

## **Analyse, Optimierung und Verifizierung eines HV-Steckers**

Dr. Thomas Gneiting, AdMOS GmbH, Advanced Modeling Solutions, Frickenhausen, Deutschland

Bernhard Mund, bda connectivity GmbH, Asslar, Deutschland

### **Kurzfassung**

Ein Design eines Hochspannungssteckers wurde mit dem Fokus auf Zuverlässigkeit und Herstellbarkeit verbessert. In einem ersten Schritt wurde das EMV-Verhalten des bestehenden und des neuen Designs durch 3D elektromagnetische (EM) Simulationen evaluiert und verglichen. Dabei wurden bereits die geforderten Eigenschaften wie Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung entsprechend den einschlägigen Normen des triaxialen Messverfahrens und den Anforderungen der Endkunden simuliert.

Mit Hilfe der Visualisierung der elektrischen Felder konnten Schwachstellen des Schirmkonzepts identifiziert und gemeinsam mit dem Designteam unter Beachtung der Anforderungen an eine kostengünstige Fertigung optimiert werden um die geforderten elektrischen Eigenschaften zu erfüllen.

Nach Erstellung eines Prototyps wurde das Schirmungsverhalten des Steckers im Labor gemessen und das Ergebnis bestätigte das erwartete simulierte Verhalten.

## **1 Einleitung**

### **1.1 Anforderungen an HV Stecker**

Durch die zunehmende Dichte von Elektronik und Mikroprozessortechnik in Elektromobilen kommt der EMV der Energie- und der Kommunikationsverkabelung sowie der dazugehörenden Komponenten steigende Bedeutung zu.

Dies gilt im Besondern auch für die Hoch-Volt bzw. HV-Stecker. Die hohen Schalttransienten der E-Motoren und die hohen Spannungen der Leistungsinverter stellen eine große Herausforderung an die Entwickler dar. Gefordert sind volle Funktionalität bei Spannungen bis zu 1000 V in einem Temperaturbereich von -40 bis +170 °C bei geringer Emission bzw. hoher Störfestigkeit auch nach Alterung. Zusätzliche Forderungen sind u.a. geringes Gewicht und preiswerte Gestaltung.

Ein weiterer Aspekt ist die Reduzierung des Elektrosmogs im Elektroauto durch entsprechende Schirmung der Komponenten zum Schutz der Insassen.

EMV gerechtes Design muss daher von Beginn der Entwicklung von HV-Steckern an integriert werden; d.h. technische Optimierung der Stecker unter EMV- und Gewichts- und Kostenaspekten.

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

Die in diesem Beitrag dargestellte Vorgehensweise zeigt die ideale Verzahnung von Simulation und Messtechnik in verschiedenen Stadien des Produkt-Design Prozesses von HV Steckern für die Elektromobilität.

## 1.2 HV-Stecker & EMV

Der Kopplungswiderstand bzw. die Transferimpedanz nach IEC 62153-4-3 ist das Maß für die Schirmwirkung geschirmter elektrischer Leitungen sowie von Steckern und Komponenten bei Frequenzen bis ca. 30 MHz. Oberhalb von 30 MHz gilt die Schirmdämpfung nach IEC 62153-4-4 als Maß für die Schirmwirkung [1], [2].

Zum Anschluss und zur Verbindung der Komponenten kommen geschirmte Alu- und Kupfer-Leitungen mit Querschnitten von 16 mm<sup>2</sup> bis 50 mm<sup>2</sup> zum Einsatz, welche mit entsprechenden HV-Steckern konfektioniert sind.

HV-Stecker und Kabel müssen z.B. eine Dauerstromtragfähigkeit von 280 A bei 23 °C beziehungsweise von 195 A bei 83 °C aufweisen, während der Kopplungswiderstand (auch nach Alterung) je nach Anwendungsfall zwischen 2mΩ und 10mΩ betragen muss. Im Bereich bis 300 MHz ist eine Schirmdämpfung von bis zu 70 dB gefordert.

Der Wert einer Schirmdämpfung von 70 dB an geschirmten Kabeln ist nur mit einer Schirmkonstruktion aus Geflecht und Folie zu erreichen. Schirme aus nur einem Geflecht erreichen eine maximale Schirmdämpfung von ca. 45 dB.

