und die Grenzfrequenz des Überganges von Kopplungswiderstand zur Schirmdämpfung zu tieferen Frequenzen hin verschoben. Mit dem gleichen Prüfaufbau kann nach IEC 62153-4-7 der Kopplungswiderstand, die Schirmdämpfung und die Kopplungsdämpfung von Steckern und konfektionierten Kabeln gemessen werden.

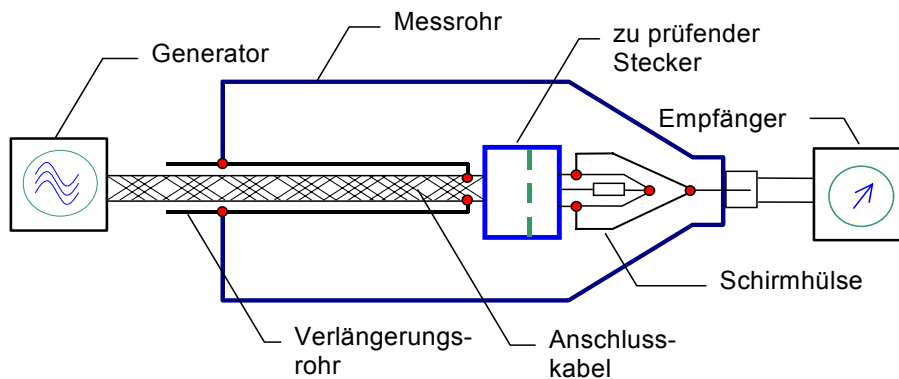


Bild 8 - Rohr im Rohr-Verfahren nach IEC 62153-4-7

Durch das "Rohr im Rohr" kann der elektrisch kurze Stecker verlängert werden und Grenzfrequenz zwischen Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung zu tieferen Frequenzen hin verschoben werden.

9 Triaxiale Zelle, IEC 62153-4-15

Zur Messung von größeren Kabeln, Steckern und Komponenten wurde die Triaxiale Zelle entwickelt.

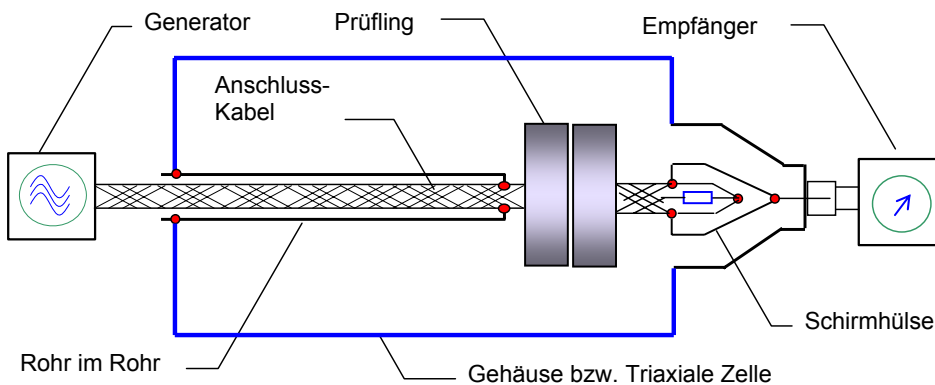


Bild 9 - Triaxiale Zelle nach IEC 62153-4-15 mit Rohr nach IEC 62153-4-7

Die Verhältnisse des Triaxialverfahrens im Messrohr lassen sich prinzipiell auch auf rechteckige Gehäuse übertragen. Rechteckiges Gehäuse und Rohr können auch in Kombination betrieben werden. Die Schirmwirkung größerer Stecker, Anschluss-Schnüre und HV-Komponenten kann somit in der "Triaxialen Zelle" oder in einer Kombination aus Rohr und Zelle gemessen werden. Das Verfahren mit der Triaxialen Zelle ist in IEC 62153-4-15 beschrieben.

Das Gehäuse bzw. die "Triaxiale Zelle" stellt im Prinzip einen Hohlraumresonator bzw. eine Kavität dar, die in Abhängigkeit von seinen Abmessungen verschiedene Resonanzfrequenzen aufweist.

Für einen leeren Hohlraum lassen sich die Resonanzfrequenzen nach Gleichung (6) berechnen. Zur Berechnung der Resonanzfrequenzen kann ein Parameter M,N,P auf Null gesetzt werden. Befinden sich im Innern der Zelle leitende oder potentialführende Teile, können diese die Hohlraumresonanzen verstimmen oder dämpfen.

$$f_{MNP} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{M}{a}\right)^2 + \left(\frac{N}{b}\right)^2 + \left(\frac{P}{c}\right)^2} \quad (20)$$

mit M,N,P Modenzahlen (ganzzahlig, 2 von 3 >0)
a,b,c Abmessungen der Hohlraums
c₀ Lichtgeschwindigkeit im freien Raum

Für die Triaxiale Zelle mit den Abmessungen 1000/150/150 mm ergibt sich die erste Resonanzfrequenz bei 1,414 GHz.

