

Vergleich von Messverfahren zur Bestimmung der Kabelschirmdämpfung bis 20 GHz

Prof. Dr.-Ing. Michael Hillgärtner, FH Aachen, Deutschland

B.Eng. Tim Tebart, FH Aachen, Deutschland

Dipl.-Ing.(FH) Thomas Schmid, Rosenberger Hochfrequenz GmbH & Co. KG, Deutschland

M.Sc. Benjamin Pastötter, Rosenberger Hochfrequenz GmbH & Co. KG, Deutschland

1 Einleitung und Stand der Technik

Die Schirmdämpfung von geschirmten Signalleitungen ist für moderne Systeme von entscheidender Bedeutung. Aufgrund immer höherer Datenraten und somit steigender Nutzsignalfrequenzen sowie der Nutzung von Funkdiensten in Frequenzbereichen oberhalb von 5 GHz wird eine sichere Bestimmung der Kabelschirmdämpfung im Frequenzbereich bis 20 GHz oder auch darüber hinaus immer wichtiger.

Die Normung sieht hierfür Messungen in einem triaxialen Aufbau [1], [2] oder in Modenverwirbelungskammern [3] vor. In [4] ist ein erster Vergleich der Verfahren durchgeführt worden, allerdings sind nur Ergebnisse bis 1 GHz an einer realen Kabelprobe zwischen den Verfahren verglichen worden, da das Hauptaugenmerk der Arbeit auf der Entwicklung eines zeiteffizienten Messverfahrens in der Modenverwirbelungskammer lag. Dieses ist nun in der entsprechenden Norm auch verankert.[3].

Um die beiden Verfahren besser vergleichen zu können, sind im Rahmen dieser Arbeit Musterprüflinge aufgebaut worden, deren Kabelschirmdämpfungsverhalten analytisch berechnet werden können.

1.1 Definition der Kabelschirmdämpfung

Ein hochfrequenter Strom im Innenleiter kann zur Abstrahlung elektromagnetischer Wellen in den Außenraum führen. Umgekehrt können von außen einstrahlende elektromagnetische Wellen Mantelströme induzieren, welche auf den Innenleiter koppeln.

Aus der gegebenen Reziprozität wird die Kabelschirmdämpfung a_s als das mit 10 multiplizierte logarithmische Verhältnis der zugeführten Leistung P_1 zur ausgekoppelten Leistung P_2 definiert [2], [3]:

$$a_s = 10 \cdot \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (1.1)$$

Je nach Länge der zu untersuchenden Kabeln wird nach [5] zwischen der Kopplungsimpedanz und der Kabelschirmdämpfung unterscheiden. Bei elektrisch langen Strukturen wird die Kabelschirmdämpfung zur Qualitätsbeurteilung der Schirmungseigenschaften herangezogen, für elektrisch kurze Strukturen, also niedrige Frequenzen hingegen die Kopplungsimpedanz. Beide Werte können ineinander umgerechnet werden [6].

Die jeweils an den Messtoren ermittelte Leistung ist maßgeblich von der Abschlussimpedanz der verwendeten Messsysteme abhängig. Diese liegt sowohl beim triaxialen Verfahren, als auch bei der Messung in der Modenverwirbelungskammer bei 50Ω , da hier der Abschluss der jeweiligen HF-Messgeräte direkt mit dem Messtor verbunden wird. Im Absorberzangenverfahren [7], welches bereits länger angewendet wird, als die beiden hier untersuchten Verfahren, ergibt sich aufbaubedingt eine Abschlussimpedanz von je ca. 150Ω . Daher sieht, zur besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Messverfahren, die Norm zum triaxialen Messverfahren eine Anpassung der gemessenen Übertragungswerte S_{21} um $+7,8$ dB vor, damit die so bestimmten Werte mit denen aus dem bereits länger angewendeten Absorberzangenverfahren verglichen werden können [1]. Eine entsprechende Anpassung der Messwerte ist in der Norm zur Messung in der Modenverwirbelungskammer nicht vorgesehen [3].