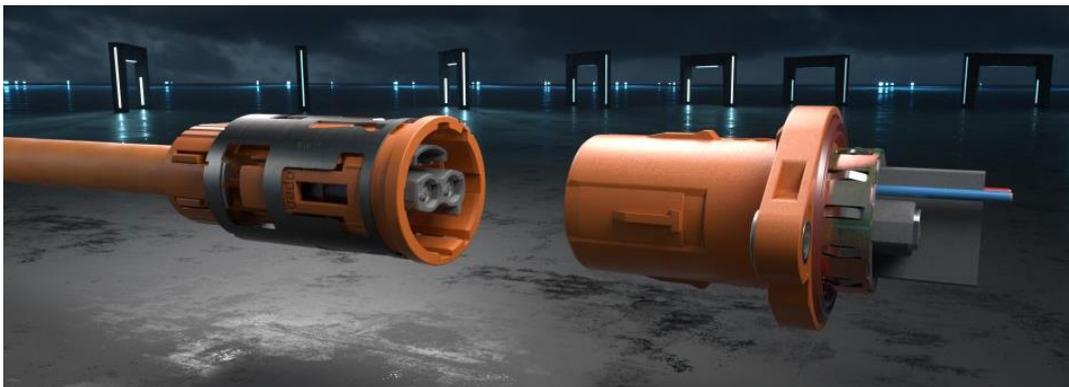


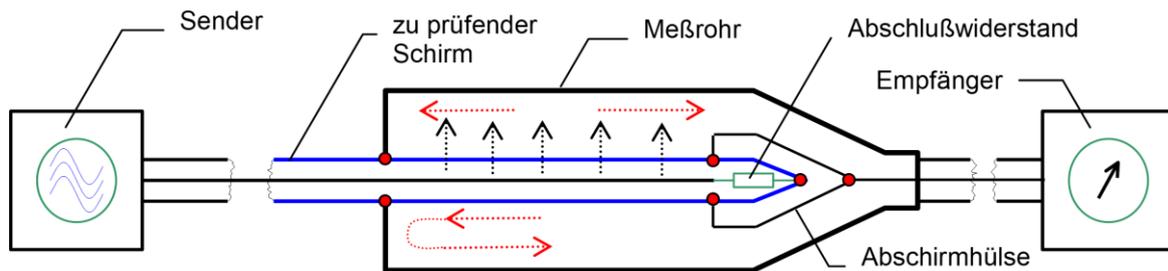
Bild 1: HV-Stecker PowerStar HPS40-2 von Hirschmann Automotive [8]

## 2 Triaxialverfahren

Da das Verfahren zur Bestimmung der Transferimpedanz in den folgenden Kapiteln angesprochen wird, sollen hier kurz die wichtigsten Eckpunkte speziell in Bezug auf Steckverbinder dargestellt werden:

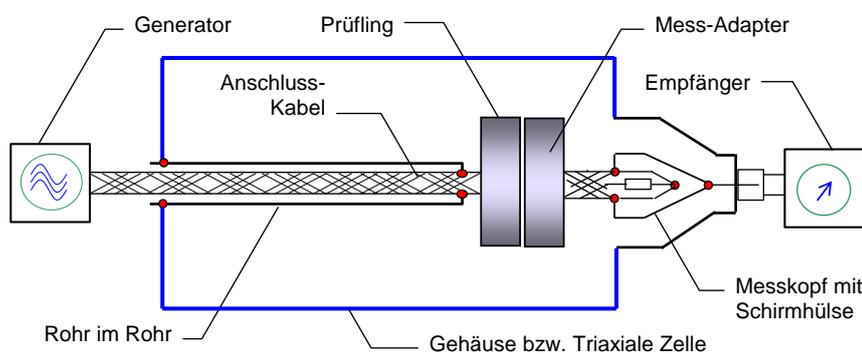
### 2.1 Triaxialverfahren für Steckverbinder

Die Messung bzw. Simulation von Kopplungswiderstand und Schirm- oder Kopplungsdämpfung an Kabeln und Steckern oder konfektionierten Kabeln kann mit dem Triaxialverfahren nach IEC 62153-4-7 durchgeführt werden, [3], [7].



**Bild 2: Prinzip Triaxialverfahren nach IEC 62153-4-3 und IEC 62153-4-4**

Zur Messung der EMV von größeren Komponenten wie z.B. HV-Stecker eignet sich die Triaxiale Zelle, [4], [7].



**Bild 3: Triaxiale Zelle mit "Rohr im Rohr" nach IEC 62153-4-7, Prinzipdarstellung**

## 2.2 Vergleich Triaxialverfahren - Speisedrahtverfahren

Das Triaxialverfahren hat gegenüber dem Speisedrahtverfahren verschiedene Vorteile. Diese sind sowohl in der Messung als auch in der Simulation zu erkennen und führen zu einer Steigerung der Genauigkeit und der Effizienz der Analyse:

- Alle Problemstellen des Steckers, an denen elektromagnetische Felder aus dem Innenbereich des Steckers austreten können, werden in der triaxialen Zelle erfasst.
- Das Speisedrahtverfahren dagegen erfasst im Wesentlichen nur die elektromagnetischen Felder, die zwischen der Schirmung des Steckers und dem Speisedraht liegen. Das ist bei Kabeln z.B. keine große Einschränkung. Wenn man allerdings große HV Stecker mit einer Seitenlänge von bis zu 100mm betrachtet, wird es eher dem Zufall überlassen ob man mit einer 2-5mm breiten Kupferleitung gerade eine potentielle Problemstelle erfasst oder nicht.
- Weiterhin kann durch eine automatisierte parametrische Variation der Sender-Impedanz im Triaxialverfahren ein minimaler Wert der Reflexion des inneren Kreises gefunden werden.
- Beim Speisedrahtverfahren ist es jedoch notwendig, ähnlich wie bei einer Messung, die Breite des Speisedrahts manuell so anzupassen, dass die Impedanz ungefähr  $50\Omega$  beträgt.

