

Messen der Schirmwirkung von HV-Leitungen mit der "Triaxialen Zelle"

Bernhard Mund,
bedea Berkenhoff & Drebes GmbH,
Herbornerstraße 100,
D-35614 Asslar, Germany,
bmund@bedea.com

Thomas Schmid,
Rosenberger HF-Technik,
Hauptstraße 1
D-83413 Fridolfing
thomas.schmid@rosenberger.de

Zusammenfassung und Einleitung

Die triaxialen Messverfahren zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung wurden ursprünglich für Kommunikationskabel entwickelt. Inzwischen wird auch für Energieleitungen und Anschluss-Schnüre z.B. für HV-Leitungen für Elektrofahrzeuge die Messung der Schirmwirkung gefordert.

Die mechanischen Abmessungen von Energieleitungen und Anschlusstechnik für Elektrofahrzeuge sind im Allgemeinen größer als übliche Abmessungen von Leitungen und Komponenten der Kommunikationstechnik.

Um auch größere Elemente messen zu können, wurde das Triaxialverfahren um die "Triaxiale Zelle" erweitert.

Neben den größeren Abmessungen weichen auch die Wellenwiderstände der Energieleitungen von den Wellenwiderständen der Kommunikationskabel ab. Während Kommunikationskabel üblicherweise standardisierte Wellenwiderstände von 50 Ohm bzw. 75 Ohm aufweisen, liegen die Wellenwiderstände von Energiekabeln und HV-Leitungen für Elektrofahrzeuge im Bereich von ca. 10 bis 12 Ohm. Je nachdem, ob mit Kurzschluss oder Anpassung gemessen wird, ergeben sich Rückwirkungen im System, die die Messung erheblich verfälschen können. Diese Betrachtung gilt sowohl für Messungen im Rohr als auch in der Triaxialen Zelle.

Im folgenden Bericht werden die Einsatzmöglichkeiten der Triaxialen Zelle diskutiert und Messungen mit der Zelle vorgestellt. Die Frage ob bzw. wann Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung mit oder ohne Anpassung gemessen werden kann, wird untersucht und ein neues Messverfahren "unmatch-match-short" zur Messung des Kopplungswiderstandes vorgestellt.

Triaxialverfahren, Messprinzip

Mit dem Triaxialverfahren kann mit einem Messaufbau sowohl der Kopplungswiderstand als auch die Schirmdämpfung (bzw. bei symmetrischen Kabeln die Kopplungsdämpfung) von DC bis zu 12 GHz gemessen werden.

Die Vorteile des Triaxialverfahrens gegenüber anderen Verfahren zur Messung der Schirmwirkung wurden auf dem letzten Steckerkongress ausführlich dargestellt, [1].

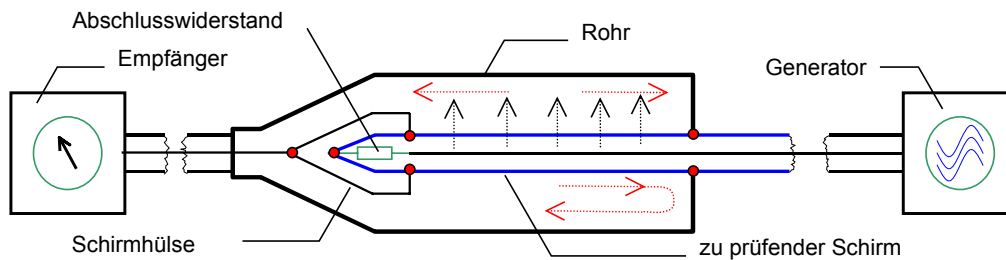


Bild 1a - Prinzipieller Aufbau zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung

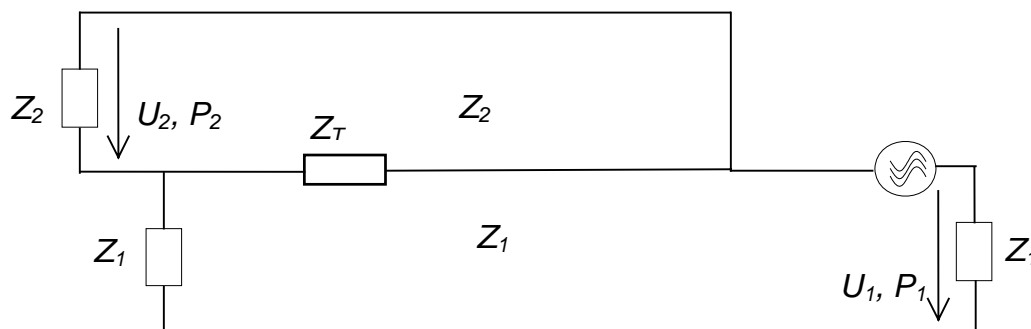


Bild 1b - Ersatzschaltbild des prinzipiellen Aufbaus der Messanordnung in Bild 1

Das zu prüfende Kabel wird an einem Ende mit einem Stecker und am anderen Ende mit einem Abschlusswiderstand versehen. Der Prüfling wird in das Rohr eingebaut und am senderseitigen Ende mit dem Rohr kurzgeschlossen. Über den Sender wird Energie in das Kabel bzw. in das innere System eingespeist.

Die aus dem Kabel bzw. dem inneren System austretende Energie breitet sich im äußeren System aus. Für die, zum sendernahen Ende laufende Welle entsteht am Kurzschluss eine Totalreflexion, so dass am Empfänger die Überlagerung aus hin- und rücklaufender Welle bzw. aus Nah- und Fernnebensprechen gemessen wird.

