

Untersuchungen zur Störkopplung und Schirmdämpfung von Elektro- und Hybridfahrzeugen

Dipl.-Ing. (FH) Norman Müller; Dipl.-Ing. (FH) Tom Wunderlich; Dipl.-Ing. (FH) Andre Winkler; Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Richter, Westsächsische Hochschule Zwickau, Fakultät Elektrotechnik / Professur EMV & Nachrichtentechnik
Dipl.-Ing. (FH) Felix Jacob, Carmeq Resident Engineering, Volkswagen AG

1. Einleitung

1.1. Ausgangspunkt

In Elektro- und Hybridfahrzeugen wird das konventionelle 12 V-Bordnetz um ein Hochvoltbordnetz zur Realisierung des elektrischen Traktionssystems erweitert. Durch die Integration wird die Komplexität der Fahrzeugelektronik deutlich gesteigert und eine wesentlich höhere Spannungsebene (bis 1000 V) eingeführt. Aufgrund von funktionell bedingten, schnellen Schaltvorgängen erzeugen die neuen elektronischen Hochvoltkomponenten wie beispielsweise der leistungselektronische Umrichter oder der DC-DC-Wandler Störungen, die bisher im Kraftfahrzeug nicht auftraten. Damit diese Störsignale die fehlerfreie Funktion anderer Elektroniksysteme im Fahrzeug nicht beeinflussen, wird das gesamte Hochvoltssystem u. a. als vollständig geschirmtes System in das Fahrzeug integriert. Andernfalls bietet sich zwischen beiden koexistierenden Bordnetzen ein besonders hohes Verkopplungspotential.

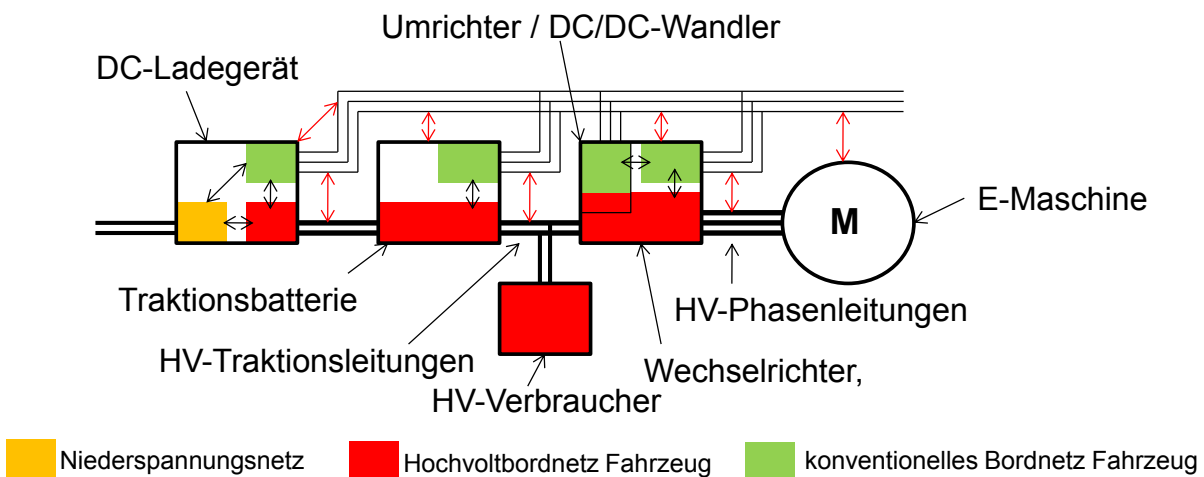


Bild 1: Verkopplungspotential zwischen Hochvolt- und 12 V-Bordnetz

Im Rahmen eines BMBF-Förderprojektes wird derzeit mit Industriepartnern ein Forschungsthema zur Entwicklung einer EMV-gerechten Hochvoltverkabelung für das elektrische Traktionssystem von Kraftfahrzeugen im Rahmen der Elektromobilität bearbeitet, dessen erste Ergebnisse im Hauptabschnitt dieses Beitrags vorgestellt und diskutiert werden.