### 3 Simulation und Analyse

#### 3.1 Motivation

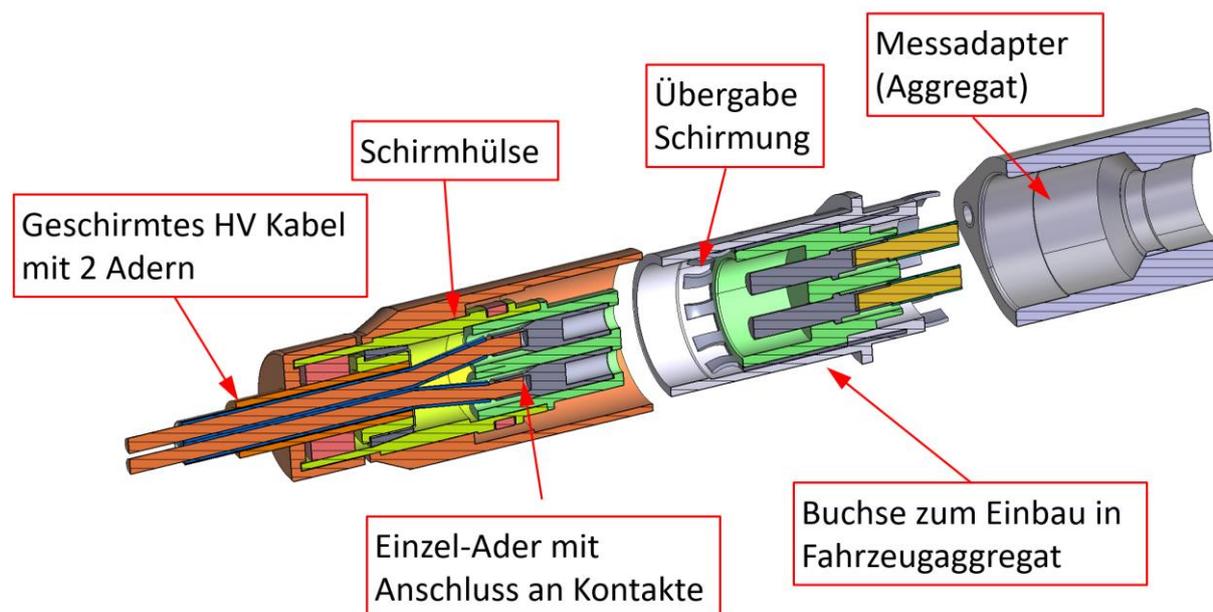
Das Ziel der Simulation ist:

- Die realistische Darstellung quantitativer Ergebnisse wie Schirmdämpfung und Kopplungswiderstand. Es muss beurteilt werden, ob der Entwurf den Anforderungen der Anwendung mit den dafür bestehenden Grenzwerten der o.a. Parameter entspricht.
- 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.

#### 3.2 Vorgehensweise

Eine typische Vorgehensweise besteht darin, den Stecker und die Messumgebung in einem elektromagnetischen 3D Simulationsprogramm nachzubilden [6].

Bei der Nachbildung des Steckers 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 lassen sich auch immer komplexere Materialeigenschaften, wie z.B. komplexe Oberflächenbeschichtungen, Oberflächenrauigkeiten etc. realistisch nachbilden.



**Bild 4: Prinzipielle Nachbildung eines HV Steckers und Einbau in Aggregat**

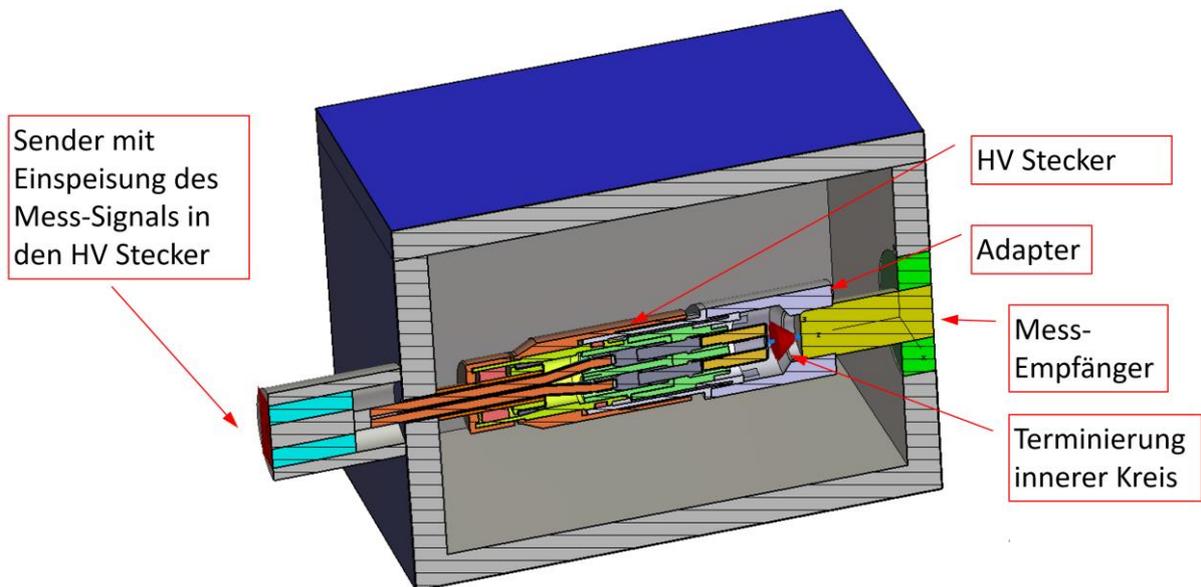
Der Aufbau der Simulation richtet sich nach dem gewählten Messverfahren. Wie bereits erwähnt soll hier das Triaxialverfahren eingesetzt werden. Bild 5 zeigt den HV Stecker in einer 140mm langen Triaxialzelle. Es sind dieselben Komponenten der Zelle wie in der Beschreibung des Prinzips in den folgenden Abschnitten zu erkennen.

Auf der linken Seite der Zelle ist der Sender zu erkennen, der das Mess-Signal in den inneren Kreis des geschirmten Kabels/Steckers einspeist. Dieser ist als Koaxialkabel definiert, dessen Impedanz leicht an die mittlere Impedanz des Prüflings angepasst werden kann.

