

EMV von SPE-Steckern und Anschlusskabeln – Simulation und Messung

Ralf Damm & Bernhard Mund, bda connectivity GmbH, Asslar, Deutschland
Dr. Thomas Gneiting, AdMOS GmbH, Frickenhausen, Deutschland
Ralf Tillmanns, Weidmüller GmbH & Co. KG, Detmold, Deutschland

Kurzfassung

Der Aufbau eines ungeschirmten Single-Pair-Ethernet- Kabels, kurz SPE-Kabels, das für eine spezielle Applikation (10Base-T1, 100Base-T1, 1000Base-T1) vorgesehen ist, wurde in Bezug auf seine Schirm-Eigenschaften untersucht. Das Kabel sowie der Messaufbau, der für eine spätere Evaluierung vorgesehen war, wurden als digitaler Zwilling in einem 3D Simulationsprogramm für elektromagnetische Wellen nachgebildet.

Durch die Nachbildung des Messaufbaus gemäß der Norm IEC 62153-4-9 war es möglich, die geforderten Eigenschaften des Abstrahlverhaltens und der Symmetrie entsprechend den einschlägigen Normen zu simulieren und mit den geforderten Grenzwerten zu vergleichen. Neben der Betrachtung des Verhaltens des Kabels mit nominalen Abmessungen wurde auch eine Toleranzanalyse anhand der zulässigen elektrischen Toleranzen vorgenommen.

Mit Hilfe der Visualisierung der elektrischen Felder konnten die Ursachen des gemessenen Abstrahlverhaltens identifiziert werden.

Nach Erstellung eines Prototyps wurden die Kennwerte des SPE-Kabels im Labor mit dem Triaxialverfahren gemessen. Das Ergebnis der Messung lag zwischen den simulierten Werten der Nominal- und Worst-Case-Geometrie. Dadurch konnte das simulierte Schirm-Verhalten bestätigt werden.

Einleitung

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

Bei SPE-Anwendungen werden für SPE-Verkabelungssysteme höhere Symmetrien und Koppeldämpfungen gegenüber der klassischen Ethernet-Umgebung gefordert.

Die Kopplungsdämpfung von SPE-Kabeln, Steckverbindern und Anschlusskabeln kann nach IEC 62153-4-7 gemessen und falls erforderlich, schrittweise optimiert werden. Dazu sind allerdings aufwendige Musterkonstruktionen erforderlich.

Anstelle von Musterkonstruktionen lassen sich durch geeignete elektromagnetische 3D - Simulationen des Leistungsvermögens und der EMV der SPE-Kabel im Entwicklungsverlauf Zeit und Kosten einsparen. Beides, die Simulation und die Verifizierung/Messung des EMV-Verhaltens am fertigen Steckverbinder bzw. am fertigen Anschlusskabel sollte mit derselben Methode, in diesem Fall mit dem Triaxialverfahren nach IEC 62153-4-7, durchgeführt werden.

SPE-Steckverbinder und -Kabel

In der folgenden Übersicht der SPE-Standards für Steckverbinder und Kabel werden die Übertragungseigenschaften und die Anforderungen an Symmetrie und Koppeldämpfung beschrieben.

Standards	Beschreibung
IEC 61156-11	Multicore and symmetrical pair/quad cables for digital communications - Part 11: Symmetrical single pair cables with transmission characteristics up to 1,25 GHz - Horizontal floor wiring - Sectional specification
IEC 61156-12	Multicore and symmetrical pair/quad cables for digital communications - Part 12: Symmetrical single pair cables with transmission characteristics up to 1,25 GHz - Work area wiring - Sectional specification
IEC 61156-13	Multicore and symmetrical pair/quad cables for digital communications - Part 13: Symmetrical single pair cables with transmission characteristics up to 20 MHz - Horizontal floor wiring - Sectional specification
IEC 61156-14	IEC 61156-14: Multicore and symmetrical pair/quad cables for digital communications - Part 14: Symmetrical single pair cables with transmission characteristics up to 20 MHz - Work area wiring - Sectional specification
IEC 63171 Serie	Connectors for electrical and electronic equipment - Shielded or unshielded free and fixed connectors for balanced single-pair data transmission with current-carrying capacity - General requirements and tests

Tabelle 1: SPE-Standards für Steckverbinder und Kabel

Simulation und Analyse

Motivation

Das Ziel der Simulation ist:

- a) Die realistische Darstellung quantitativer Ergebnisse wie Schirmdämpfung a_s , Kopplungsdämpfung a_c und Kopplungswiderstand Z_T abhängig ob geschirmte oder ungeschirmte Systeme betrachtet werden. Es muss beurteilt werden, ob der Entwurf den Anforderungen der Anwendung mit den dafür bestehenden Grenzwerten der o.a. Parameter entspricht.
- b) Visualisierung von Störstellen und Regionen, in denen die Schirmung nicht ausreichend ist. Dieser Input ist für den Entwickler besonders wichtig, damit die Schirmeigenschaften zielgerichtet verbessert werden können, um die notwendigen Grenzwerte zu erreichen.