Bei tiefen Frequenzen ergibt sich über die Berechnung des Spannungsverhältnisses U_2/U_1 der Kopplungswiderstand Z_T .

$$Z_T \cdot l \approx Z_1 \cdot \left| \frac{U_2}{U_1} \right| \text{ wenn } Z_T \ll Z_1 \quad (1)$$

Das logarithmische Verhältnis von eingespeister Leistung P_1 zur gemessenen Leistung P_2 am Empfänger ist bei hohen Frequenzen die Schirmdämpfung a_s .

$$a_s = 10 \cdot \log \left(\left| \frac{P_2}{P_1} \right|_{\max} \right) = 20 \cdot \log \left(\left| \frac{U_2}{U_1} \right|_{\max} \right) \quad (2)$$

Um die Schirmdämpfung mit anderen Messverfahren vergleichen zu können wird das gemessene Leistungsverhältnis nach IEC 62153-4-4 auf den standardisierten Wellenwiderstand des äußeren Systems von 150Ω bezogen:

$$a_s = 20 \cdot \log\left(\left|\frac{U_2}{U_1}\right|_{\max}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot Z_s}{Z_1}\right) \quad (3)$$

wobei Z_1 den Wellenwiderstand des Prüflings darstellt und der Wellenwiderstand des Außenraumes Z_s 150 Ω beträgt. Bei der Beurteilung der Schirmwirkung gilt der Maximalwert bzw. der schlechteste Wert als Maß für die Schirmdämpfung.

Kopplungsübertragungsfunktion

Bei der Beurteilung der Schirmwirkung von Kabelschirmen wird, abhängig von der Länge bzw. von der Frequenz des Prüflings zwischen Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung unterschieden, [1], [2]. Die Kopplungsübertragungsfunktion T stellt den Verlauf von Kopplungswiderstand Z_T und Schirmdämpfung a_s eines Kabelschirms über der Frequenz dar.

Mit dem Triaxialverfahren kann die Kopplungsübertragungsfunktion sowohl im Rohr als auch in der Triaxialen Zelle mit einem Messaufbau gemessen werden.

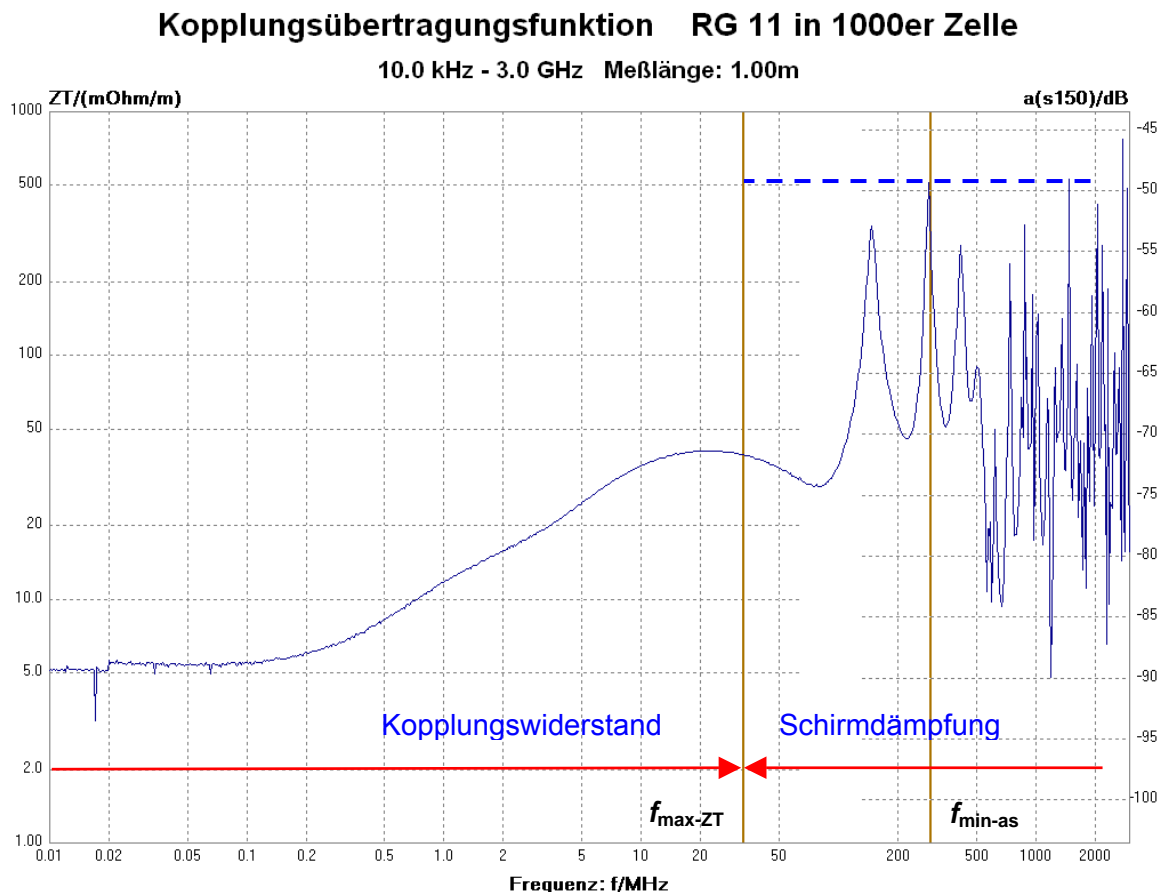


Bild 2 - Gemessene Kopplungsübertragungsfunktion T eines Geflechtsschirms in der triaxialen Zelle

Bei Gleichspannung bzw. bei sehr tiefen Frequenzen entspricht der Kopplungswiderstand des Kabelschirms seinem Gleichstromwiderstand. Im Bereich zwischen ca. 1 MHz und 10

MHz sinkt der Kopplungswiderstand durch Wirbelstromverluste im Schirm (bei "optimalen" Geflechten), um dann zu höheren Frequenzen hin mit ca. 20 dB/Dekade anzusteigen. Oberhalb der Grenzfrequenz $f_{\min-as}$ 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 Kabelschirms.