1.2 Triaxiales Messverfahren

Das in [1] und [2] beschriebene triaxiale Messverfahren eignet sich sowohl zur Bestimmung der Kabelschirmdämpfung wie auch der Kopplungsimpedanz. Dabei wird das zu untersuchende Koaxialkabel zentrisch in ein Rohr eingebracht. Durch die sich ergebenden konzentrischen Achsen der drei Systeme (Innen- und Außenleiter des Koaxialkabels sowie dem umgebenden Rohr) erklärt sich der Name. Das zu untersuchende Koaxialkabel wird an einem Ende mit seinem Wellenwiderstand Z_L , der sich aus der Geometrie des Kabels ergibt, abgeschlossen (rechtes Ende in Abbildung 1). Dabei ist darauf zu achten, dass der Abschluss HF-dicht ausgeführt wird, da es ansonsten zu verfälschten Messergebnissen kommen kann. Das äußere System, bestehend aus dem Kabelmantel und dem Rohr wird am anderen Ende des Aufbaus kurzgeschlossen (linkes Ende in Abbildung 1). Auf der Seite des Kurzschlusses zwischen Kabelschirm und Rohr wird nun eine Leistung P_1 eingepreßt. Aufgrund der endlichen Schirmwirkung des koaxialen Kabels koppelt ein Teil der Leistung in das äußere System aus Kabelschirm und Rohr ein, welche am Empfänger gemessen werden. Aus der so gemessenen Leistung P_2 kann dann die Schirmdämpfung berechnet werden (1.1).

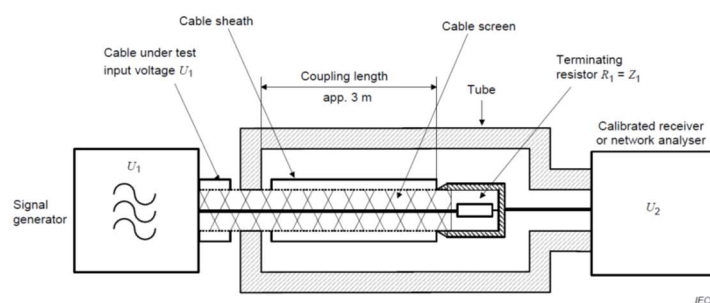


Abbildung 1: Triaxialer Aufbau zur Bestimmung der Schirmdämpfung von koaxialen Kabeln [1]

1.3 Messungen in der Modenverwirbelungskammer

Bei der Modenverwirbelungskammer handelt es sich um einen multimodalen Hohlraumresonator. Durch gezieltes Verändern der Randbedingungen, z.B. durch einen metallischen, nicht-symmetrischen Modenrührer können bei hinreichender Modenanzahl mehrere Resonanzstellen bei einer festen Frequenz angeregt werden. Durch eine kontinuierliche Veränderung der Randbedingungen kann die Gewichtung der Anregung der unterschiedlichen Resonanzstellen derart verändert werden, dass sich ab einer unteren Grenzfrequenz, welche durch die Größe der Kammer bedingt ist, statistisch gesehen homogene Felder ergeben [8], [9]. Da die sich ergebenden Felder isotrop sind, eignen sich Modenverwirbelungskammern besonders gut zur Messung der vollständig abgestrahlten Leistung eines Prüflings und somit zur Bestimmung der Schirmdämpfung einer schirmenden Struktur.

Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 2 gegeben. Dabei ist es egal, ob die Leistung in eine der beiden Antennen der Kammer eingespeist und am Kabel die eingekoppelte Leistung gemessen wird, oder aber die Leistung in das zu untersuchende Kabel eingespeist und die emittierte Leistung an einer der beiden Antennen gemessen wird.

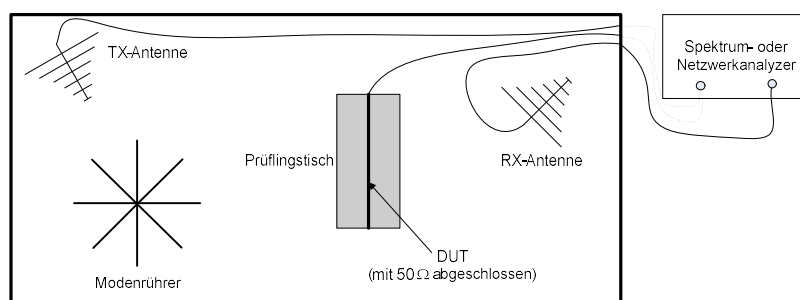


Abbildung 2: Aufbau zur Bestimmung der Kabelschirmdämpfung nach dem Strahlungskammerverfahren [4]

Es ist darauf zu achten, dass die verwendeten Zuleitungen eine höhere Schirmdämpfung haben als der zu untersuchende Prüfling. Da die Verluste der Kammer mit steigender Frequenz und Größe der Kammer zunehmen, ist insbesondere für Messungen bei hohen Frequenzen eine möglichst kleine Kammer zu verwenden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die in [3] und [4] vorgestellte zeiteffiziente Messmethode verwendet. Hierbei wird der Modenrührer kontinuierlich gedreht und der zu untersuchende Frequenzbereich kontinuierlich durchgesweept, wobei Sender und Empfänger synchronisiert sind. Durch die Verwendung der MaxHold Funktion im Empfänger wird die maximal emittierte Leistung aufgenommen, wenn der Sweep hinreichend oft durchgeführt wird.