Vorgehensweise

Eine typische Vorgehensweise besteht darin, den Steckverbinder bzw. das konfektionierte Kabel und die Messumgebung in einem elektromagnetischen 3D Simulationsprogramm nachzubilden (Bild 1)

Bei der Nachbildung des Steckverbinders bilden die CAD-Daten der Konstruktion die Grundlage. Diese müssen noch modifiziert werden, um eine realistische Kontaktierung der einzelnen Schirmteile zu erreichen. Mit fortschreitender Leistungsfähigkeit der Simulationsprogramme sind diese in der Lage auch Effekte durch komplexe Oberflächenbeschichtungen, Oberflächenrauigkeiten usw. in die Berechnungen einfließen zu lassen.

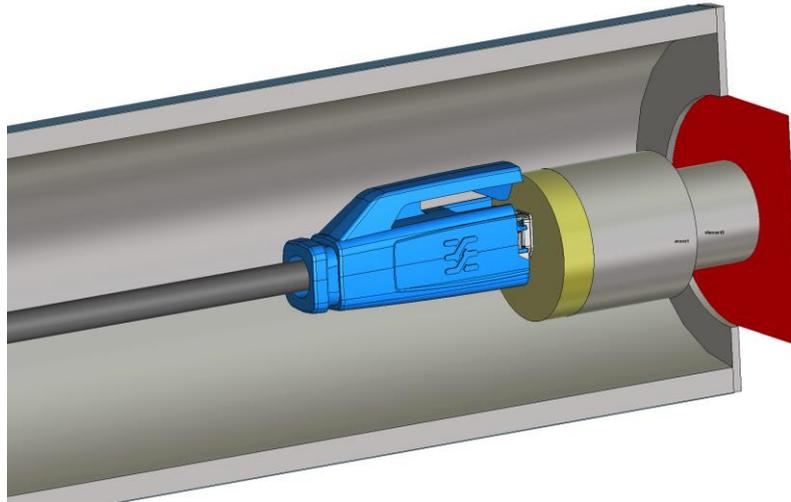


Bild 1: Prinzipielle Nachbildung eines SPE-Steckverbinders mit Kabel in Testaufbau

In der Simulationsumgebung werden die wesentlichen Eigenschaften der Messumgebung realistisch nachgebildet, um deren Einfluss auf die Ergebnisse zu berücksichtigen. In diesem Fall ist es die Länge und der Innendurchmesser des Messrohres. Anschlüsse der Messkabel an den Vektor-Netzwerkanalysator (VNA) etc. können dann z.B. ab der Kalibrierungs-Ebene des VNA vereinfacht durch koaxiale Wellenleiter dargestellt werden. Bild 2 zeigt einen typischen Messaufbau mit einem SPE-Steckverbinder.



Bild 2: Messaufbau eines SPE-Steckverbinders

Je nach gewähltem Verfahren erfolgt die Simulation im Zeitbereich, z.B. mit der Finite Integration Technique (FIT) Methode mit anschließender Transformation in den Frequenzbereich oder gleich im Frequenzbereich durch Lösen des linearen Systems der Maxwell-Gleichungen durch einen iterativen oder direkten Lösungsalgorithmus für jeden betrachteten Frequenzpunkt [4].

Analysen

Bei beiden Lösungsansätzen erhält man gleich wie bei einer Messung mit dem Vektor Netzwerkanalysator S-Parameter, die mit den entsprechenden Beziehungen in die Kenngrößen, wie z.B. Kopplungsdämpfung a_c umgerechnet werden können.

Der Vorteil der Simulation ist, dass Vorgänge innerhalb der untersuchten Objekte wie Steckverbinder, Kabel oder auch der gesamten Messanordnung sichtbar gemacht werden können. Dies kann durch die Analyse der elektrischen und magnetischen Feldverteilungen im Zeit- und Frequenzbereich erfolgen und kann Aufschluss über Schwachstellen im Schirmungskonzept bzw. in der Symmetrie der Bauteile geben.

Ein weiterer Vorteil der Simulation liegt darin, dass in einer genormten Anordnung bereits in einem sehr frühen Stadium der Entwicklung belastbare Zahlen zu den EMV Kriterien Kopplungswiderstand, Schirmdämpfung und Kopplungsdämpfung ermittelt werden können und so ein schneller, effizienter und kostenoptimierter Entwurf möglich wird

Kopplungsdämpfung

Die Kopplungsdämpfung ist ein Maß für das Schirm-Verhalten von z.B. symmetrischen Kabeln und Steckverbindern und berücksichtigt sowohl die Wirkung des Schirms (falls vorhanden) als auch die Wirkung der Unsymmetriedämpfung des Paares.

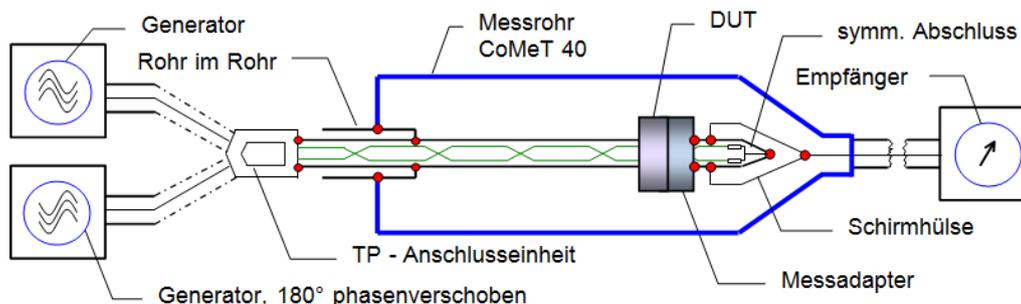


Bild 3: Kopplungsdämpfung eines konfektionierten Kabels nach IEC 62153-4-7

Die Erweiterung der IEC 62153-4-9Amd1 beschreibt die Messung der Kopplungsdämpfung bei tiefen Frequenzen (LFCA) an symmetrischen Kabeln ab 100 kHz. Der Messaufbau ist der gleiche wie der Aufbau zur Messung der Kopplungsdämpfung bei höheren Frequenzen. Damit kann die Kopplungsdämpfung für SPE-Steckverbinder und SPE-Anschlusskabel über einen weiten Frequenzbereich von 100 kHz bis zu und über 2 GHz erfolgen.