Die obere Grenzfrequenz zur Messung des Kopplungswiderstandes $f_{\max-ZT}$ berechnet sich nach EN 50289-1-6 zu:

$$f_{\max-ZT} \leq \frac{50 \cdot 10^6}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} \cdot L_c} \quad (4)$$

Die untere Grenzfrequenz zur Messung der Schirmdämpfung $f_{\min-as}$ berechnet sich nach EN 50289-1-6 zu:

$$f_{\min-as} \geq \frac{c_0}{2 \cdot \left| \sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}} \right| \cdot L_c} \quad (5)$$

mit

c_0	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts im freien Raum
ε_{r1}	relative Dielektrizitätskonstante des Dielektrikums des Kabels
ε_{r2}	relative Dielektrizitätskonstante des äusseren Systems
L_c	Kopplungslänge

In Bild 2 sind die Grenzfrequenzen von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung nach EN 50289-1-6 eingezeichnet. Für einen 1m langen Prüfling mit einer relativen Dielektrizitätskonstanten ε_r von 2,28 ergibt sich damit im Bereich von ca. 30 MHz bis ca. 300 MHz eine "Grauzone" bzw. ein undefinierter Bereich, der aber bei vielen Anwendungen von besonderem Interesse ist. Dieser undefinierte Bereich lässt sich im Prinzip durch Variation der Länge des Prüflings und der damit verbundene Verschiebung der Grenzfrequenzen erfassen.

Eine Verkürzung oder Verlängerung des Prüflings zur Messung der Schirmwirkung ist aber nicht immer sinnvoll und im Fall von konfektionierten Kabeln mit fester Länge oder im Fall von Bauteilen nicht möglich. Es stellt sich daher die Frage, in welcher Weise die in Bild 2 dargestellte Kopplungsübertragungsfunktion zur Beurteilung der Schirmwirkung von Prüflingen herangezogen werden kann.

Bei der anstehenden Überarbeitung der IEC 62153-4-7, "Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung von Steckern und Assemblies mit dem Triaxialverfahren" durch die Arbeitsgruppe IEC TC 46/WG 5 ist die Einführung der "Kopplungsübertragungsfunktion" zu diskutieren. Die Messlänge kann dafür z.B. auf eine Länge von 1m festgelegt werden. Der Wert des Minimums der Schirmdämpfung bei der Grenzfrequenz $f_{\min-as}$ wird bis zur Frequenz $f_{\max-ZT}$ verlängert und gilt ab hier als Wert der Schirmdämpfung. Damit ist die Schirmwirkung des Prüflings, bestehend aus Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung über den gesamten Messbereich eindeutig beschrieben, siehe Bild 2.

Zusätzlich kann mit dem weiter unten beschriebenen neuen Messverfahren zur Messung des Kopplungswiderstandes nach IEC 62153-4-3 Ed.2 "unmatch-match-short" die obere Grenzfrequenz zur Messung des Kopplungswiderstandes $f_{\max-ZT}$ zu höheren Frequenzen hin verschoben und damit der unsichere Bereich verkleinert werden.

Zum Vergleich unterschiedlicher Prüflinge und zur Qualifizierung zur Einhaltung festgelegter Grenzwerte ist die in Bild 2 vorgeschlagene Anwendung der Kopplungsübertragungsfunktion auf jeden Fall geeignet.

Triaxiale Zelle

Größere Stecker und Anschluss-Schnüre passen nicht in die, ursprünglich für Kommunikationskabel entwickelten, handelsüblichen Messrohre des Triaxialverfahrens. Zur Messung der Schirmwirkung größerer Bauteile wurde daher in Zusammenarbeit mit den Firmen bedea und Rosenberger die "Triaxiale Zelle" entwickelt. 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 und Anschluss-Schnüre kann somit in der "Triaxiale Zelle" oder in einer Kombination aus Rohr und Zelle gemessen werden.

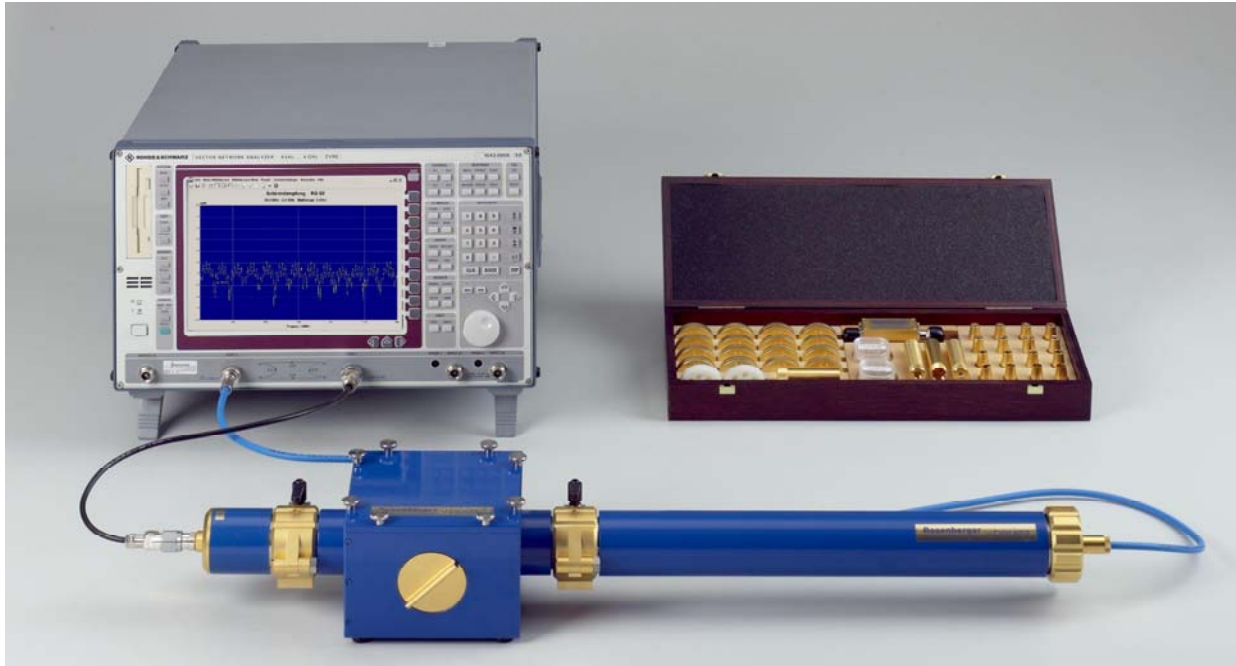


Bild 3 – Messen von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung von Steckern und konfektionierten Kabeln mit "Triaxialer Zelle" und Rohr im Rohr nach IEC 62153-4-7