Um den Einfluss der Kammer und des Aufbaus aus dem Messergebnis zu eliminieren, wird vor der Messung der vom Prüfling maximal emittierten Leistung das Übertragungsverhalten innerhalb der Kammer auf dieselbe Art vermessen, wobei der Sender an eine zusätzliche Antenne angeschlossen wird. Somit werden sowohl die Verluste auf den Zuleitungen als auch die Wand- und Antennenverluste aus dem Messergebnis herausgerechnet. Die Ergebnisse dieser Referenzmessung werden von den Ergebnissen der DUT Messung abgezogen.

2 Vergleichende Untersuchungen an Musterprüflingen

Bei den Musterprüflingen handelt es sich um 30 cm lange Semi-Rigid Leitungen Typ UT-141-SATP-M17 mit verschiedener Anzahl an Löchern im Schirm als definierten Koppelstellen. Das geschlossene Semi-Rigid Kabel ist in Bezug auf die Schirmdämpfung vergleichbar mit einem idealen Rohr, so dass die Schirmdämpfung deutlich oberhalb der zur Verfügung stehenden Messdynamik liegt. Schirmdämpfungswerte unterhalb von 100 dB werden also von den in den Schirm eingebrachten Löchern verursacht.

In Abbildung 3 sind die untersuchten Prüflinge dargestellt, wobei die Löcher jeweils einen Durchmesser von 1 mm haben. Prüfling **1** hat mittig ein Loch, Prüfling **2** zwei um 180° versetzte mittige Löcher, Prüfling **3** vier um 90° versetzte mittige Löcher. Somit besitzen die Prüflinge **1-3** eine Koppelzone in der Mitte der Leitung, wobei der Begriff Koppelzone eine oder mehrere Koppelstellen an einer Position in Längsrichtung der Leitung beschreibt.

Die Prüflinge **4** und **5** besitzen jeweils 2 Löcher mit einem Abstand in Längsrichtung von 1 bzw. 6 cm. Es liegen somit zwei Koppelzonen vor. Bei den Prüflingen **6** und **7** sind vier Löcher mit einem jeweiligen Abstand in Längsrichtung von 1 cm bzw. 6 cm, also vier Koppelzonen, und im Prüfling **8** sieben Löcher mit einem Abstand von 3 cm und daher 7 Koppelzonen.

Bei der Leitung **9** in Abbildung 3 ist der Schirm vollständig entfernt. Er kann als alternative Antenne während der Kalibrierung des Aufbaus verwendet werden.



Abbildung 3: Musterprüflinge aus UT-141-SATP-M17 Kabel mit einer (**1-3**), zwei (**4-5**), vier (**6-7**) bzw. sieben (**8**) Koppelzonen und ungeschirmter Referenzleitung **9**.

2.1 Berechnung der Schirmdämpfung

Da die geschlossene Semi-Rigid Leitung als idealer Schirm angesehen werden kann, beschränkt sich die Größe der Koppelstellen im Schirm auf die Löcher mit 1 mm Durchmesser. Diese können bis zu einer Frequenz von 21,2 GHz als elektrisch kurz angesehen werden, so dass die Schirmdämpfung, welche sich aus den Löchern ergibt, nach [11] berechnet werden und unter

Bezugnahme von [10] auf den gesamten Prüfling übertragen werden kann. Eine ausführliche Herleitung ist in [12] gegeben.