1.2 Ziele

Im Mittelpunkt des Beitrags steht die Analyse des Störpotentials von elektrischen Antriebssystemen in elektrisch betriebenen Kraftfahrzeugen. Als Ergebnis zeigt sich, dass eine hochqualitative Schirmung des HV-Systems unabdingbar ist. Diese Schirmung kann dann durch Verlegungsoptionen beeinflusst werden. Daher soll im Beitrag u. a. gezeigt werden, wodurch die Schirmdämpfung real verlegter Leitungen abhängig ist. Es werden Erfahrungen mit verschiedenen Messverfahren vorgestellt, die mit Simulationen zu „worst case“ Betrachtungen gegenübergestellt werden. Die EMV-Eigenschaften des Hochvoltsystems werden entscheidend durch die Leitungen und der dazugehörigen Kontaktierungen beeinflusst. Im Beitrag werden daher des Weiteren Ergebnisse und Erfahrungen zur messtechnischen Umsetzung der Untersuchungen, u. a. zur nominellen und realen Bestimmung der Transferimpedanz von Hochvoltleitungen vorgestellt. In den Vergleich werden dabei Einflüsse mechanischer Beanspruchung (Biegeradien), aufbaubedingter Eigenschaften (Querschnitt, Schirmaufbau) sowie Steckverbindern einbezogen. Auf Basis der Leitungsuntersuchungen und Ergebnissen von Komponenten- sowie Fahrzeugtests steht im Fazit des Beitrages die Zusammenführung des Störpotentials zur Wirkung der Schirmung von Hochvoltleitungen bzw. kompletten Hochvoltssystemen in Elektro- und Hybridfahrzeugen.

2. Analyse des Störpotentials durch HV-Systeme

Die EMV-Anforderungen des Gesamtsystems im Fahrzeug können nur erfüllt werden, wenn die „Hochvolt“-spezifischen Anforderungen vorerst auf Komponenten- bzw. Systemebene detailliert untersucht und die EMV-Eigenschaften auf diesen Ebenen gezielt entwickelt wurden. Diese Eigenschaften müssen bei der Integration in das Gesamtfahrzeug erhalten bleiben. Erste Untersuchungen zeigen, dass eine Entkopplung von 70...80 dB zwischen dem Hochvoltsystem und dem konventionellen Bordnetz erforderlich ist. Diese Verkopplung kann sowohl über die geschirmt ausgeführten Hochvoltleitungen in ihrer realen Verlegung als auch über die Hochvoltkomponenten, wie Traktionsbatterie, Umrichter, DC-DC-Wandler und elektrischer Antriebsmaschine erfolgen. Die Hochvoltleitungen müssen in Traktionsleitungen zwischen Energiespeicher und Umrichter sowie Phasenleitungen zwischen Umrichter und E-Maschine unterschieden werden.

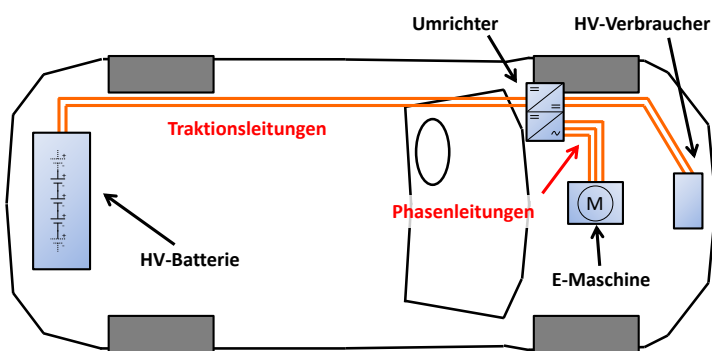


Bild 2: Übersicht Hochvoltbordnetz

Zur Entkopplung des Hochvoltsystems werden bisher verschiedene Ausführungen bezüglich Schirmung und Isolation von den Herstellern von E-Fahrzeugen ins Kalkül gezogen. Studien zeigen, dass die nominelle Schirmdämpfung dieser Leitungen bei der Integration ins Fahrzeug auf Grund von Biegeradien und realen Masseanbindungen sinkt.