Der Stecker selbst ist ein 2-poliger HV Stecker. Zur Messung sind die beiden Leitungen zusammengeschaltet. Der Stecker wird in einen Adapter montiert, der in der Realität einem

Aggregat, z.B. der Klimaanlage im elektrischen Fahrzeug entspricht. Wenn möglich sollte der Adapter in Bezug auf die äußere Formgebung nicht zu sehr vom Stecker abweichen, um Sprünge in der Impedanz des äußeren Kreises zu vermeiden.

Der Mess-Empfänger auf der rechten Seite der Zelle ist durch eine kurze Koaxialleitung mit 50Ω Systemimpedanz nachgebildet.



**Bild 5: Triaxiale Zelle mit HV Stecker**

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'schen Gleichungen durch einen iterativen oder direkten Lösungsalgorithmus für jeden betrachteten Frequenzpunkt [6].

### 3.3 Quantitative Analyse

In beiden Fällen erhält man gleich wie bei einer Messung mit dem Vektor Netzwerkanalysator S-Parameter, die mit den entsprechenden Beziehungen in Kopplungswiderstand und Schirmdämpfung umgerechnet werden können.

Bei der Auswertung wird der Abschnitt „7 Test method B: Inner circuit with load resistor and outer circuit without damping resistor“ der IEC 62153-4-3 zugrunde gelegt. Entsprechend deren Vorgaben ist die Schirmdämpfung

$$as=|S_{21}| \quad (1)$$

und die Transferimpedanz ergibt sich zu:

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

Mit:

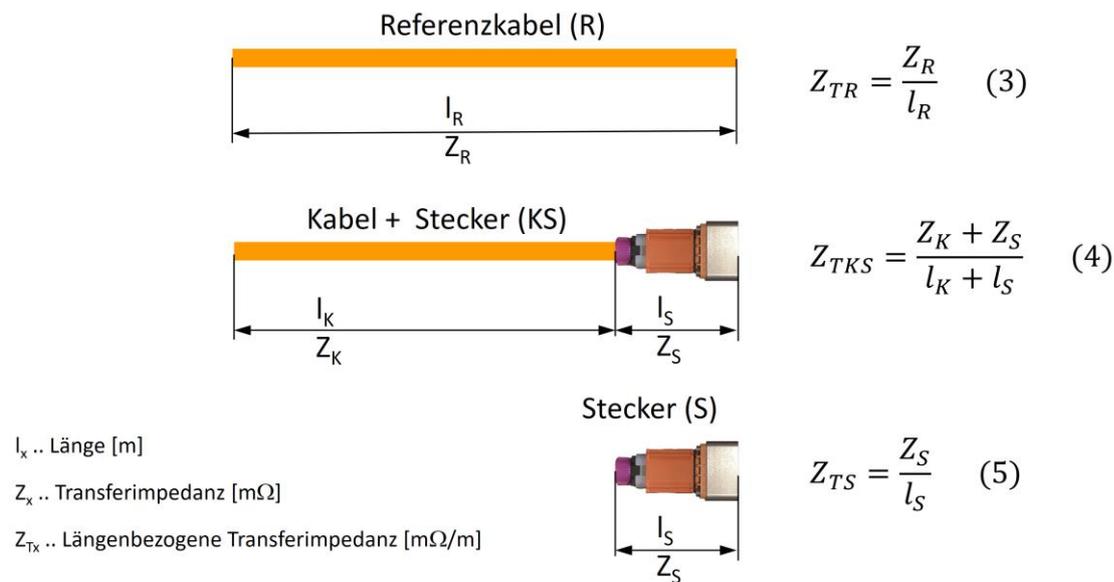
$Z_T$  Transferimpedanz [ $\Omega/m$ ]

$Z_0$  Systemimpedanz [ $\Omega$ ]

- $a_{meas}$       Gemessene Dämpfung (S21) in dB
- $a_{cal}$         Abziehender Wert der Dämpfung bei einer Kalibrationsmessung.  
Dies ist in der Simulation nicht notwendig und daher ist  $a_{cal} = 0$ .
- $L_c$             Kopplungslänge [m]
- $R_1$             Abschlusswiderstand im inneren Stromkreis (entweder gleich der  
Impedanz des inneren Stromkreises oder der Impedanz des  
Generators)

Bei Kabeln als Meterware wird der Kopplungswiderstand nach Gleichung (2) auf die Länge von 1m bezogen und üblicherweise in  $m\Omega/m$  (Milliohm pro Meter) angegeben. Wird wie in Bild 10 nur der Stecker gemessen, wird die Messlänge  $L_c$  nicht berücksichtigt und der Kopplungswiderstand des Steckers wird in  $m\Omega$  angegeben. Die Transferimpedanzen von Adapter und Kopfhülse werden mit null angenommen, da sie aus massivem gut leitenden Metall gefertigt sind.

Bei vielen Vorgaben der Grenzwerte für die Transferimpedanz für Steckverbinder wird der Begriff der Delta-Transferimpedanz verwendet.



**Bild 6: Geometrische Verhältnisse der Mess-Objekte**

Die obige Darstellung zeigt die geometrischen Verhältnisse der Messaufbauten.