2.2 Bestimmung der Schirmdämpfung auf Basis von 3D-Feldsimulationen

Durch Import der 3D CAD Modelle der Prüflinge (vgl. Abbildung 3) in die Simulationssoftware CST Studio kann ein Simulationsmodell zur Bestimmung der Schirmdämpfung auf Basis von 3D-Feldsimulationen aufgebaut werden. Die CAD Daten werden mit einem in Abbildung 4 dargestellten Gitterzellennetz (Mesh) in einzelne Volumenelemente unterteilt, für die dann die Feldgleichungen numerisch gelöst werden. Dabei wird keine Leitfähigkeit der leitenden Strukturen angegeben, vereinfachend wird mit einem verlustfreien Leiter gerechnet (PEC), da ein Vergleich mit verlustbehafteten Kupfer keine nennenswerten Unterschiede erkennen ließ, aber zu einer deutlich größeren Rechenzeit führte. Für das Dielektrikum wird gemäß Datenblatt der verwendeten Leitungen verlustbehaftetes PTFE angenommen.

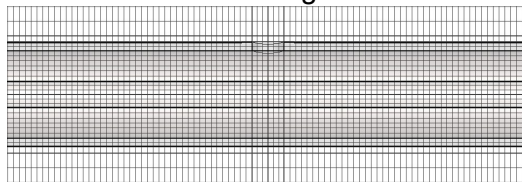


Abbildung 4: Gitterzellennetz (Mesh) des Simulationsmodells für Musterprüfling 1 (vgl. Abbildung 3)

An den beiden Enden des Prüflings werden Waveguideports platziert, wobei einer der beiden Ports als 50Ω Abschluss fungiert, der andere zur Einspeisung eines Testsignals von 0.5 W genutzt wird. Als Grenzbedingung für die Simulation ist Open Space eingestellt, so dass der Prüfling im Freiraum liegend simuliert wird. Zur Bestimmung der gesamten abgestrahlten Leistung des Prüflings, die nach Gleichung (1.1) zur Bestimmung der Schirmdämpfung notwendig ist, werden Fernfeldmonitorsonden in das Simulationsmodell eingefügt. Diese sind frequenzselektiv, so dass die Schirmdämpfung für 0-20 GHz in 0,5 GHz Schritten bestimmt werden kann (vgl. [12]).

2.3 Vergleich der Ergebnisse

Die Messungen nach dem Strahlungskammerverfahren [3] sind in zwei verschiedenen Kammern durchgeführt worden. Der Aufbau in einer Modenverwirbelungskammer von Teseq (Typ RC 2XS) ist im linken Teil der Abbildung 5 gegeben. Die Kammer hat eine Größe von 1,5 m x 0,8 m x 1 m und somit eine untere Grenzfrequenz von ca. 0,8 GHz. Im rechten Teil der Abbildung 5 ist eine selbstgebaute Kammer auf Basis einer LKW Unterflurbox der Firma Brossbox dargestellt. Die Kammer hat Größe von 0,65 m x 0,50 m x 0,43 m und eine untere Grenzfrequenz von ca. 1,3 GHz.



Abbildung 5: Messungen in der Teseq Kammer (links) [1: DUT, 2: Modenrührer, 3: TX Antenne, 4: Signalgenerator, 5: Messempfänger, 6: Abschlusswiderstand DUT, 7 & 8: Anschluss DUT & TX Antenne] und der kleinen Kammer (rechts) [1: Signalgenerator, 2: Messempfänger].

In Abbildung 6 ist der Vergleich der Messergebnisse in der Kammer der Firma Teseq für den Musterprüfling 1 mit einem Loch dargestellt, wobei die Einfügungsdämpfung entweder mit Hilfe einer zweiten Antenne (orange bzw. rot) oder mit Hilfe der Referenzleitung (Prüfling 9 aus Abbildung 3, hell- bzw. dunkelblau) ermittelt worden ist.

Bei beiden Messungen zeigt sich durchgängig ein Rippel von ca. ± 5 dB (blau, orange, feine Linie). Eine mögliche Erklärung kann die nicht exakt gleiche Anregung der Hohlraummodi bei der Messung des DUT und der Referenzmessung zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung sein. Aufgrund der erforderlichen Messdynamik ist mit relativ kleinen Auflösebandbreiten gemessen worden. Wie auch bei anderen Messungen in der Modenverwirbelungskammer [9] wird daher das Ergebnis über 70 benachbarte Frequenzpunkte gemittelt dargestellt (blau, orange, fette Linie).