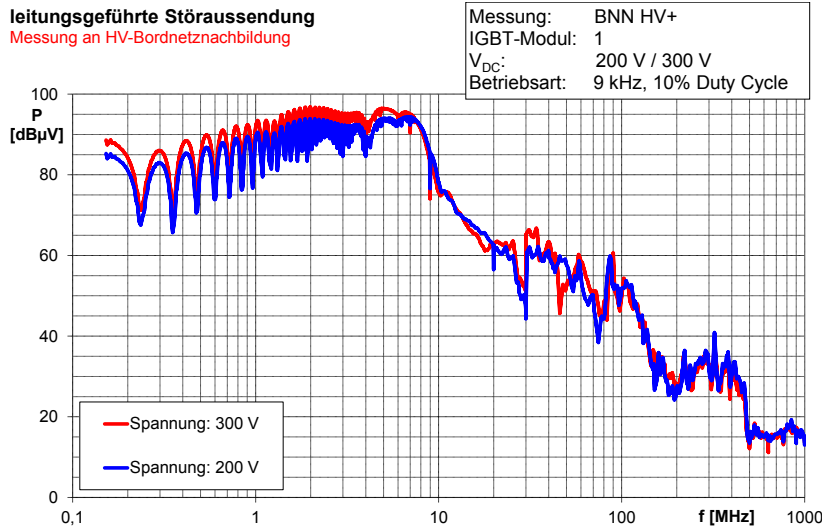
Eine Überkopplung der hochfrequenten Spektralanteile der Schaltflanken der leistungselektronischen Umrichter in das konventionelle Bordnetz ist die Folge.

Daher soll im ersten Projektschritt ermittelt werden, welchen Anteil die Leitungsverlegung an der Gesamtkopplung zwischen Hochvoltsystem und konventionellen Bordnetz besitzt. Ausgangspunkt der weiteren Untersuchungen ist der Aufbau der mess- und simulationstechnischen Basis, um die EMV-relevanten Eigenschaften von HV-Leitungen

analysieren zu können. Die Modellierung von verschiedenen Hochvoltleitungen mit ihrer Verkopplung zu Versorgungs-, Daten- und Sensorleitungen des 12-Volt-Bordnetzes in ihrer realen Verlegung im Fahrzeug muss hierbei ein besonderer Schwerpunkt sein.

3. Störaussendungspotential

Basierend auf Untersuchungen auf Komponentenebene wird die typische Störaussendungscharakteristik von elektrischen Antriebssystemen aufgezeigt. Das Diagramm in Bild 3 zeigt diese funktionsbedingte, leitungsgeführte Störaussendung von Leistungshalbleitermodulen.



Im Diagramm sind Ergebnisse mit verschiedenen Spannungsebenen (V_{DC}) dargestellt. Dabei wird deutlich, dass sich der charakteristische Störaussendungsverlauf nur minimal unterscheidet. Vielmehr ist dieser bestimmt durch die Stromänderungsgeschwindigkeit der Motor-Ansteuerung.

$$\Delta U = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Bild 3: Störaussendung IGBT-Modul auf Komponentenebene an Bordnetznachbildung bei variabler Spannung V_{DC}

Um die gestrahlte Störaussendung auf Fahrzeugebene zu analysieren, wurde durch einen Projektpartner (Fa. CitySax, KMU) ein umgerüstetes Fahrzeug zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um einen Trabant 601 Kombi, dessen Antriebssystem komplett elektrifiziert wurde. Die Batteriespannung liegt bei 96 V. Sowohl die Phasen- als auch Traktionsleitungen sind geschirmt ausgeführt, jedoch nicht über geschirmte Steckverbindungen an die jeweiligen HV-Komponenten kontaktiert. Die Schirmung hat daher keine Wirkung.

Für eine qualitative Bewertung wurde darauf geachtet, dass ausschließlich das HV-System aktiviert war.