Betrachtet man den Koppelwiderstand als Addition von Einzelwiderständen von Stecker und Kabel, so ergibt sich aus den 3 Konfigurationen im oberen Bild die folgende Beziehung für die Delta Transferimpedanz:

$$Z_{TDiff} = Z_{TKS} - Z_{TR} \quad (6)$$

$$Z_{TDiff} = \left( \frac{l_K}{l_K + l_S} - 1 \right) \cdot Z_{TR} + \frac{Z_S}{l_K + l_S} \quad (7)$$

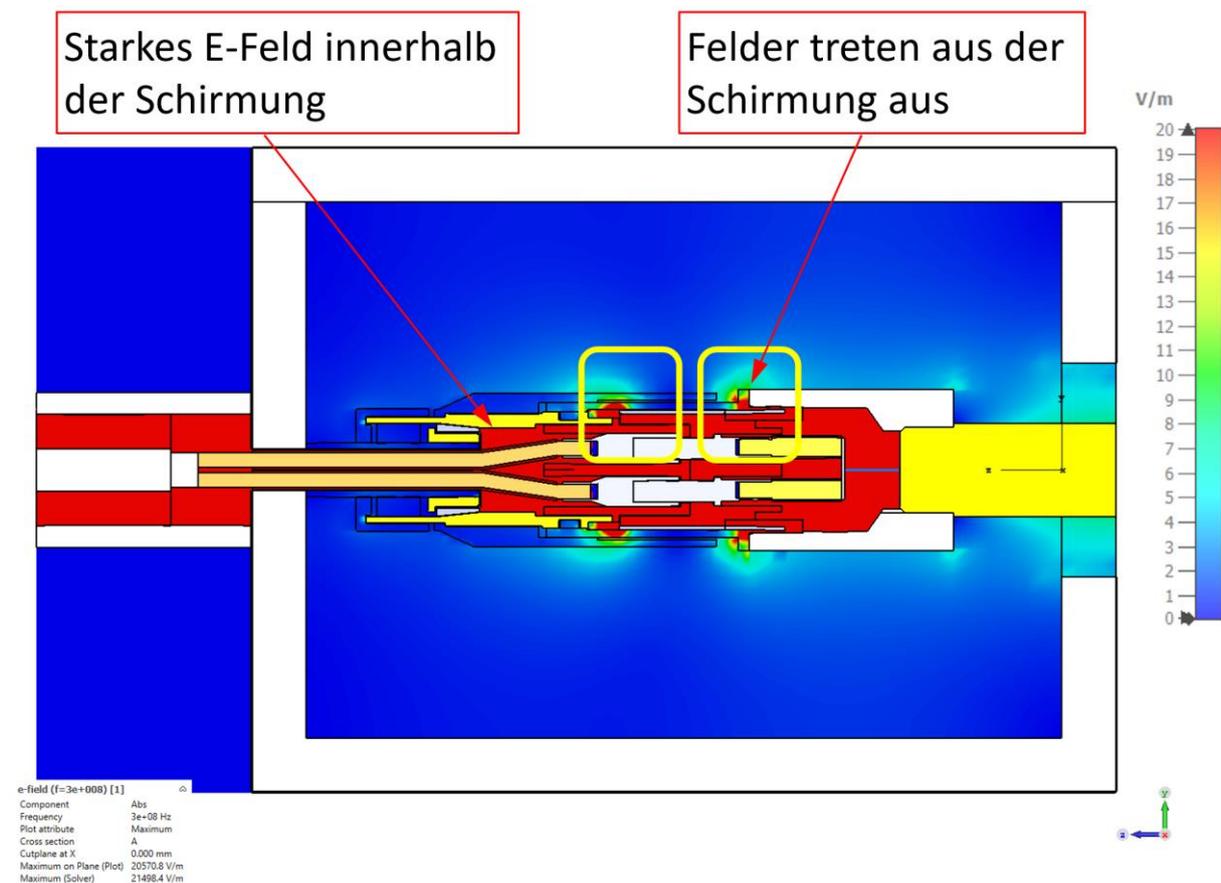
Wie aus der Gleichung (7) zu erkennen ist, ist der erste Term immer negativ und stellt einen Rest-Einfluss des Referenzkabels dar.  $Z_{TDiff}$  selber kann negativ werden, wenn der Kopplungswiderstand des Stecker  $Z_S$  wesentlich kleiner ist als der des Referenzkabels.

Um den Einfluss des Steckverbinders deutlicher aufzuzeigen, wäre eine Messung wie in Bild 10 dargestellt sicher eindeutiger, da hier nur  $Z_{TS}$  bzw.  $Z_S$  erfasst wird.

Mit der Simulation lassen sich also in kurzer Zeit vergleichbare Werte zu realen Messungen erzeugen. Im Entwurfsstadium ist diese Vorgehensweise wesentlich kostengünstiger als der aufwändige Bau von Mustern.

### 3.4 Qualitative Analyse

Neben diesen quantitativen Ergebnissen ist der Vorteil der Simulation, dass Vorgänge innerhalb des Steckverbinders sichtbar gemacht werden können. Die simulierten Kurven geben wie eine Messung die Summe aller Effekte wieder. Sie lassen aber keinen Rückschluss auf die Ursachen zu.