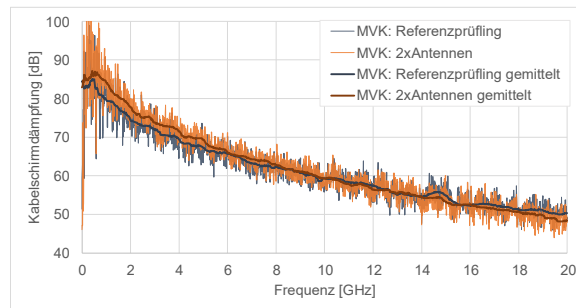


Abbildung 6: Gemessene Schirmdämpfung des Musterprüflings 1 mit unterschiedlichen Bestimmungsverfahren der Einfügungsdämpfung

Da die verwendete Kammer eine untere Grenzfrequenz von 800 MHz hat, sind die Ergebnisse unterhalb dieser Frequenz nicht zu verwenden. Generell zeigt sich aber eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Messungen mit Abweichungen von weniger als 2 dB. Da aber die Messung mit dem Referenzprüfling 9 aus Abbildung 3 das Abstrahlverhalten des DUTs besser nachbildet, werden die weiteren Messungen mit dem Referenzprüfling zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung durchgeführt.

Die Reproduzierbarkeit von Messungen ist von entscheidender Bedeutung. Daher wird der Prüfling 1 mit einem Loch erneut in der kleinen Modenverwirbelungskammer vermessen, um einen eventuellen Einfluss der Kammer selber sowie von Variationen im Aufbau aufzuzeigen. In Abbildung 7 sind die beiden Ergebnisse aufgetragen, wobei zu berücksichtigen gilt, dass die Ergebnisse aus der kleinen Kammer erst ab ca. 1,4 GHz nutzbar sind (untere Grenzfrequenz). Der Vergleich der Ergebnisse zeigt den wesentlichen Vorteil der Isotropie sowie der statistischen Homogenisierung von Modenverwirbelungskammern gegenüber anderen feldbasierten Messmethoden. Aufbauvariationen führen zu keinen nennenswerten Unterschieden in den Ergebnissen. Beide Messungen zeigen vergleichbarer Ergebnisse mit minimalen Unterschieden kleiner ± 1 dB.

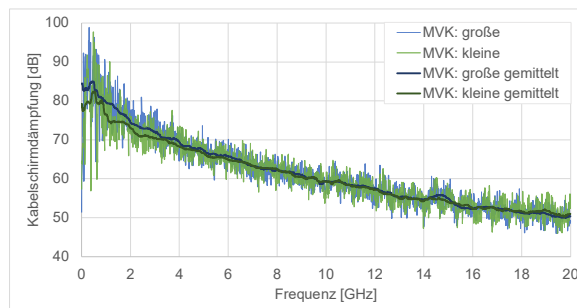


Abbildung 7: Vergleich der Messergebnisse für den Prüfling 1 aus beiden Kammern

Bei allen bisher gezeigten Messungen wurde, wie in [3] auch vorgesehen, die gemessenen Übertragungswerte S_{21} direkt als Schirmdämpfung angegeben.

In Abbildung 8 werden die Ergebnisse aus der Modenverwirbelungskammer (große Teseq Kammer) mit denen aus dem CoMet 18 Rohr [13] des triaxialen Aufbaus sowie den theoretisch

berechneten Werten und der Simulation für den Prüfling 1 dargestellt. In gelb ist die nach [1] korrigierte Kabelschirmdämpfung aus dem Triaxialverfahren dargestellt, in orange die direkten, auf das 50 Ω System bezogenen Messwerte.

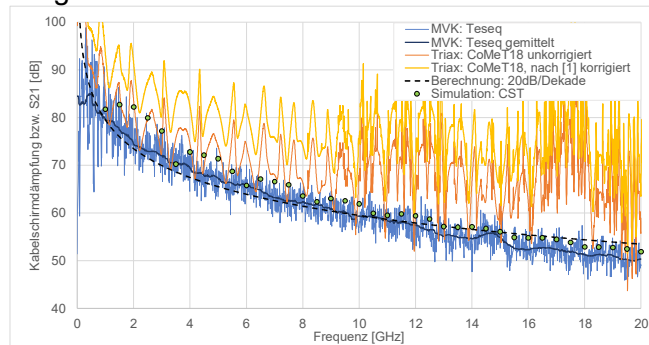


Abbildung 8: Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse mit den berechneten Werten für den Prüfling 1 mit einer Koppelzone.

Die über 70 benachbarten Frequenzpunkte gemittelte Kurve aus der Modenverwirbelungskammer (dunkelblau, fett) zeigt über den gesamten Frequenzbereich kaum nennenswerte Abweichungen mit den berechneten Werten.