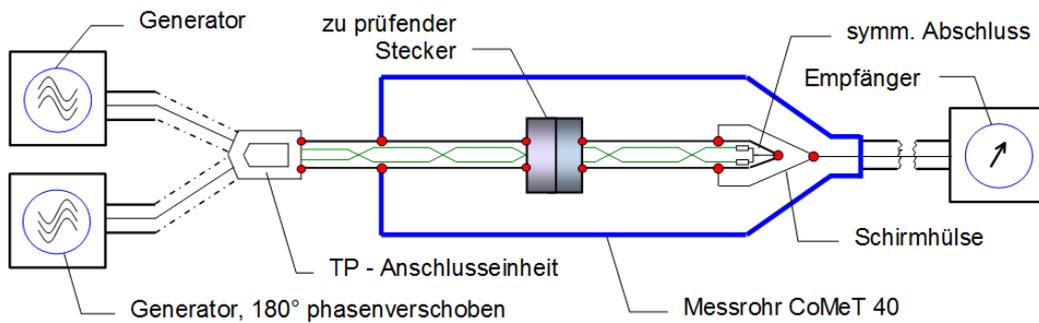


Bild 4: Kopplungsdämpfung eines Steckverbinders nach IEC 62153-4-7

Messadapter

Die Messung der Schirmwirkung eines einzelnen Steckverbinders oder eines konfektionierten Kabels ist nur mit geeigneten Messadaptern möglich. Ungeeignete Messadapter können die Messung durch zusätzliche Emissionen erheblich beeinflussen. Daher sollten Qualifizierungsprüfungen an den verwendeten Messadaptern durchgeführt werden, um das Grundrauschen bzw. die Messgrenzen des Systems zu ermitteln.

Messadapter sollen vorzugsweise vom Hersteller des zu prüfenden Steckverbinders hergestellt werden, um optimales Kontaktverhalten zu gewährleisten.

Vergleich von Simulation und Messung

Als Objekt zur Demonstration der Vorgehensweise wurde ein Kabel mit dem folgenden Aufbau gewählt.

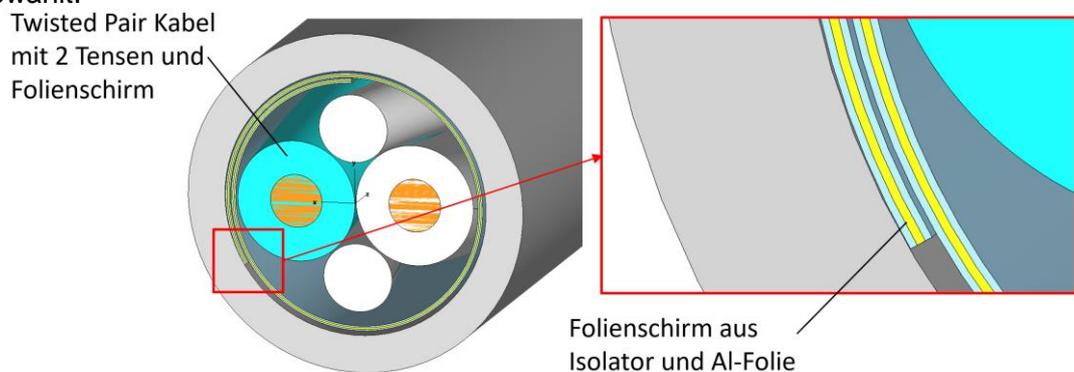


Bild 5: Querschnitt SPE Kabel mit Folienschirm

Die Besonderheit dieses Kabels ist, dass der Schirm in periodischen Abständen durch Querschnitte unterbrochen ist:

Kabel, die mit solchen Barriere-Folien ausgerüstet sind, können hohe Anforderungen an das Kabel-zu-Kabel Nebensprechen (Alien-Crosstalk) erfüllen und zugleich gewährleisten, dass kein unerwünschter Störstrom in dieser Barriere-Folie fließen kann. Daher können solche Kabel als ungeschirmt betrachtet werden [5].

Neben der Simulation des idealen Zustands des Kabels, sollte auch eine Worst-Case Betrachtung der Toleranzen durchgeführt werden, um darzustellen, wie sich die betrachteten elektrischen Eigenschaften ändern.