**Bild 7: Analyse der Schwachpunkte eines HV Stecker durch ausgetretene E-Felder**

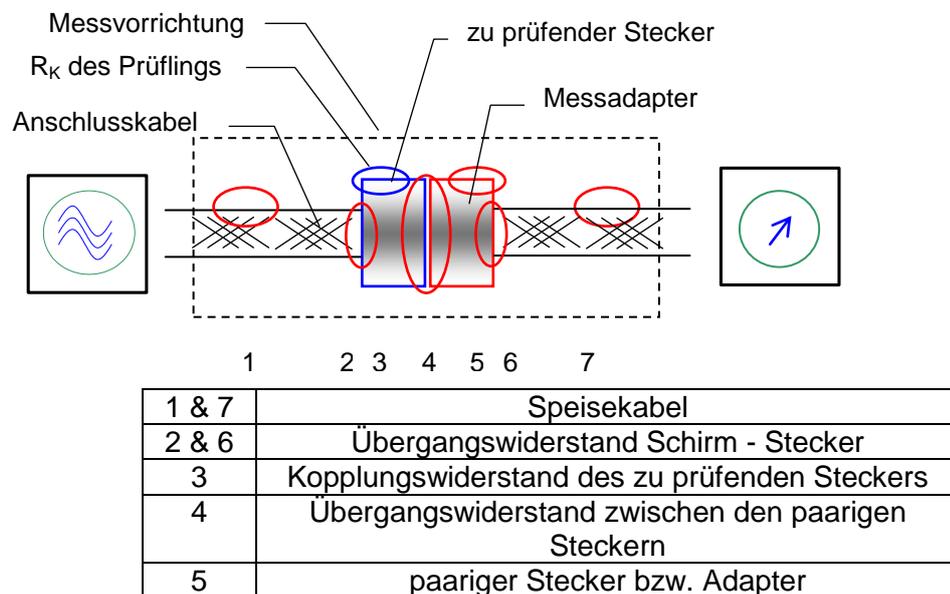
Dafür ist eine Analyse der elektrischen und magnetischen Feldverteilungen unerlässlich. Die obige Darstellung zeigt den Maximalwert des Betrags des E-Feldes in einer Zeitbereichssimulation. Die maximale Feldstärke beträgt ca. 20kV/m. Zur Visualisierung der Schirmeffekte im Bereich von ca. 80dB ist es aber notwendig, die Skalierung sehr stark zu verkleinern um diese zu erkennen. Aus diesem Grund wurde die maximale anzuzeigende Feldstärke um den Faktor 80dB=1000 auf 20V/m beschränkt. Erst in dieser Darstellung sind die Orte an denen die Felder aus dem Steckverbinder austreten gut zu erkennen.

## 4 Messadapter

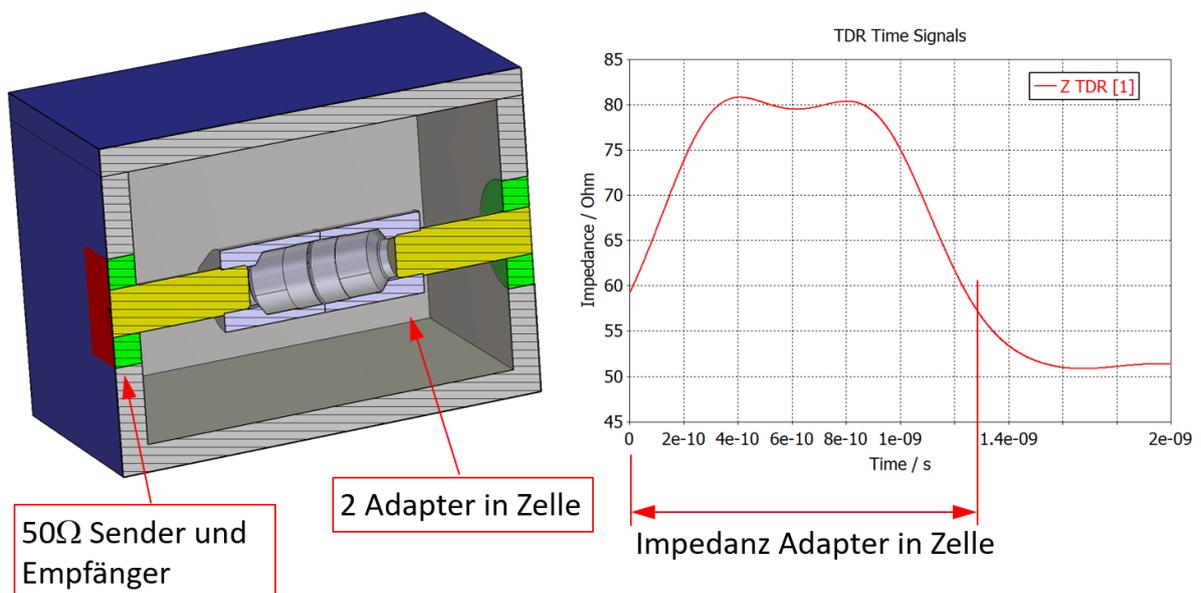
Die Messung der Schirmwirkung eines einzelnen Steckers oder eines konfektionierten Kabels ist nur mit geeigneten Messadaptern möglich.

Ungeeignete Messadapter können die Messung durch Eigenemissionen 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 Steckers hergestellt werden. Ist dies nicht möglich, muss der Adapter vom Messlabor angefertigt werden.



**Bild 8: Einflussgrößen bei der Messung der EMV eines Steckers**



**Bild 9: Simulation Messadapter in Zelle**

In Bild 9 ist eine TDR (Time Domain Reflectometer) Simulation der Impedanz des äußeren Kreises dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die Impedanz ca.  $80\Omega$  beträgt und damit deutlich über der Systemimpedanz von  $50\Omega$  des Messsystems liegt, so wie es in der Norm gefordert wird. Der Messadapter zeigt in Bezug auf die Transferimpedanz vom inneren zum äußeren Kreis ein ideales Verhalten, da alle Bauteile aus massivem Metall sind.