Die Ergebnisse des Triaxialverfahrens zeigen den hierfür typischen, wellenförmigen Verlauf bis ca. 9 GHz. Nach [1] ist nur die Hüllkurve dieses Verlaufs als Schirmdämpfung anzugeben.

Dabei fällt auf, dass die nach [1] korrigierten Werte (gelbe Messkurve) deutlich oberhalb der ermittelten Messwerte aus der Modenverwirbelungskammer sowie auch oberhalb der berechneten bzw. simulierten Werte liegen. Die direkt gemessenen Werte S_{21} hingegen zeigen sowohl zur Modenverwirbelungskammer als auch zu den berechneten bzw. simulierten Werten eine sehr gute Übereinstimmung. Dies ist auch logisch, da bei den Messungen in der Modenverwirbelungskammer keine Anpassung an die Anschlussimpedanzverhältnisse vorgesehen ist [3]. Daher wurde bei der Simulation und der Berechnung hierauf verzichtet. Sowohl in der Modenverwirbelungskammer als auch bei der triaxialen Messung wird mit 50 Ω Systemen gearbeitet, so dass eine Anpassung zum Vergleich der Messergebnisse nicht notwendig ist. Die tatsächlich gemessenen S_{21} -Werte sind zum Vergleich wesentlich besser geeignet, weswegen diese im Folgenden immer herangezogen werden. Auf eine nach [1] notwendige Korrektur der gemessenen Werte auf die anzugebenden Schirmdämpfungswerte wird daher im Weiteren verzichtet.

Oberhalb von 9 GHz ist eine qualitative Veränderung des Messergebnisses aus dem triaxialen Verfahren zu erkennen. Diese könnten in dem Auftreten von Hohlleitermodi im Rohr oberhalb der aufgrund der geometrischen Verhältnissen berechneten Grenzfrequenz von 8,84 GHz zusammenhängen.

Bei der Betrachtung von mehreren Koppelzonen (vgl. Abbildung 10) fällt auf, dass die berechnete Schirmdämpfung, die einem 20 dB/Dekade Verlauf entspricht, nicht mehr mit den Mess- und Simulationsergebnissen übereinstimmt.

Grundlage für die Berechnung war, dass die einzelnen Löcher nicht miteinander verkoppelt sind bzw. diese phasengleich angeregt werden. Wie dem Simulationsbild für den Prüfling 4 bei 10 GHz in Abbildung 9 zu entnehmen ist, kommt es aber zu einer Verkopplung der Löcher. Daher kann der berechnete Wert der Schirmdämpfung nicht mehr als Vergleich herangezogen werden.

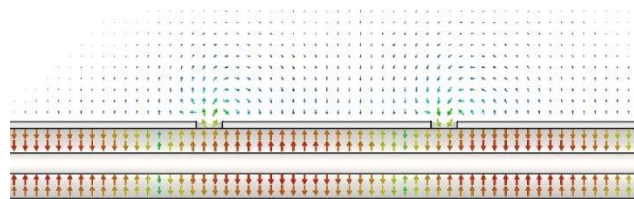


Abbildung 9: Verkopplung der zwei Löcher im Abstand von einem Zentimeter in Prüfling 4 über das elektrische Feld bei 10 GHz

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse für die Prüflinge **4** und **8** mit zwei bzw. sieben Koppelzonen dargestellt. Die gemittelten Messergebnisse aus der Modenverwirbelungskammer zeigen immer noch eine sehr gute Übereinstimmung mit der Simulation. Auch die unnormierten Messwerte aus dem triaxialen Messverfahren zeigen bis 9 GHz ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung. Oberhalb von 9 GHz kommt es insbesondere bei dem Prüfling mit zwei Koppelzonen jedoch zu Abweichungen im charakteristischen Verlauf sowie den absoluten Messwerten. Das treppenförmige Muster bei 7 Koppelstellen deutete auf eine starke Verkopplung der einzelnen Störstellen hin.