Periodische Unterbrechung des Folienschirms durch Querschlitz

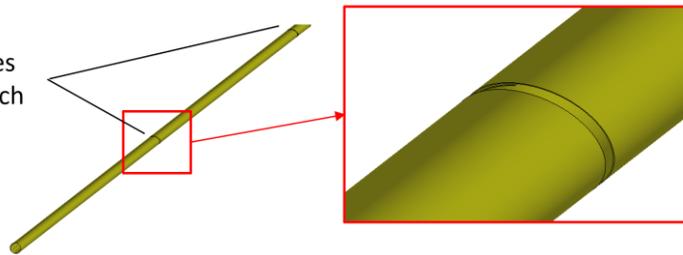


Bild 6: Querschnitt SPE Kabel mit Folienschirm

Die Variation der Kabeleigenschaften wird durch 2 Parameter dargestellt:

- Der Durchmesser der Litzen D1, D2 ändert sich um $\pm 1.4\%$, abgeleitet aus der zulässigen Variation des ohmschen Widerstands ($\pm 2\%$) einer Litze unter der Annahme, dass der spezifische Widerstand des Kupfers konstant ist.
- Die dielektrische Konstante der Aderisolationen ϵ_{r1a} , ϵ_{r1b} ändert sich um ± 0.05 . Hierbei handelt es sich um eine Annahme durch die Variation z.B. durch unterschiedliche Einfärbungen.

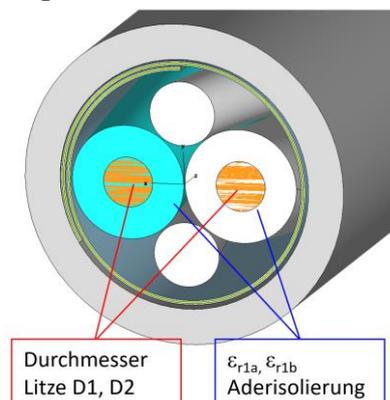


Bild 7: Darstellung der Variationen im SPE-Kabel

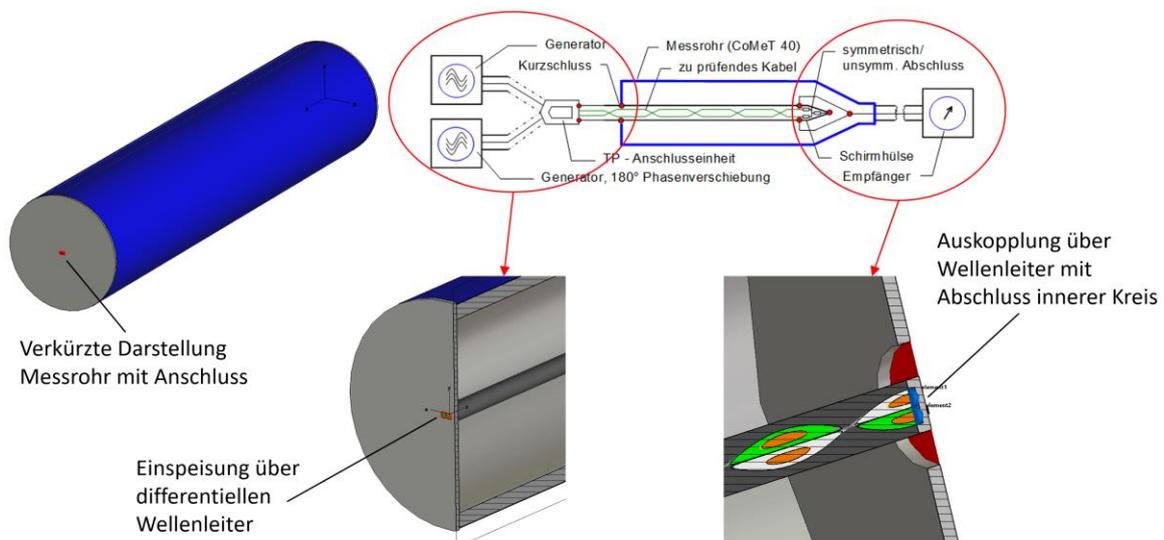


Bild 8: Nachbildung Messrohr mit Kabel

In der Simulationsumgebung ist der Messaufbau, ein Messrohr mit 40mm Innendurchmesser, nachgebildet.

Die Ergebnisse der Simulation und der Messung sind in den folgenden beiden Diagrammen dargestellt.