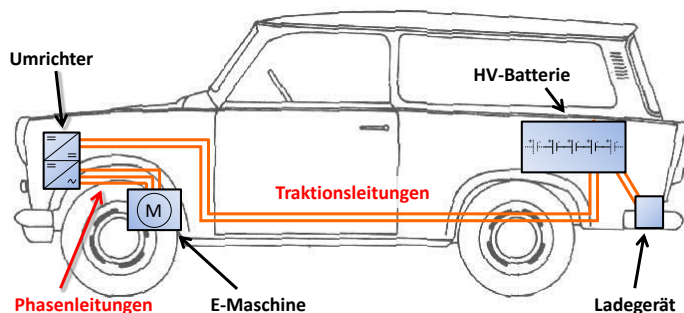
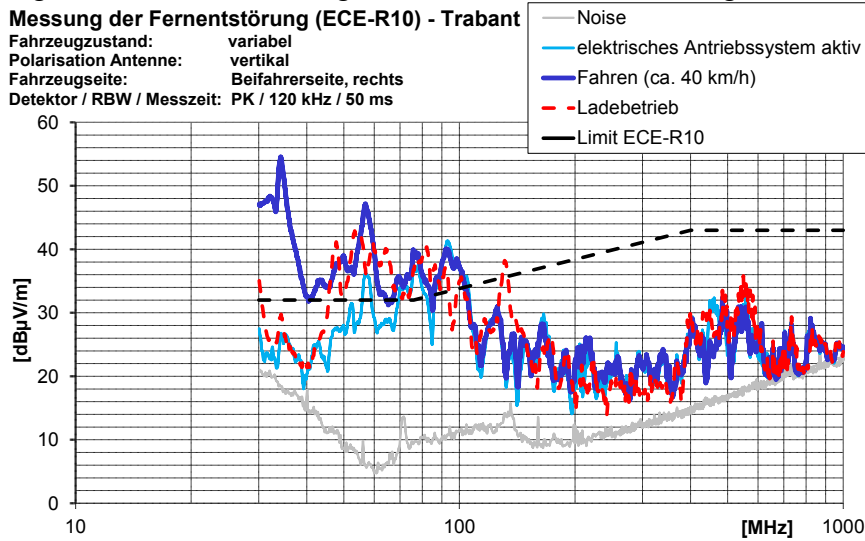


Bild 4: Aufbau elektrisches Antriebssystem **Trabant 601 Kombi elektrisch** (Fa. CitySax)



Bild 5: Störaussendung auf Fahrzeugebene (EMV-Halle WHZ)

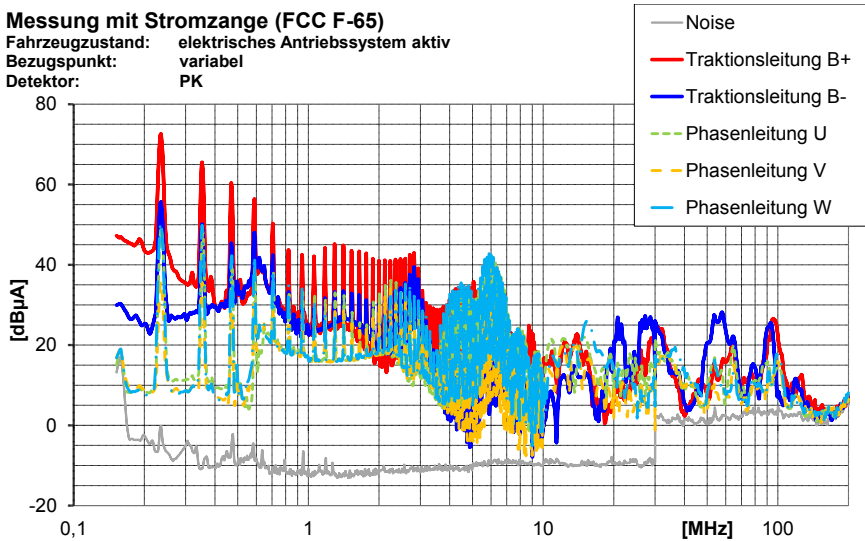
Um die gestrahlte Störaussendung des Fahrzeugs zu bewerten, wurden Untersuchungen in Anlehnung an die ECE-R10 bzw. die CISPR12 durchgeführt. Beispielhaft ist im nachfolgenden Diagramm das detektierte Schmalbandstörpotential bei unterschiedlichen Funktionszuständen dargestellt, welches durch das elektrische Antriebssystem des Testfahrzeugs abgestrahlt wird. Durch den Einsatz von ungeschirmten HV-Leitungen ergeben sich breitbandige Grenzwertüberschreitungen.