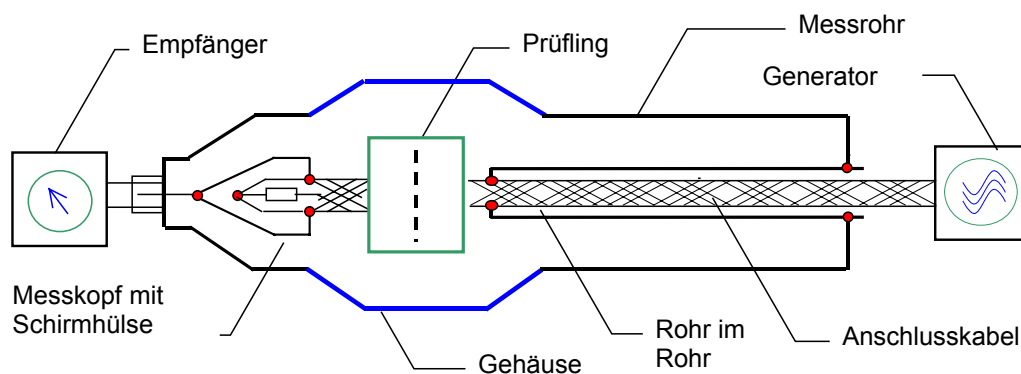


Bild 4 – Prinzipdarstellung, "Triaxiale Zelle" zur Messung von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung an konfektionierten HV-Leitungen mit Rohr im Rohr nach IEC 62153-4-7

Zu Beachten ist dabei der Übergang des Rohres zum Gehäuse sowie die Größe des Gehäuses. Beim Übergang vom Rohr zum Gehäuse können durch die Veränderung des Wellenwiderstandes Reflexionen (im Aussenraum) auftreten, Die Ebene des Kurzschlusses am sendernahen Ende sollte daher möglichst direkt an der Gehäuswand liegen, ohne ein zusätzliches Rohr anzufügen. An der Empfängerseite sollte der Übergang vom Gehäuse zum koaxialen 50 Ohm System ebenfalls direkt an der Gehäuswand erfolgen.



Bild 5 – Verschiedene Ausführungen Triaxialer Zellen

Grenzfrequenzen, Höhere Moden

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.

$$f_{MNP} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{M}{a}\right)^2 + \left(\frac{N}{b}\right)^2 + \left(\frac{P}{c}\right)^2} \quad (6)$$

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

Für die Abmessungen der Triaxialen Zellen mit 136/136/99 mm, 750/250/250 mm und 1000/300/300 mm sind die ersten auftretenden Resonanzen bis 3 GHz wie in Tabelle 1 dargestellt, zu erwarten. Da bei der Messung der Prüfling durch die Zelle geführt ist, was zu einer Verstimmung des Resonators führt, können die tatsächlich auftretenden Resonanzen von den errechneten Werten abweichen.

Messungen von Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung an einem Kabel des Typs RG 11 in der Triaxialen Zelle mit 1m Messlänge liefern bis zur ersten Resonanzfrequenz nach Tabelle 1 bei ca. 720 MHz die gleichen Ergebnisse wie die Messungen im Rohr.