Auch bei den Messverfahren mit der Triaxialen Zelle werden die Änderungen der IEC 62153-4-3 und der IEC 62153-4-4 übernommen; d.h. auch hier gibt es jetzt drei verschiedene Möglichkeiten zur Messung des Kopplungswiderstandes. Die Schirmdämpfung kann jetzt auch in der Triaxialen Zelle mit Fehlanpassung zwischen Generator und Prüfling gemessen werden.

Zusätzlich besteht auch in der Triaxialen Zelle die Möglichkeit der Messung mit dem "Rohr im Rohr" Verfahren. Die Messung der Kopplungsdämpfung in der Triaxialen Zelle erfolgt in gleicher Weise wie die Messung im Rohr. Mit einem Netzwerkanalysator mit zwei Generatoren (Multiport-NWA) ist auch hier die Messung ohne Symmetrieübertrager (balunless) möglich.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Die Triaxialen Messverfahren zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirm- oder Kopplungsdämpfung bieten einfache Prüfverfahren für Kabel, Stecker und passive Komponenten in einem breiten Frequenzbereich von DC bis zu einigen GHz.

Die Normen der Triaxialverfahren der Reihe IEC 62153-4 wurden überarbeitet und an aktuelle Anforderungen bzw. an neue Anwendungen angepasst und erweitert. Sie repräsentieren den Stand der Technik bei der Messung der Schirmwirkung von Kabeln, Steckern und Komponenten.

Neue Prüfverfahren oder Prüfeinrichtungen wie z.B. die Triaxiale Zelle wurden eingeführt, neue Technologien, z. B. der Einsatz von Multi-Port Netzwerkanalysatoren ermöglichen eine schnelle und einfache Messung der Kopplungsdämpfung der geschirmten symmetrischen Kabel mit differentieller Speisung bis zu und über 2 GHz.

Die Vorteile der Triaxialverfahren im Vergleich mit anderen Prüfverfahren sind u.a. der breite Frequenzbereich von DC bis zu einigen GHz, der geschlossene Prüfaufbau und die einfache und leichte Vorbereitung von Prüfmustern und Prüfeinrichtungen. Auch niedrige Kopplungswiderstände und hohe Schirmdämpfungen können ohne den zusätzlichen Einsatz von Messkabinen gemessen werden.

Eine Weiterentwicklung der Triaxialverfahren könnte u.a. in der Messung der EMV von aktiven Komponenten bestehen; erste Versuch sind vielversprechend.

11 Literatur

- [1] Thomas Hähner, Bernhard Mund, "Balunless" Measurement of Coupling Attenuation of Balanced Cables & Components, Wire & Cable Technology international 07-2013.
- [2] Bernhard Mund, Thomas Schmid: Messen der Schirmdämpfung von Steckverbindern, Kabeldurchführungen und EMV-Dichtungen, 3. Anwenderkongress Steckverbinder 2009, Vogel Verlag, Würzburg.
- [2] Bernhard Mund: EMC of Cables & Connectors & Test methods, EMC Zurich 2007
- [3] Bernhard Mund: Measuring the EMC on RF-connectors and connecting hardware, Tube in tube test procedure, IWCS (International wire and cable symposium) 2004.
- [4] Otto Breitenbach, Thomas Hähner und Bernhard Mund: Kabelschirmung im Frequenzbereich von MHz bis GHz, erweiterte Anwendung eines einfachen Meßverfahrens, Frequenz 1-2/1999 S. 18-28.
- [5] Lauri Halme, Rauno 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.
- [6] Lauri Halme, Balint Szentkuti, The background for electromagnetic screening measurements of cylindrical screens. Tech. Rep. PTT(1988) No. 3.

12 Normen für Triaxialverfahren

Die Normen für die verschiedenen Triaxialverfahren sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1 – IEC 62153-4-x, Prüfverfahren mit triaxialer Prüfeinrichtung

	Prüfverfahren für metallische Kommunikationskabel - Elektromagnetisches Verhalten (EMV)
IEC/TR 62153-4-1Ed.3	Einführung in elektromagnetische Messungen der Schirmwirkung, (46/465e/DTS).
IEC 62153-4-3Ed.2	Kopplungswiderstand – Triaxialverfahren, (46/471/FDIS).
IEC 62153-4-4Ed.2	Geschirmtes Messverfahren zur Messung der Schirmdämpfung "as" bis zu und über 3 GHz, (46/439/CD).
IEC 62153-4-7	Messverfahren zur Messung des Kopplungswiderstandes und der Schirmdämpfung oder der Kopplungsdämpfung - Rohr-im-Rohr-Verfahren, (46/459/CD).
IEC 62153-4-9	Kopplungsdämpfung geschirmter symmetrischer Kabel – Triaxialverfahren, (Überarbeitung in Vorbereitung)
IEC 62153-4-10	Geschirmtes Messverfahren zur Messung der Schirmwirkung von Durchführungen und elektromagnetischen Dichtungen.
IEC 62153-4-15	Prüfverfahren zur Messung von Kopplungswiderstand und der Schirmdämpfung oder der Kopplungsdämpfung mit der Triaxialen Zelle, (46/454/CD).
IEC 62153-4-16	Technischer Bericht über die Beziehung von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung.
EN 50289-1-6	Kommunikationskabel - Spezifikationen für Prüfverfahren - Teil 1-6: Elektrische Prüfverfahren; Elektromagnetisches Verhalten.