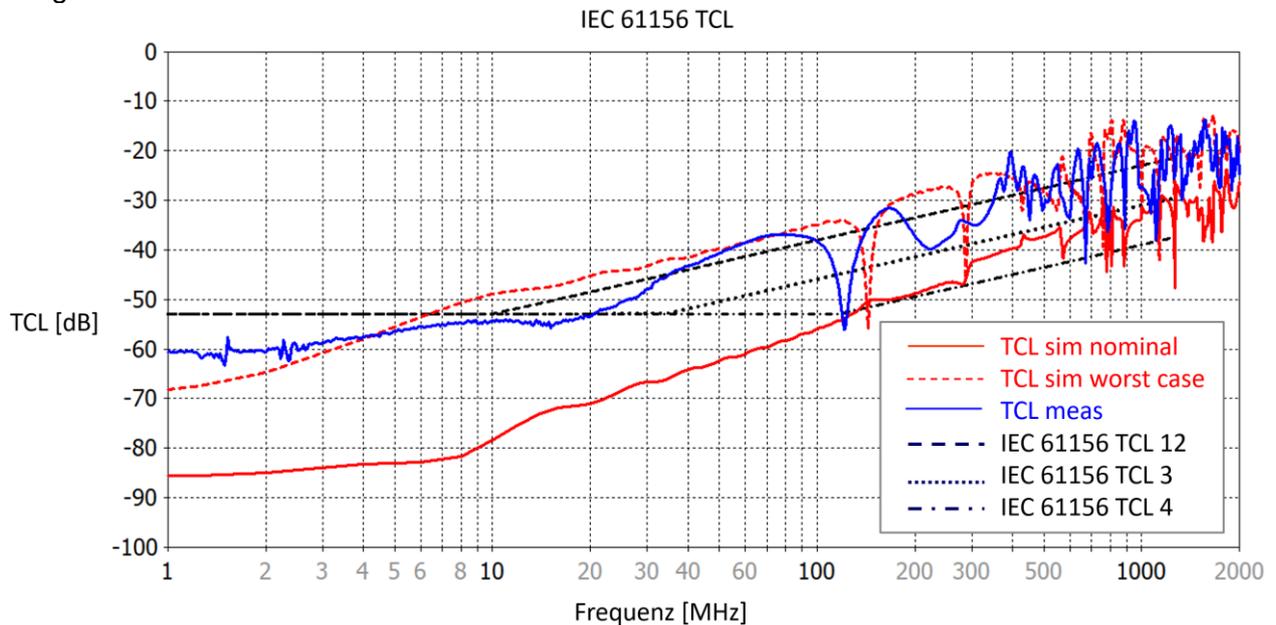


Bild 9: Transfer Conversion Loss, TCL aus Messung und Simulation

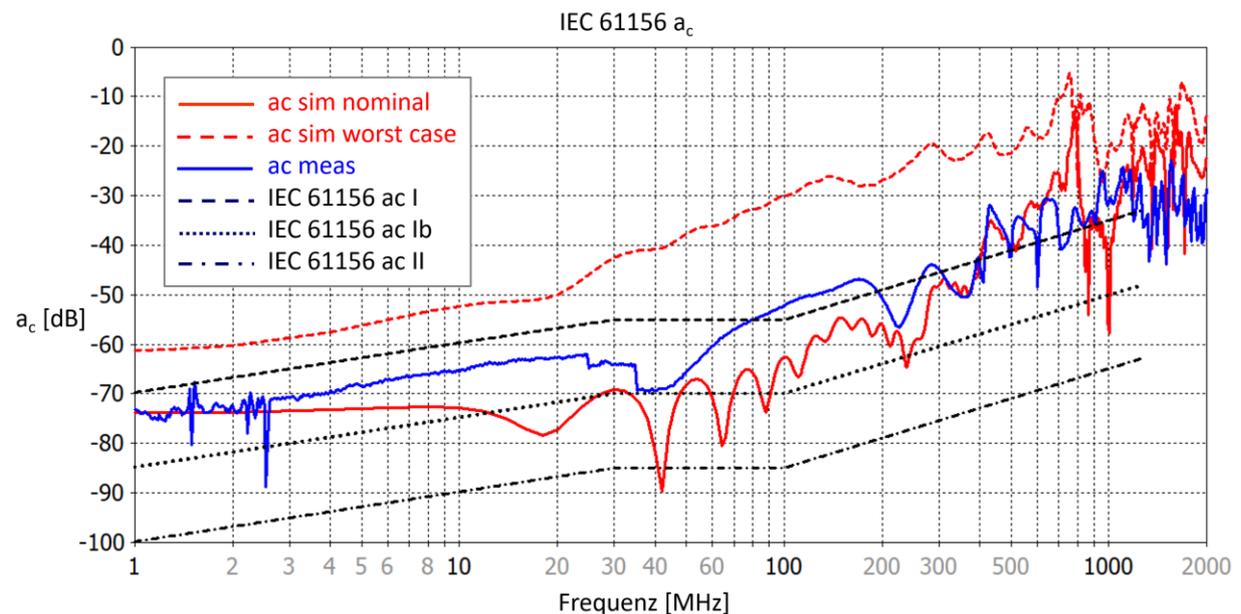


Bild 10: Kopplungsdämpfung ac aus Messung und Simulation

Simuliert und gemessen wurden:

- Transverse Conversion Loss (TCL) als Maß für die Symmetrie des Kabelaufbaus. TCL kann auch als S_{cd11} bezeichnet werden.
- Die Kopplungsdämpfung a_c , die durch Umrechnung der S-Parameter S_{sd21} berechnet wird:

$$a_C = -S_{sd21} + 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{2 \cdot Z_S}{Z_0} \right|$$

$$a_C = -S_{sd21} + 7.78 \text{ dB}$$

mit:

S_{sd21} logarithmischer Wert (in dB) des Vorwärts-Streuparameters für die Übertragung. Der Prüfling wurde im Differential-Mode angeregt, die übertragene Leistung wird im Single-Ended-Mode empfangen.

Z_S normierter Wert Wellenwiderstand der Umgebung des Kabels, $Z_S = 150 \Omega$

Z_0 Systemimpedanz, $Z_0 = 50 \Omega$

Beide Größen wurden an einem Kabelmuster gemessen und durch Simulationen mit Nominal- und Worst-Case Parametern berechnet.

Zusätzlich sind in den Diagrammen noch die Grenzwerte nach IEC 61156 eingezeichnet, um eine Einordnung der Ergebnisse vornehmen zu können. Diese gelten je nach Klasse in einem Frequenzbereich von 1 MHz bis 20 MHz, 600 MHz oder 1250 MHz.