Tabelle 1 – Resonanzfrequenzen verschiedener Triaxialer Zellen

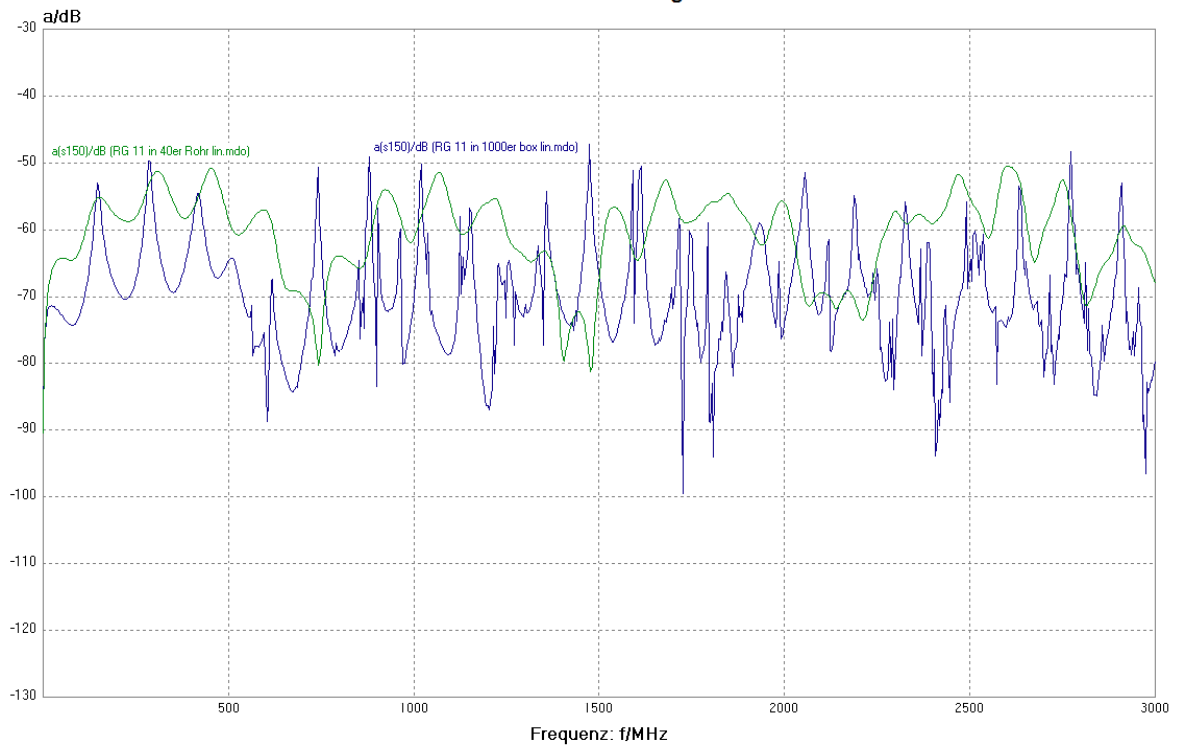
136-er Zelle				750-er Zelle				1000-er Zelle			
a	b	c		a	b	c		a	b	c	
136	136	99		750	250	250		1000	300	300	
m	n	p	f/GHz	m	n	p	f/GHz	m	n	p	f/GHz
1	1	1	2,17	1	1	1	0,87	1	1	1	0,72
1	2	0	2,47	1	2	0	1,22	1	2	0	1,01
0	2	1	2,68	0	2	1	1,34	0	2	1	1,12
1	2	1	2,89	1	2	1	1,36	1	2	1	1,13
2	2	0	3,12	2	2	0	1,26	2	2	0	1,04
0	1	2	3,22	0	1	2	1,34	0	1	2	1,12
1	1	2	3,41	1	1	2	1,36	1	1	2	1,13
2	2	1	3,47	2	2	1	1,40	2	2	1	1,16
0	2	2	3,75	0	2	2	1,70	0	2	2	1,41
1	2	2	3,91	1	2	2	1,71	1	2	2	1,42
2	3	0	3,98	2	3	0	1,84	2	3	0	1,53

In Bild 6 sind Messungen der Schirmdämpfung in der 1000er Zelle und dem triaxialen Rohr gegenübergestellt. Bis zu der errechneten ersten Resonanzfrequenz von ca. 720 MHz ergeben sich keine Abweichungen in den Messkurven. Oberhalb der ersten Resonanzfrequenz ergeben sich Abweichungen im Kurvenverlauf, deren Maximalwerte beim gemessenen RG 11 Kabel um weniger als 3 dB abweichen. Das Verhalten von Prüflingen mit komplexen Geometrien ist Gegenstand weiterer Diskussionen.

Die Messung der Schirmwirkung von Steckern und konfektionierten Kabeln in der Triaxialen Zelle Kabeln soll bei der anstehenden Überarbeitung der IEC 62153-4-7, Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung von Steckern und Assemblies als zusätzliches Messverfahren beschrieben werden.

Schirmdämpfung RG 11 in Rohr und in 1000er Zelle

10.0 kHz - 3.0 GHz Meßlänge: 1.00m



Kopplungsübertragungsfunktion RG 11 in Rohr und in 1000er Zelle

Kopplungswiderstand
 Z_T /(mOhm/m)

10.0 kHz - 3.0 GHz Meßlänge: 1.00m

Schirmdämpfung
 $a_s(150)$ /dB

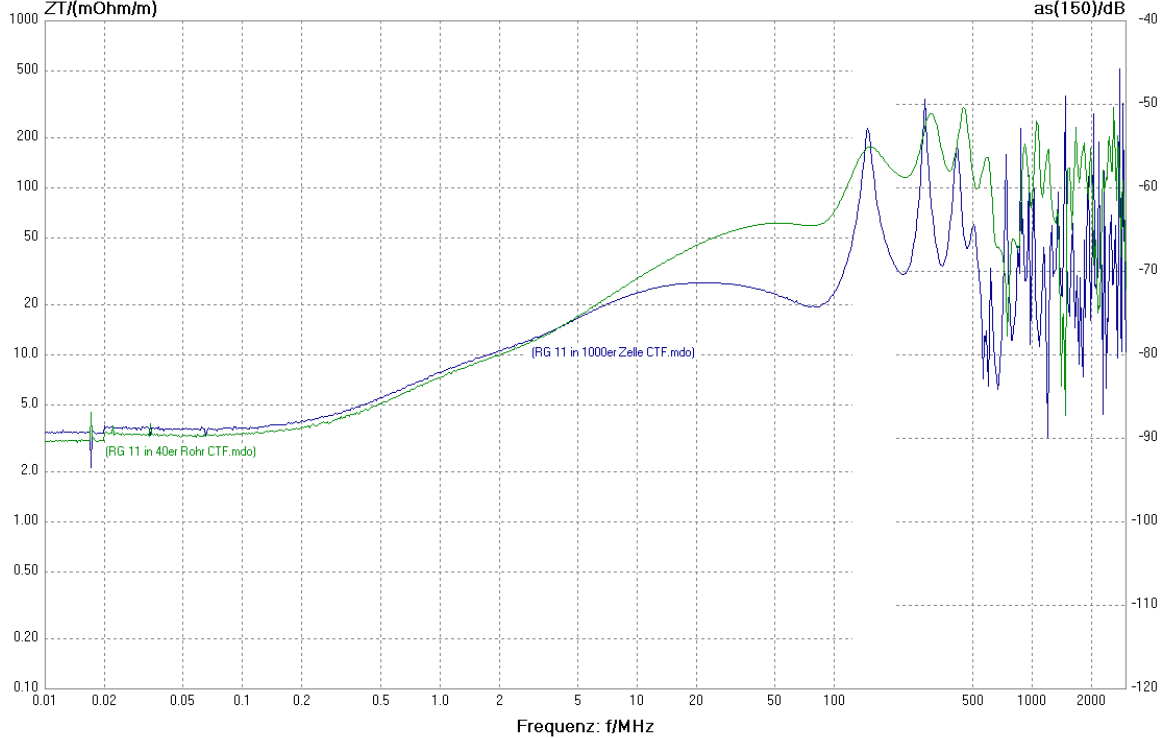


Bild 6 – Vergleich der Messungen im Rohr und in der Zelle mit einem RG 11 -Kabel mit Einfachgeflecht

Einfluss der Lastbedingungen im inneren System

Die Wahl der Lasten im System hat einen großen Einfluss auf die Ausprägung der Verkopplung des inneren Systems mit dem äußeren System und umgekehrt. Dies gilt sowohl für real aufgebaute geschirmte elektrische Anlagen und Systeme als auch für die Messung der Schirmwirkung mit dem Triaxialverfahren.