Um die Funktion anderer Systeme in Fahrzeugen mit höherer Elektronikdichte zu gewährleisten bzw. eine Wechselwirkung mit der Umwelt zu vermeiden, ist die Verwendung geschirmter HV-Leitungen im Fahrzeug unabdingbar.

Bild 6:
 Fahrzeugmessung – Bewertung von Schmalbandstörungen

Um die Störspektren der Fahrzeugmessung zu separieren, wurden Untersuchungen mit einer HF-Stromzange durchgeführt. Analog zu Erkenntnissen auf Komponentenebene (siehe Bild 3) zeigt sich eine hohe, leitungsgeführte Charakteristik der Störströme bis etwa 100 MHz.



Im Diagramm sind dazu die ermittelten HF-Störströme auf den Phasen- sowie Traktionsleitungen dargestellt.

Bild 7:
 Analyse HF-Ströme im Fahrzeug – Phasen- und Traktionsleitungen

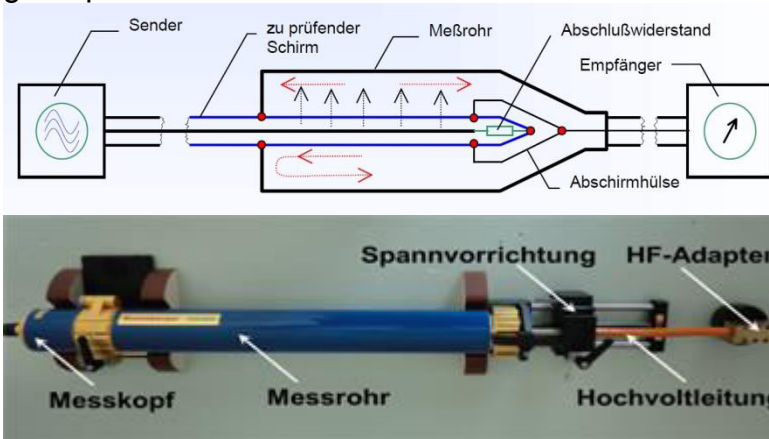
4. Bewertung EMV-relevanter Eigenschaften von HV-Leitungen

Die Untersuchungsergebnisse auf Komponenten- sowie Fahrzeugebene verdeutlichen das funktionsbedingte Störpotential von HV-Antriebssystemen. Daraus ergeben sich Anforderungen an EMV-relevante Eigenschaften von HV-Leitungen, neben mechanischen, chemischen und temperaturbedingten Anforderungen. Um Funktionsbeeinträchtigungen im 12 V-Bordnetz und beim Empfang von Funkdiensten zu vermeiden bzw. zu minimieren, muss eine Entkopplung des HV-Systems vom Rest der Fahrzeugelektronik

realisiert werden. Verschiedene Schirmausführungen von HV-Leitungen sind dabei eine Realisierungsmöglichkeit.

Um die Transferimpedanz bzw. die Schirmdämpfung dieser geschirmten HV-Leitungen zu bewerten, sind aktuell zwei Messmethoden mit dem Speisedrahtverfahren und dem triaxialen Messsystem in Verwendung.