In den Diagrammen ist zu erkennen, dass die gemessenen Werte für beide Kenngrößen TCL und a_C nur im Bereich bis 20 MHz unter den Grenzwerten der ersten Kabelklasse liegen. Beide Messkurven liegen zwischen den simulierten Werten mit den idealen Nominalparametern und den Worst-Case-Parametern.

Um den Grund für dieses Verhalten besser zu verstehen, wird die Verteilung des elektrischen Felds betrachtet. In der zugehörigen Simulation wird ein Sprungsignal mit einer Anstiegszeit von 0.7ns, das zu der maximalen Frequenz von 1250 MHz korreliert im differentiellen Port der Anordnung eingespeist und wandert durch das Kabel in die Terminierung. Die Betrachtung des E-Felds im zeitlichen Verlauf zeigt besonders anschaulich die Stellen, an denen Felder aus dem Kabel austreten.

Der Fokus liegt dabei auf der überlappenden Folie und den Querschlitzten. Zur Analyse des Abstrahlverhaltens ist es notwendig, die Anzeige der Feldstärke sehr stark zu zoomen. Dabei ist die Feldstärke im Inneren des Kabels, wo das Nutzsignal fließt, mit ca. ca. 10000 V/m gegenüber der Anzeige von maximal 10V/m sehr hoch und dadurch ist dieser Bereich konstant rot eingefärbt.

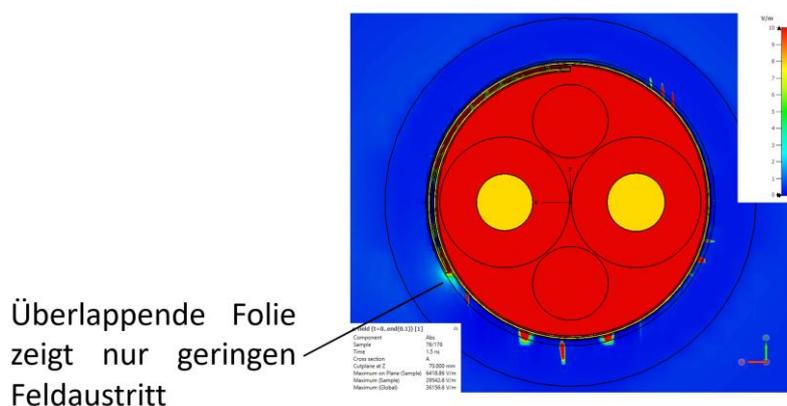


Bild 11: Betrag des elektrischen Felds quer zum Kabel und Austritt aus Schirmfolie

Die Analyse des überlappenden Schirms zeigt nur einen sehr geringen Austritt des elektrischen Felds.

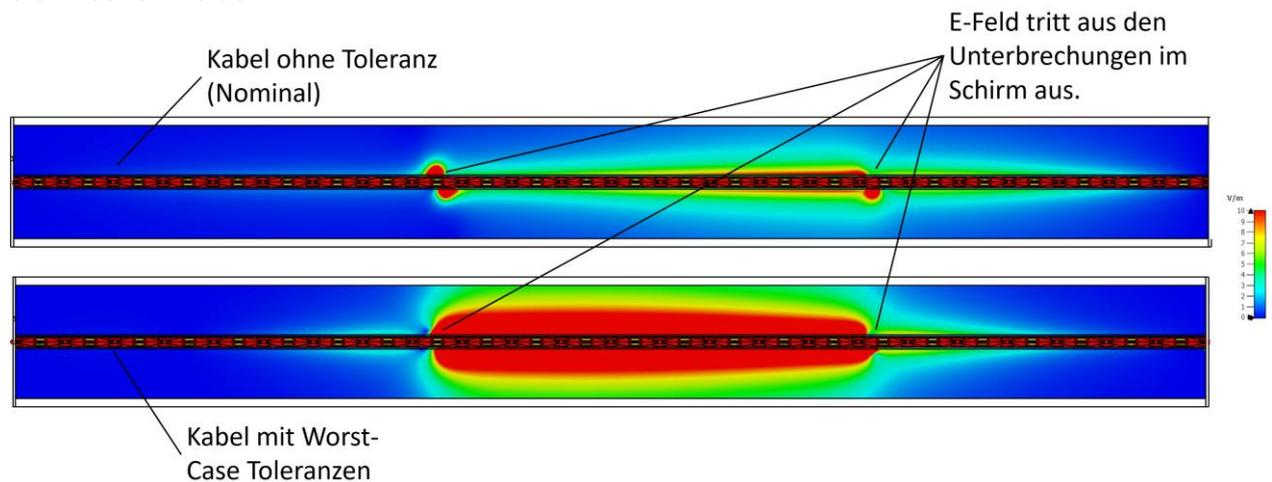


Bild 12: Betrag des elektrischen Felds (Längsschnitt) und Austritt aus Querschlitten

Die zweite Analyse zeigt die Darstellung der elektrischen Felder zu einem bestimmten Zeitpunkt der Signalausbreitung in einem Längsschnitt durch Kabel und Messrohr. Es ist gut zu erkennen, dass die Felder an den Stellen austreten, wo sich die Querschlitten im Schirm befinden. Durch die gleiche Skalierung der Darstellung wird auch deutlich, dass dies im Gegensatz zum überlappten Schirm die Hauptursache der begrenzten Schirmwirkung ist. Ebenso ist erkennbar, dass durch die geringere Symmetrie des Kabels im Worst-Case Fall das ausgetretene Feld deutlich größer ist.