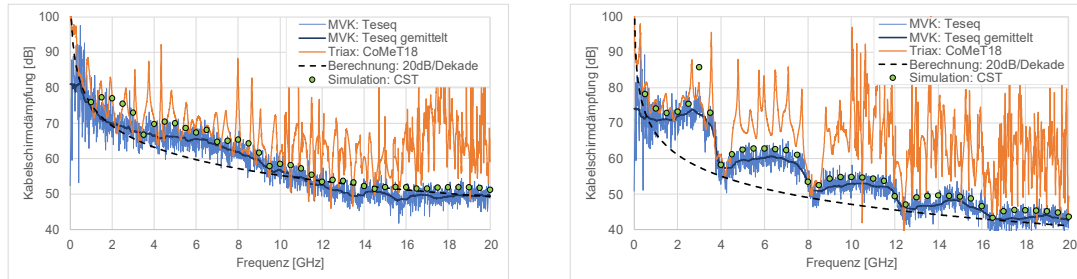


Abbildung 10: Ergebnisse für einen Prüfling mit zwei Koppelstellen (Prüfling **4**, links) und 7 Koppelstellen (Prüfling **8**, rechts). Die Messwerte des triaxialen Verfahrens sind nicht nach [1] normiert.

3 Messungen mit flexiblen Koaxialkabel RG 174

Für die Messungen an flexiblen Koaxialkabeln ist ein Kabel vom Typ RG 174 gewählt worden. Es sind zwei Prüflinge mit 30 cm bzw. 94 cm Länge vermessen worden. Bis zu einer Frequenz von ca. 12 GHz zeigen beide Längen eine Schirmdämpfung von ca. 40 dB (vgl. Abbildung 1). Diese ist, wie vorher bereits erläutert, nicht längenabhängig. Da nur die Einhüllende als Schirmdämpfungswert angegeben werden soll, passt dies auch mit den in Abbildung 11 dargestellten Ergebnissen.

Bei der triaxialen Messung wurde in diesem Fall ein Messsystem mit größerem Rohrquerschnitt verwendet, so dass die Grenzfrequenz bereits bei 4,5 GHz liegt. Dennoch zeigen die Messungen mit dem triaxialen Aufbau und in der Modenverwirbelungskammer auch oberhalb der Grenzfrequenz ein vergleichbares Ergebnis. Bei den 30 cm Prüfling ist die reflexionsbedingte Welligkeit deutlich in beiden Verfahren zu erkennen, bei dem 94 cm Stück ist diese nur noch im Ergebnis aus dem triaxialen Rohr sichtbar.

In beiden Fällen ist oberhalb von 12 GHz im Ergebnis aus der Modenverwirbelungskammer ein deutlicher Einbruch der Schirmdämpfung zu erkennen. Dieser ist bei der kürzeren Kabelprobe stärker ausgeprägt als bei der längeren. Wodurch dieser Einbruch im Messergebnis zustande kommt, wird derzeit untersucht. In [4] wurde ein ähnliches Verhalten für ein Kabel des Typs RG 58 ab ca. 4 GHz beobachtet.

Warum dieser Einbruch nur in der Modenverwirbelungskammer, nicht aber im Rohr erkennbar ist, muss ebenfalls untersucht werden. Erste Untersuchungen mit Freiraummessungen und in einer triaxialen Messzelle weisen jedoch darauf hin, dass auch in diesen Anordnungen ein Einbruch der Schirmwirkung beobachtet werden kann.

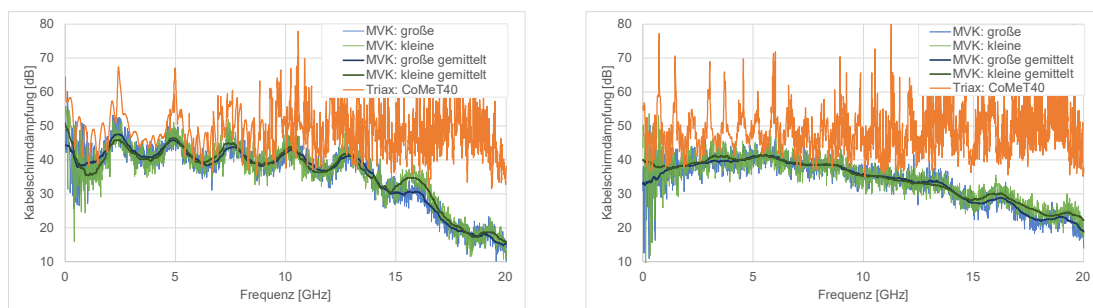


Abbildung 11: Ergebnisse für eine RG-174 Probe mit 30 cm Länge (links) und 94 cm Länge (rechts). Die Messwerte des triaxialen Verfahrens sind nicht nach [1] normiert

Es wird derzeit vermutet, dass die Abweichungen in den Messungen auf die unterschiedlichen Außenimpedanzverhältnisse bei den Messverfahren zurückzuführen sind.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Schirmdämpfung von koaxialen Kabeln in Modenverwirbelungskammern mit einer hohen Reproduzierbarkeit gemessen werden kann. Aufbauvariation und die Verwendung unterschiedlicher Kammern führen zu keinen signifikanten Veränderungen des Messergebnisses.