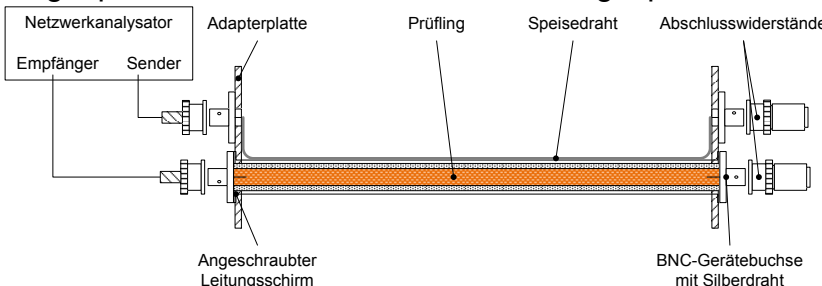
Das triaxiale Messverfahren kann für die Bewertung unterschiedlicher Schirmungsvarianten verschiedener Hochvoltleitungen herangezogen werden, wobei der Messaufbau gut reproduzierbar ist.



Der Aufbau ist durch Module einfach erweiterbar, z. B. für die zusätzliche Bewertung von HV-Leitungen inkl. Kontaktierungen.

Bild 8: Triaxiales Messverfahren – Schematischer Aufbau [4] / realer Messaufbau (Fa. Bedea)

Das Speisedrahtverfahren oder auch Paralleldrahtverfahren beruht auf dem Prinzip der Strominjektion und stellt eine kostengünstige Messalternative dar. Zur Bestimmung der Transferimpedanz wird die zu prüfende Leitung in eine angepasste Messvorrichtung eingespannt. Parallel zu der eingespannten Leitung wird eine zweite



Leitung, die sogenannte Speiseleitung, verlegt und impedanzgerecht angepasst. Die Speiseleitung kann beispielsweise aus einem Flachbandkabel oder aus leitendem Kupferklebeband bestehen.

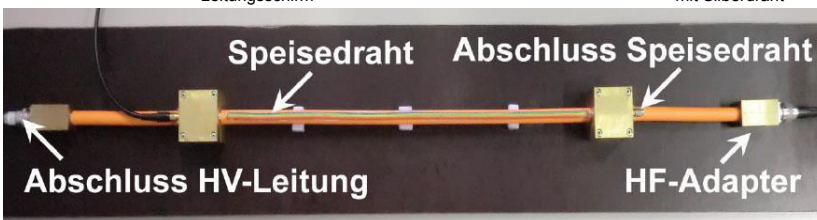


Bild 9: Speisedrahtverfahren – Schematischer Aufbau / realer Messaufbau

Da die HV-Leitungen im Fahrzeugeinsatz nicht nur aus einem kurzen, geraden Leitungsstück bestehen, sondern mit speziellen Kontaktierungen konfektioniert und in gewissen Biegeradien verlegt werden, sind zusätzliche Untersuchungsreihen mit den genannten Messverfahren notwendig.

Im Rahmen des Forschungsprojektes sind durch einen weiteren Partner Hochvoltleitungen in unterschiedlicher Schirmausführung zur Verfügung gestellt worden. Des Weiteren wurden durch die Fa. Dräxlmaier Leitungsstücke mit HV-Steckverbindungen aus dem „automotive“-Bereich konfektioniert.

Da die HV-Leitungen im Fahrzeug diversen mechanischen Beanspruchungen unterliegen, die sich vor allem durch die Montage ergeben, soll die Transferimpedanz bzw.

Schirmdämpfung bei verschiedenen Biegeradien bzw. auch beim Überbiegen analysiert werden.



Bild 10: Messaufbau Speisedrahtverfahren für unterschiedliche Biegeradien der HV-Leitungen

Die nebenstehenden Abbildungen zeigen dazu den verwendeten Messaufbau für Biegeradien im doppelten (2D), vierfachen (4D) sowie achtfachen (8D) Außendurchmesser für HV-Leitungen mit Querschnitt 25 mm² sowie 35 mm².

Bild 11 zeigt die Messergebnisse für eine ausgewählte Leitung. Die Messplots weichen dabei in Abhängigkeit vom Biegeradius im Bereich der magnetischen Lochkoppelung (ca. 100 MHz) geringfügig voneinander ab.