Beim triaxialen Messaufbau nach Bild 1 bezeichnet man den Prüfling (zusammengesetzt aus Generator, Innenleiter, Isoliermaterial, Aussenleiter und Lastwiderstand) als inneres System und die Messumgebung (zusammengesetzt aus Empfänger, Prüflingsaussenleiter, Luftraum, Messrohr und Kurzschluss als Lastimpedanz) als äusseres System.

Im folgenden wird der Einfluss der im inneren System verwendeten Lastimpedanzen auf die Messergebnisse diskutiert.

Als dominanter Effekt bei Schirmungsproblemen bei Kabeln und Steckverbindern wird im Allgemeinen die galvanische Verkopplung der Systeme über die Transferimpedanz des Kabelschirms bzw. des Steckeraussenleiters betrachtet. Hier gilt bei der Ermittlung der Transferimpedanz der einfache Zusammenhang:

$$Z_T = \frac{U_2}{I_1} \quad (7)$$

Dies verdeutlicht unmittelbar das eigentliche Schirmungsproblem. Sobald im inneren System ein Strom I_1 durch den Schirm mit Z_T fließt, fällt am äusseren System eine Spannung U_2 ab. Diese Spannung ist die im äusseren System wirkende Störquelle.

Andererseits gilt aber auch, je höher der Strom durch den Schirm, um so höher die Emission. Wenn man die Stromverteilung im inneren System, also im Prüfling, betrachtet, so stellen sich einfache klar zu erkennende Zustände nur für den Fall der Anpassung ein. Hierbei sind Strom und Spannung in Phase und über die Leitungsimpedanz fest verknüpft.

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1} \quad (8)$$

Verlässt man nun den (Sonder-)Fall der Anpassung und verändert die Lastimpedanzen, so wird diese einfache Verknüpfung ungültig und eine genauere Betrachtung wird nötig. Bild 7 verdeutlicht die Situation. Der Generator mit dem Innenwiderstand Z_G ist an den Prüfling der Länge L angeschlossen. Der Prüfling besitzt die Leitungsimpedanz Z_1 , die Ausbreitungskonstante γ und ist mit der Last R_1 abgeschlossen.

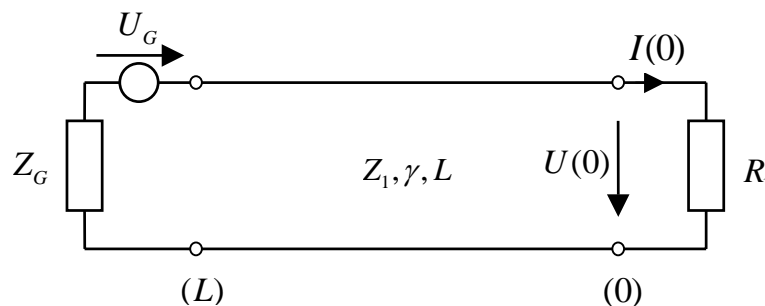


Bild 7 – Inneres System mit Quell- und Lastimpedanzen abgeschlossen

Der Strom $I(0)$ an der Last berechnet sich hierfür nach [8] wie folgt:

$$I(0) = \frac{U_G}{R_1 \cdot [\cosh(\gamma L) + \frac{Z_G}{Z_1} \sinh(\gamma L)] + Z_1 \cdot [\sinh(\gamma L) + \frac{Z_G}{Z_1} \cosh(\gamma L)]}$$

Nun kann mit Hilfe der allgemeinen Leitungstheorie die Stromstärke in Abhängigkeit des Ortes x angegeben werden.

$$I(x) = I(0) \cdot \cosh(\gamma x) + U(0) / Z_1 \cdot \sinh(\gamma x)$$

Für den Fall des Kurzschlusses bzw. des Leerlaufs an einem niederohmigen Prüfling mit $Z_1 = 10 \text{ Ohm}$ (z.B. HV-Kabel) mit der Länge von 1 Meter bzw. 2 Metern ergeben sich nun folgende Stromverteilungen entlang der Leitung in Abhängigkeit der Frequenz (Bild 8 und 9).

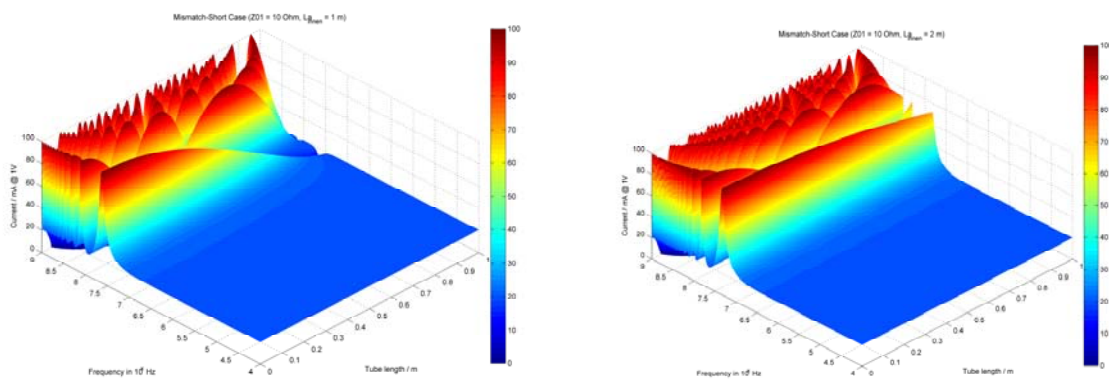


Bild 8 – Örtliche Stromverteilung in Abhängigkeit der Frequenz beim Kurzschluss links Prüflingslänge 1m, rechts Prüflingslänge 2m