Anwendung auf doppelt geschirmtes SPE Kabel

Zur Demonstration, dass diese Vorgehensweise auch für Kabel mit der niedersten Kopplungsdämpfung anwendbar ist wurde ein doppelt geschirmtes SPE Kabel untersucht und simuliert.

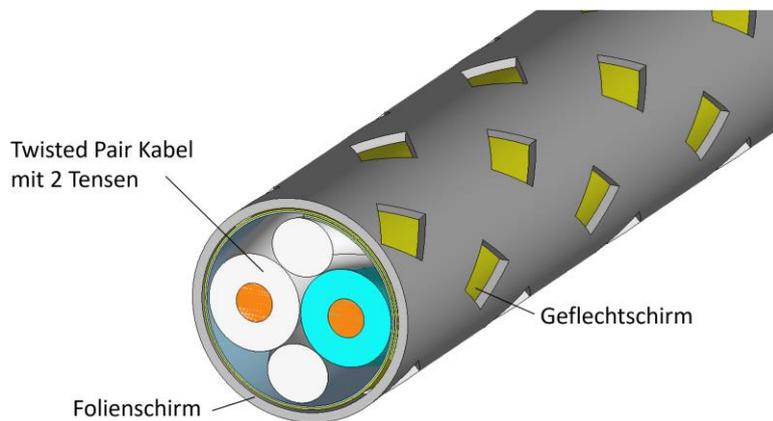


Bild 13: Querschnitt SPE Kabel mit Folien- und Geflechschirm

Die Ergebnisse der Simulation und der Messung der Kopplungsdämpfung sind im folgenden Diagramm dargestellt.

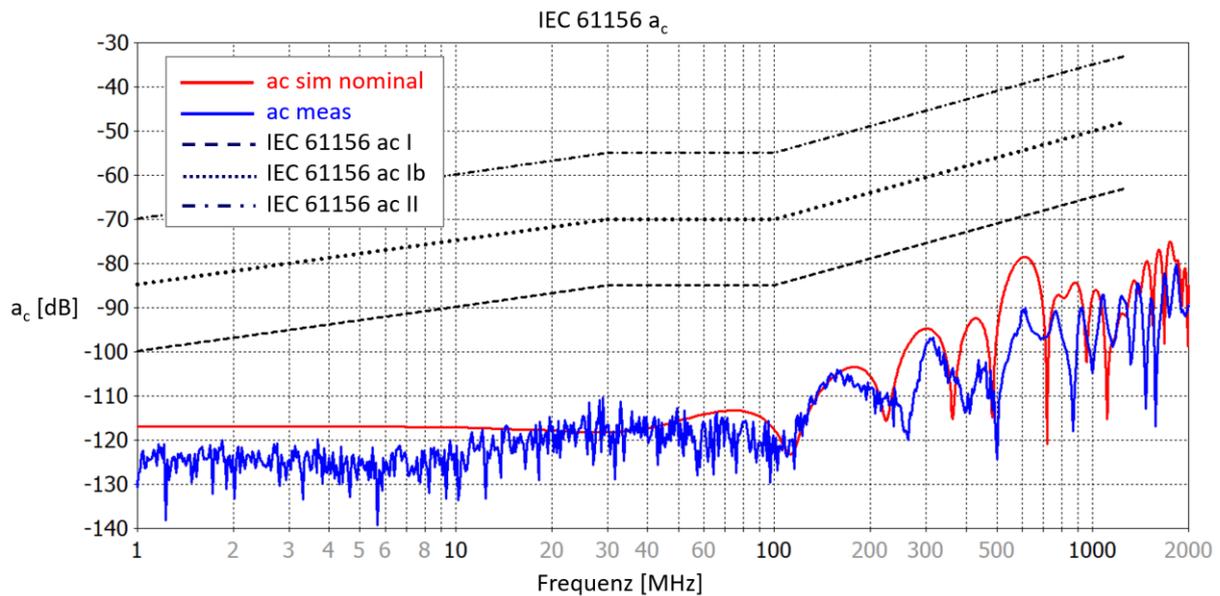


Bild 14: Kopplungsdämpfung ac aus Messung und Simulation

Im Diagramm ist zu erkennen, dass die gemessenen Werte für a_c im gesamten Frequenzbereich unter den Grenzwerten der besten Kabelklasse liegen. Die Messkurve deckt sich erstaunlich gut mit dem simulierten Verhalten des Kabels.

Auch hier soll das elektrische Feld noch derselben Methode betrachtet werden. Da die Abstrahlung sehr viel schwächer ist, müssen die Felder auf max. 1V/m skaliert werden.