## 5 Vergleich von Simulation und Messung

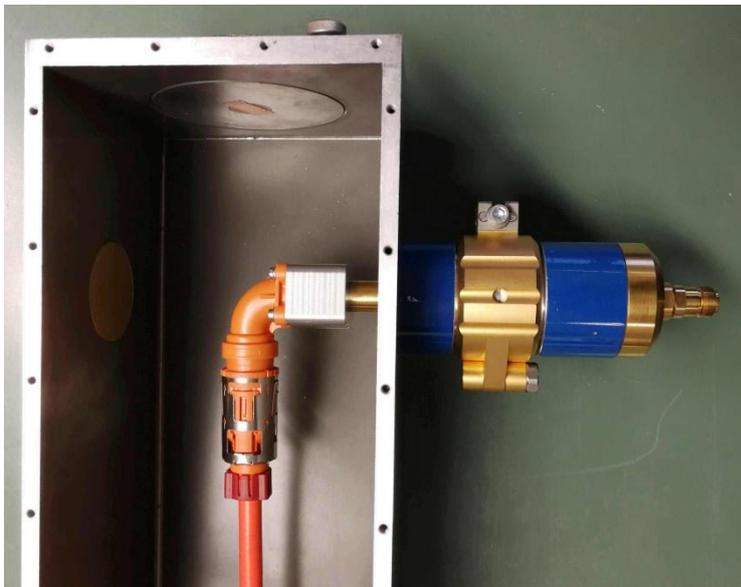
### 5.1 Messung

Die folgenden Bilder zeigen 2 typische Konfigurationen von Steckverbindern, die in einer triaxialen Zelle gemessen werden.



**Bild 10: Gerader HV Stecker in triaxialer Zelle**

Bild 10 stellt einen geraden ( $180^\circ$ ) HV Stecker dar. Hier sind Sender, Kabel, Stecker und Mess-Empfänger in einer Achse angeordnet. Hier ist die Anordnung zu sehen, bei der das HV Kabel so gut wie gar keinen Einfluss besitzt und nur der Steckverbinder gemessen wird.



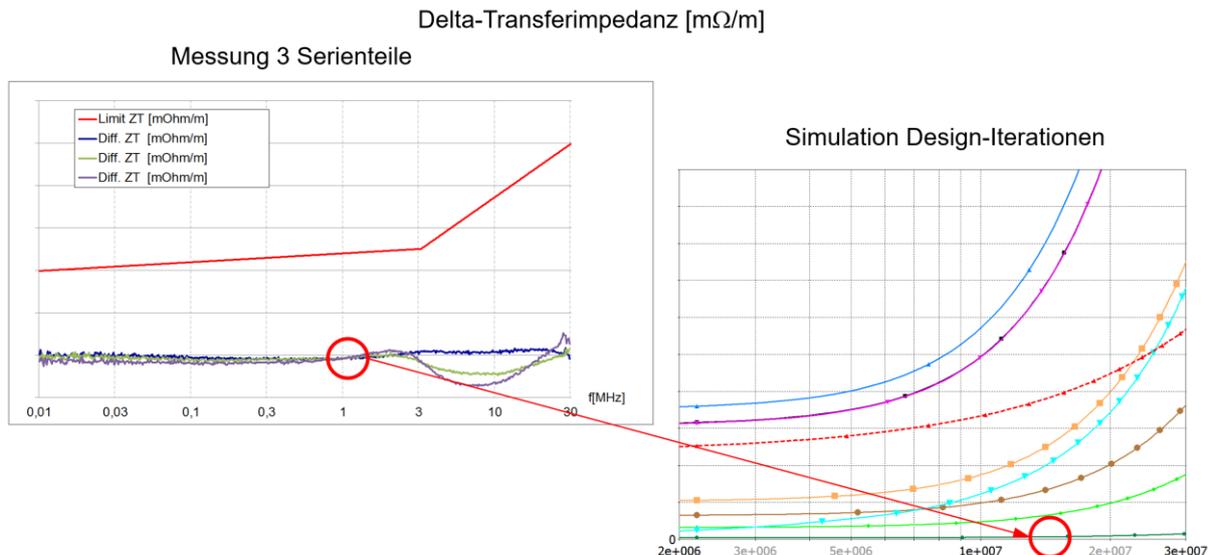
**Bild 11: Abgewinkelter HV Stecker in triaxialer Zelle**

In Bild 11 ist ein abgewinkelter ( $90^\circ$ ) HV Stecker zu erkennen. Der Mess-Empfänger ist hierbei an einem Auslass der triaxialen Zelle an einer Seitenwand angeordnet. Dadurch kann der Adapter sehr kompakt gestaltet werden.

In diesem Fall wird das Kabel (Länge ca. 800mm) mitgemessen und muss durch eine Messung eines Referenzkabels nach der Methode der Delta-Transferimpedanz herausgerechnet werden.