Der Vergleich mit dem etablierten, triaxialen Messverfahren zeigt sowohl für die Musterprüflinge, als auch für reale Kabelproben im Frequenzbereich bis 10 GHz eine sehr gute Übereinstimmung, wenn auf die Normierung, welche in [1] für die Messung im triaxialen System vorgesehen ist, verzichtet wird. Um bei Messungen in der Modenverwirbelungskammer Ergebnisse zu erhalten, die vergleichbar mit allen anderen normgerechten Messungen sind, wird daher empfohlen, eine entsprechende Normierung der Rohdaten ebenfalls in die entsprechende Norm [3] aufzunehmen. Oberhalb von ca. 10 GHz kommt es sowohl bei Musterprüflingen mit singulären Störstellen also auch bei einer realen Kabelprobe zum Teil zu erheblichen Abweichungen, die noch näher untersucht werden müssen.

Literatur

- [1] IEC 62153-4-4 Ed. 2: *Metallic communication cable test methods - Part 4-4: Electromagnetic compatibility (EMC) - Test method for measuring of the screening attenuation as up to and above 3 GHz, triaxial method*, 2015.
- [2] DIN EN IEC 62153-4-15: *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Prüfverfahren zur Messung des Kopplungswiderstandes und der Schirmdämpfung oder der Kopplungsdämpfung mit der Triaxialen Zelle*, 2020.
- [3] DIN EN 61726: *Konfektionierte Kabel, Kabel, Steckverbinder und passive Mikrowellenbauteile – Messung der Schirmdämpfung mit dem Strahlungskammerverfahren*, 2016.
- [4] M. Hillgärtner und D. Peier. *Effiziente Bestimmung der Kabelschirmdämpfung bei hohen Frequenzen in Modenverwirbelungskammern*, EMV 2006 – Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit. Hrsg. von VDE, 2006. ISBN: 978-3-8007-2933-3
- [5] IEC 62153-4-0: *Metallic communication cable test methods - Part 4-0: Electromagnetic Compatibility (EMC) - Relationship between Surface transfer impedance and Screening attenuation, recommended limits*. 2005.
- [6] DIN EN IEC 62153-4-16: *Prüfverfahren für metallische Kommunikationskabel und andere passive Bauteile - Teil 4-16: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Erweiterung des Frequenzbereiches zu höheren Frequenzen für den Kopplungswiderstand und zu niedrigeren Frequenzen für die Schirmdämpfung bei Messungen mit dem Triaxialverfahren*, 2023
- [7] DIN EN IEC 62153-4-5: *Prüfverfahren für metallische Kommunikationskabel - Teil 4-5: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Kopplungsdämpfung oder Schirmdämpfung - Verfahren mit Absorberzangen*, 2023
- [8] DIN EN 61000-4-21: *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-21: Prüf- und Messverfahren - Verfahren für die Prüfung in der Modenverwirbelungskammer*, 2011
- [9] M. Hillgärtner: *Hohlraumresonanzgüte in Modenverwirbelungskammern*, Dissertation 2007, abrufbar unter <https://eldorado.tu-dortmund.de/handle/2003/25106?locale=de>
- [10] H. A. Wolfspurger. *Elektromagnetische Schirmung: Theorie und Praxisbeispiele* 1. Aufl. Berlin: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-76912-5
- [11] L. Halme und R. Kytonen. *Background and introduction to EM screening (shielding) behaviours and measurements of coaxial and symmetrical cables, cable assemblies and connectors*. In: *IEE Colloquium on Screening Effectiveness Measurements*. IET. 1998.
- [12] T. Tebart: *Vergleichende Untersuchung von Kabelschirmdämpfungsmessverfahren bis 20 GHz*, Bachelorarbeit 2022, FH Aachen (Versand unter hillgaertner@fh-aachen.de)
- [13] bda connectivity GmbH, *Kurzübersicht CoMeT*, abrufbar unter www.bda-connectivity.com/comet/