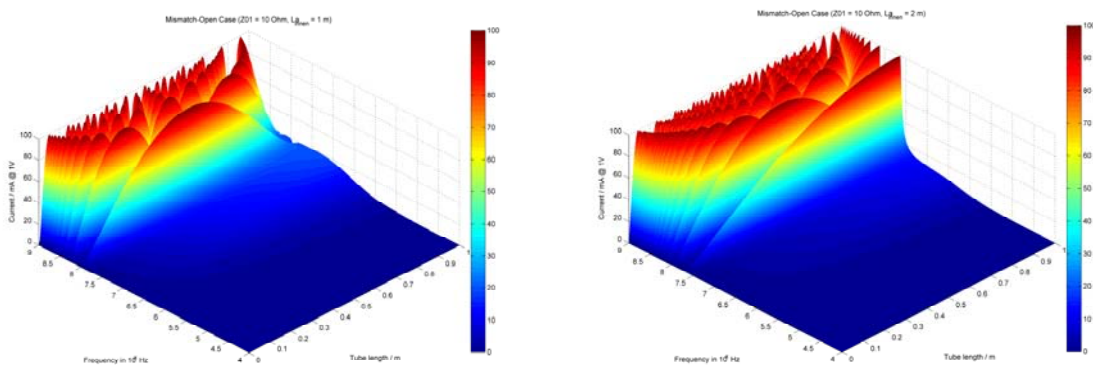


Bild 9 – Örtliche Stromverteilung in Abhängigkeit der Frequenz beim Leerlauf links Prüflingslänge 1m, rechts Prüflingslänge 2m

Bei bestimmten Frequenzen ergeben sich erhebliche ortsabhängige Stromüberhöhungen. Die Höhe des Maximums der Stromüberhöhung im Vergleich zur Stromstärke beim einseitig angepassten Zustand ($Z_1 = Z_G$) ist durch die einfache Beziehung

$$I_{\max}(Z_1) / I_{\max}(Z_1=Z_G) = Z_G / Z_1$$

gegeben, sie ist also umgekehrt zum Verhältnis der Impedanzen des Generators und des Prüflings. Für den nicht angepassten Prüfling mit einer Leitungsimpedanz von $Z_1 = 10 \text{ Ohm}$ erhalten wir damit bei Kurzschluss oder Leerlauf lokale maximale Stromüberhöhungen, die den Faktor 5 aufweisen.

Auswirkung der Lastbedingung auf die Messung

Im realen Messaufbau können in Bild 10 für den Fall eines 1 Meter langen HV-Kabels mit $Z_1 = 10 \text{ Ohm}$ für die Lastarten Leerlauf, Kurzschluss und Anpassung folgende Ergebnisse beobachtet werden.

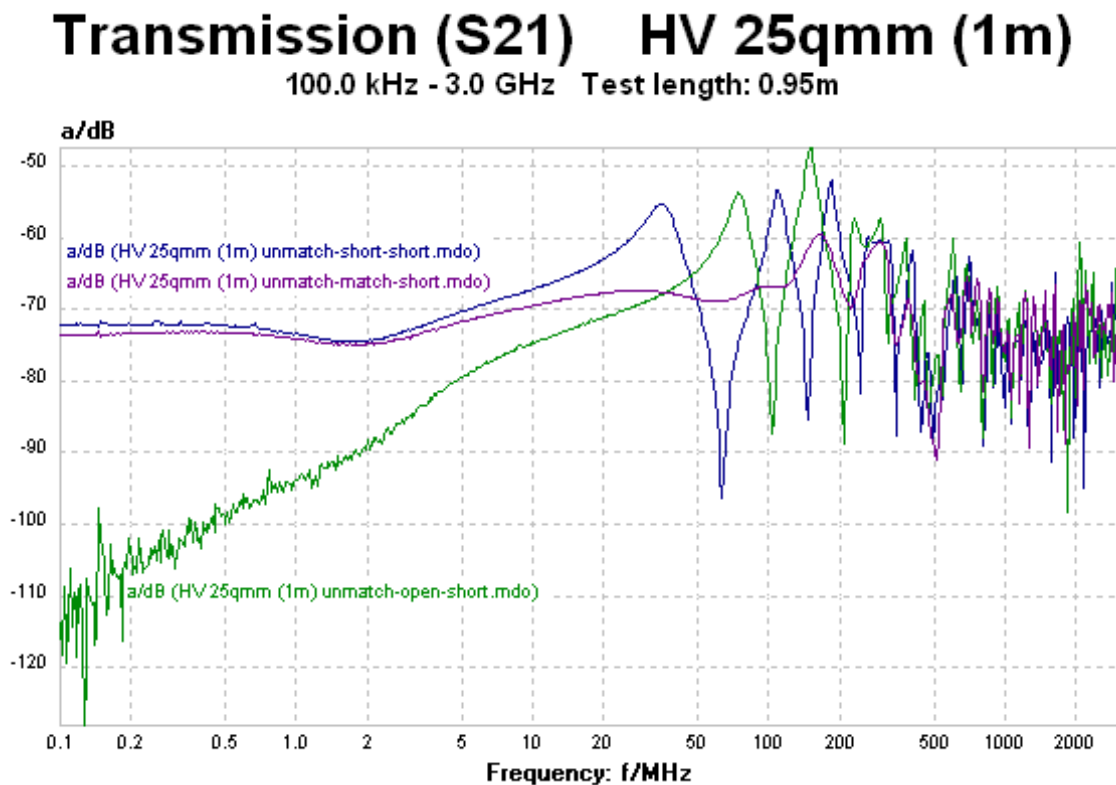


Bild 10 – Vergleich der Schirmwirkung von HV Kabeln mit unterschiedlichen Lastbedingungen