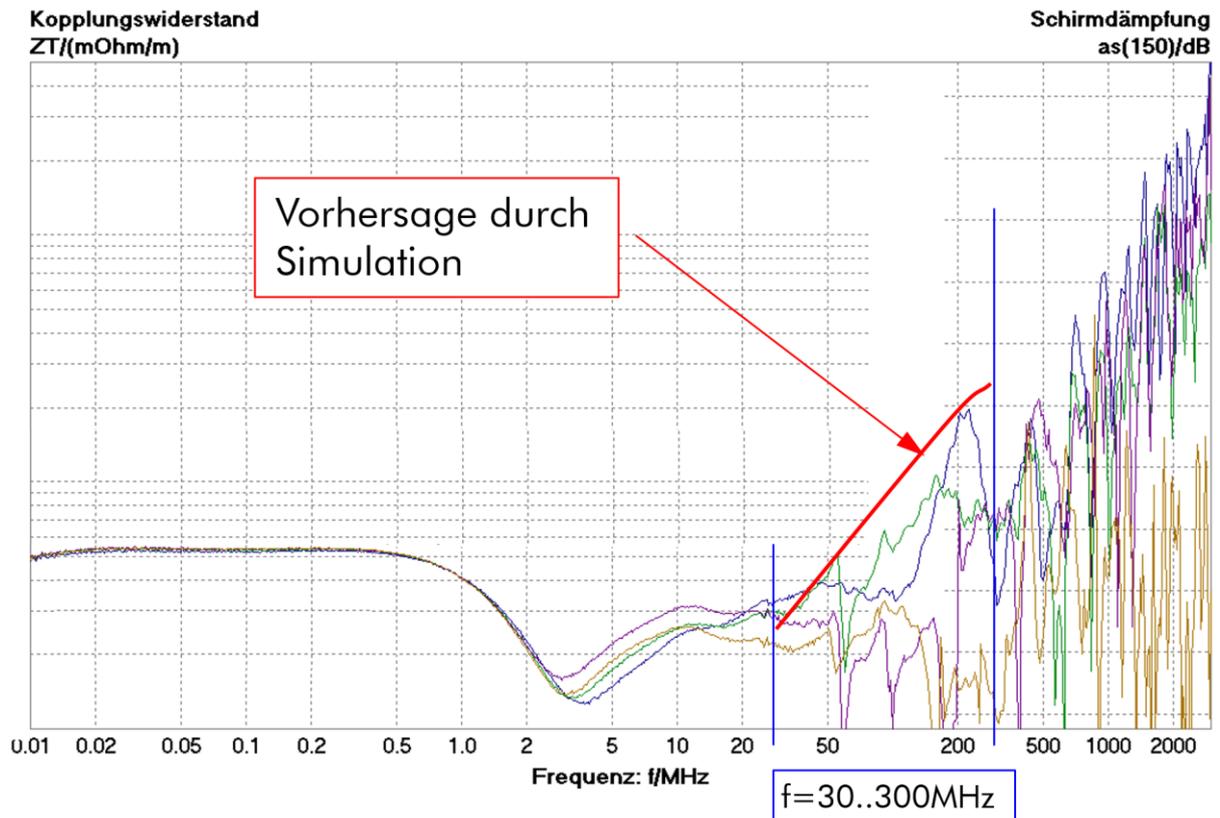
## 5.2 Vergleich Simulation – Messung

Die folgende Abbildung zeigt die simulierte Transferimpedanz bei mehreren Designiterationen sowie die Grenzwertkurve. Realisiert wurde die Variante mit geringstem  $Z_t$  die auch an 3 Teilen gemessen wurde. Beide Werte in Simulation und Messung liegen weit unter den erforderlichen Grenzwerten und bieten damit genügend Sicherheit für eine mögliche Verschlechterung über der Lebensdauer.



**Bild 12: Transferimpedanz, Vergleich Messung (links) und Simulation (rechts)**

Das folgende Bild zeigt den Vergleich für die Schirmdämpfung. Der simulierte Wert deckt als Einhüllende gut die Messwerte der 3 Prüflinge ab.



**Bild 13: Schirmdämpfung, Vergleich Messung und Simulation 3 Muster und Referenzkabel**

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In den vorausgehenden Abschnitten wurde die Analyse und Optimierung eines HV Steckers mit den Methoden der Simulation mit anschließender Verifizierung durch eine Messung dargestellt. Für beide Schritte 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 Stecker-Entwicklung belastbare Zahlen zu den EMV Kriterien Schirmdämpfung und Kopplungsimpedanz 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 das Entwicklungsteam um notwendige Modifikationen eines Entwurfs zielgerichtet durchführen zu können.

Eine abschließende Verifizierung mit demselben Testverfahren erlaubt dann neben der Bestätigung, dass die Grenzwerte eingehalten werden, wichtige Rückschlüsse auf die Qualität der Simulation und ermöglicht es, diese auf die Realität zu kalibrieren.

Durch den gesteigerten Bedarf an HV-Steckern und anderen Komponenten für die Elektromobilität erwarten wir einen vermehrten Einsatz dieser Methode auch für zukünftige Anwendungen. Zusätzlich sollte überlegt werden, die Stecker isoliert zu messen um einen aussagekräftigen Wert für die Transferimpedanz des Stecksystems zu erhalten.

## 7 Normen und Literatur

- [1] IEC 62153-4-3, Surface transfer impedance - Triaxial method
- [2] IEC 62153-4-4, Test method for measuring of the screening attenuation as up to and above 3 GHz, triaxial method
- [3] IEC 62153-4-7, Test method for measuring the transfer impedance ZT and the screening attenuation as or the coupling attenuation ac of RF-connectors and assemblies up to and above 3 GHz, Triaxial tube in tube method
- [4] IEC 62153-4-15, Test method for measuring transfer impedance and screening attenuation or coupling attenuation with triaxial cell
- [5] Lauri Halme & Bernhard Mund, Messen der Schirmwirkung elektrischer Kabel, Anwenderforum Elektrische Kabel, Technische Akademie Esslingen [TAE], 15. Oktober 2013
  
- [6] CST Suite 2021 Help, Dassault Systemes
- [7] Triaxiale Messtechnik CoMeT auf <https://bda-connectivity.com/comet/>
- [8] Hirschmann Automotive, <https://www.hirschmann-automotive.com>