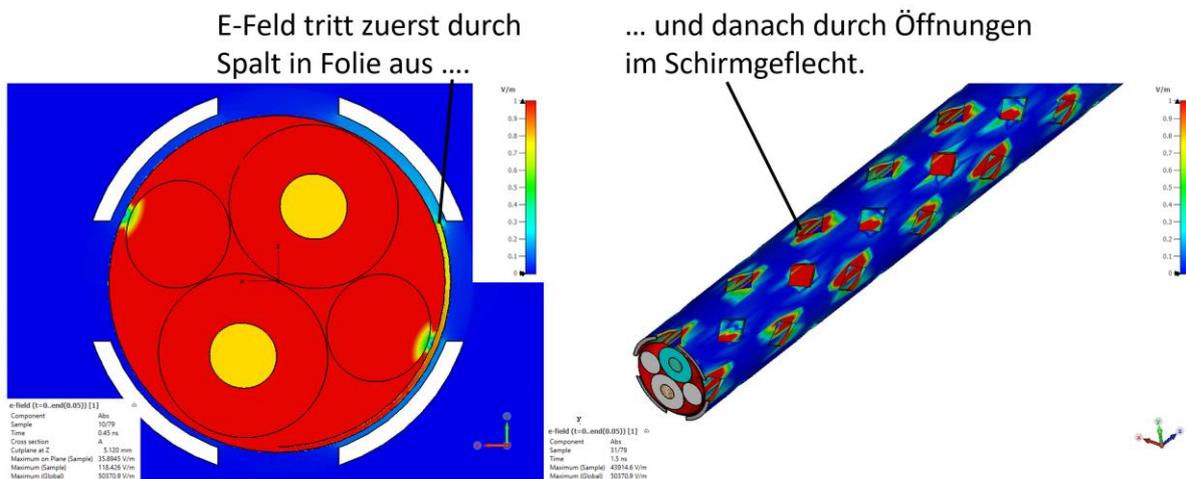


Bild 15: Betrag des elektrischen Felds

Die Analyse zeigt sehr deutlich, wie das E-Feld zunächst durch die überlappende Folie austritt (links) und danach durch die freien Bereiche des Geflechtsschirmes. Es ist zu beachten, dass diese Ergebnisse durch eine vollständige 3D Simulation erzeugt wurden und nicht durch angepasste Verhaltensmodelle zur Nachbildung von Schirmeigenschaften.

Zusammenfassung

In den vorausgehenden Abschnitten wurde die Analyse der Symmetrie und des Schirmverhaltens in SPE-Kabeln und -Steckverbindern mit den Methoden der Simulation mit anschließender Verifizierung durch Messungen dargestellt.

Für beide Methoden, Simulation und Messung, wurde mit dem Triaxialverfahren eine identische Vorgehensweise gewählt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass mit Hilfe der Simulation in einer genormten Anordnung bereits in einem sehr frühen Stadium der Entwicklung belastbare Zahlen zu den untersuchten EMV-Kriterien ermittelt werden können und so ein schneller, effizienter und kostenoptimierter Entwurf möglich wird.

Die zusätzliche Visualisierung von Störstellen und Regionen, in denen die Schirmung nicht ausreichend ist, ist der wichtigste Input für ein Entwicklungs-Team, um notwendige Modifikationen eines Entwurfs zielgerichtet durchführen zu können.

Die in diesem Beitrag dargestellte Vorgehensweise zeigt die ideale Verzahnung von Simulation und EMV-Messtechnik in verschiedenen Stadien des Produkt-Design Prozesses von SPE- Steckverbindern und Anschlusskabeln. Die abschließende Verifizierung der Simulationsergebnisse mit dem Triaxialverfahren erlaubt dann neben der Bestätigung, dass die Grenzwerte eingehalten werden, wichtige Rückschlüsse auf die Qualität der Simulation und erhöht das Vertrauen in die dargestellte Methodik.

Es wurde weiterhin gezeigt, dass selbst Kabel mit sehr guten Schirmeigenschaften durch eine vollständige 3D Simulation mit hoher Genauigkeit nachgebildet werden können und daher noch vor dem Vorhandensein von Mustern Aussagen über die Schirmeigenschaften getroffen werden können.

Literatur und Normen

- [1] Thomas Gneiting & Bernhard Mund, Analysis, optimization, and verification of an HV connector, Proceedings of the IWCS 2021 Virtual Conference, October 2021
- [2] Ralf Damm, Bernhard Mund et al. EMC of SPE cables, connectors, and assemblies, 2022 IWCS Industry Forum, Providence, RI, USA, October 2022
- [3] R. Damm, D. Hess, B. Mund & R. Tillmanns, Coupling attenuation & Bursttest on balanced cables and cabling systems, Proc. of the 72nd IWCS Conference, Orlando, FL, USA, September 2023
- [4] CST Suite 2023 Help, Dassault Systèmes
- [5] C. Pfeiler, A. Waßmuth; Approach to Analysis and Solution for Alien Crosstalk Requirements of Unscreened Cables for Digital Communications, S. 128-134; Proc. Of the 55th IWCS, 2006
- [6] IEC 63171-n series – SPE connectors for balanced single-pair data transmission with current-carrying capacity
- [7] IEC 61156-12: Symmetrical single pair cables with transmission characteristics up to 1,25 GHz - Work area wiring - Sectional specification.
- [8] IEC 61156-14: Symmetrical single pair cables with transmission characteristics up to 1,25 GHz – Work area wiring - Sectional specification
- [9] IEC 62153-4-7, Test method for measuring transfer impedance and screening attenuation or coupling attenuation on connectors and cable assemblies

thomas.gneiting@admos.de,
ralf.tillmanns@weidmueller.com
ralf.damm@bda-c.com, bernhard.mund@bda-c.com