Während die Messung mit angepasstem Prüfling ($R_1 = 10 \text{ Ohm}$, violette Kurve) einen glatten Kopplungsverlauf (Transmission S_{21}) bis zu 100 MHz zeigt, sehen wir bei Kurzschluss ($R_1 = 0 \text{ Ohm}$, blaue Kurve) ein erstes Resonanzmaximum bei ca. 40 MHz. Weitere Maxima folgen bei $3 \cdot 40 \text{ MHz}$ und $5 \cdot 40 \text{ MHz}$, d.h. bei ungeraden Vielfachen der ersten Kurzschlussresonanzfrequenz. Beim Leerlauf ($R_1 = \infty \text{ Ohm}$, grüne Kurve) finden wir eine erste Resonanz bei ca. 80 MHz, eine zweite bei ca. 160 MHz. Eine dritte deutet sich bei ca. 240 MHz an, d.h. die Resonanzen bilden sich bei ganzzahligen Vielfachen der ersten Leerlaufresonanzfrequenz.

Ausgedrückt in Wellenlängen, die innerhalb der Prüflingslänge Platz finden, treten die Resonanzen wie folgt auf:

Kurzschluss: ungeradzahlige Vielfache von $\lambda/4$
 Leerlauf: ganzzahlige Vielfache von $\lambda/2$

Die Größe der Resonanzüberhöhung beträgt bis zu +14dB, was dem Faktor 5 (bei Spannungsmessung) entspricht. Dies deckt sich exakt mit der theoretisch ermittelten maximalen Stromüberhöhung im inneren System.

Überarbeitung der Norm IEC62153-4-3: Messung der Transferimpedanz

Im ersten Entwurf der neuen IEC 62153-4-3 2.Ed. (46/371/CD) werden die oben dargestellten Zusammenhänge berücksichtigt. Es wird u.a. eine zusätzliche Methode mit der Lastbedingung "unmatch-match-short" aufgenommen. Diese Methode ermöglicht die direkte fehlangepasste Kontaktierung des Prüflings mit dem Generator unter Verwendung einer angepassten inneren Last R_1 . Hiermit kann die Transferimpedanz von HV-Kabeln ohne die Verwendung einer Anpass-Schaltung gemessen werden, wobei die oben beschriebenen Resonanzüberhöhungen bei "unmatched-short-short" vermieden werden können. Dies wird möglich durch die Verwendung neuer Umrechnungsvorschriften für die Ermittlung von Z_T aus der gemessenen Transmission S_{21} .

Die obere Grenzfrequenz $f_{\max-ZT}$ kann mit dem Verfahren "unmatch-match-short" zu höheren Frequenzen hin erweitert werden. Die Betrachtungen des neuen Verfahrens "unmatch-match-short" gelten sowohl für Messungen des Kopplungswiderstandes mit dem bekannten Triaxialen Messverfahren als auch bei Messungen in der Triaxialen Zelle.

Die Funktion "Kopplungsübertragungsfunktion" sowie die Änderungen der IEC 62153-4-2Ed2 sind bereits in der aktuellen Version der Mess- und Auswerte-Software WinCoMeT integriert.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Dr. Gunnar Armbrrecht für die Implementierung der Mathematik der orts aufgelösten Stromstärken bei frei gewählten Lasten und bei Herrn Dr. Lauri Halme für das Korrekturlesen.

Literatur

- [1] Bernhard Mund, EMV von Steckverbindern und Verbindungskabeln, 4. Anwenderkongress Steckverbinder 2010, Vogel Verlag, Würzburg,
- [2] Bernhard Mund, Thomas Schmid: Messen der Schirmdämpfung von Steckverbindern, Kabeldurchführungen und EMV-Dichtungen, 3. Anwenderkongress Steckverbinder 2009, Vogel Verlag, Würzburg
- [3] Bernhard Mund: Measuring the EMC on RF-connectors and connecting hardware, Tube in tube test procedure, IWCS (International wire & cable symposium) 2004, Philadelphia
- [4] Thomas Hähner und Bernhard Mund: Measurement of the screening effectiveness of connectors & cable assemblies: International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2002
- [5] Thomas Hähner und Bernhard Mund: Background, content and future of the EMC measurement standard prEN 50289-1-6, Open / shielded test methods, International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2000
- [6] 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.
- [7] Lauri Halme, Rauno Kytönen, "Background and introduction to EM screening (shielding) behaviours and measurements of coaxial and symmetrical cables, cable assemblies and connectors", IEE Colloquium on screening effectiveness measurements, Savoy Place London, 6 May 1998
- [8] F.M. Tesche et al: EMC Analysis Methods, Wiley, 1997
- [9] Prof. Dr. Münzner et. al., Untersuchungen und Simulation an Triaxialer Zelle, Hochschule Ulm

Normen:

- | | |
|---------------|--|
| EN 50289-1-6 | EMV von Kommunikationskabeln, (Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung mit dem Triaxialverfahren, Kopplungswiderstand mit Speisedrahtverfahren, Schirmdämpfung mit Absorberzangen). |
| IEC 62153-4-1 | Einführung in die elektromagnetische Messungen der Schirmwirkung. |
| IEC 62153-4-3 | Kopplungswiderstand, Triaxialverfahren. |
| IEC 62153-4-4 | Schirmdämpfung, Triaxialverfahren. |
| IEC 62153-4-7 | Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung an Steckern und konfektionierten Kabeln, Rohr im Rohr-Verfahren. |
| IEC 62153-4-9 | Kopplungsdämpfung, -Triaxial-Verfahren |