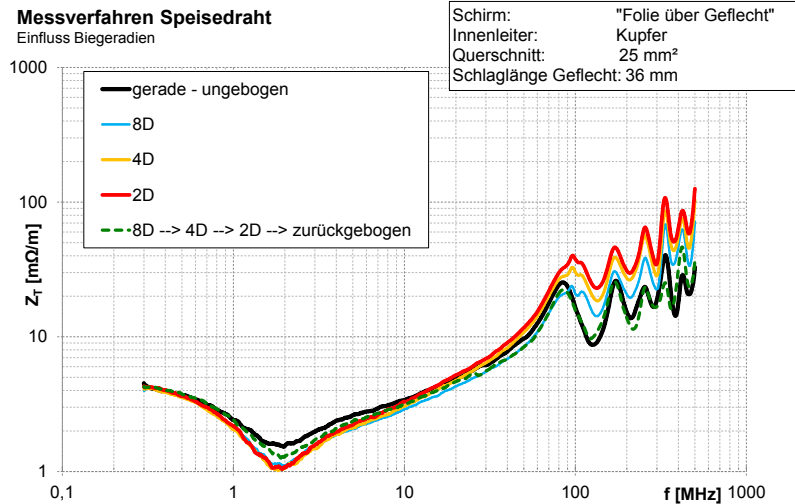


Bild 11: Messergebnisse zum Einfluss der Biegeradien

Die Leitung wurde nacheinander mit verschiedenen Radien gebogen und abschließend im Ursprungszustand erneut vermessen. Die Werte der Ausgangsmessungen decken sich dabei fast mit den Werten der Endmessung für diese untersuchte HV-Leitung. Eine weitere Messreihe mit einem 2D-Biegeradius um 180° sowie zurück lieferte vergleichbare Ergebnisse. Das ergibt als Schlussfolgerung, dass die Biegung der Leitungen einen geringen bzw. vernachlässigbaren Einfluss hat.

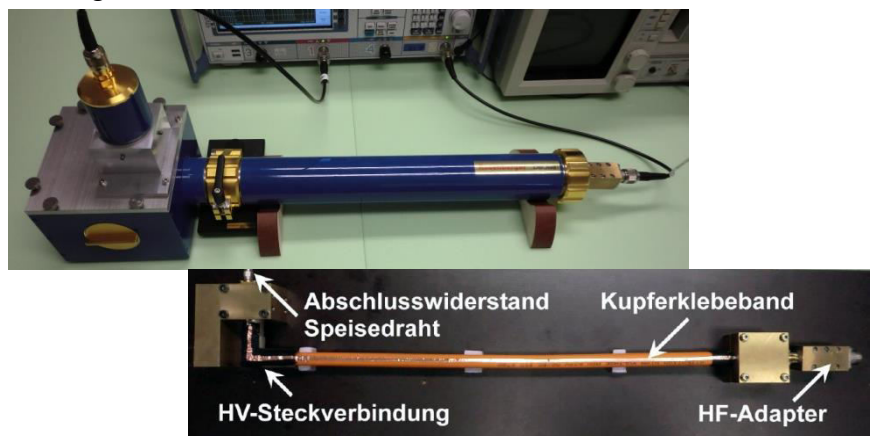
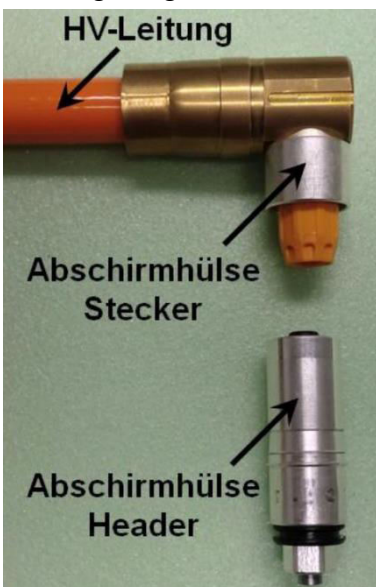
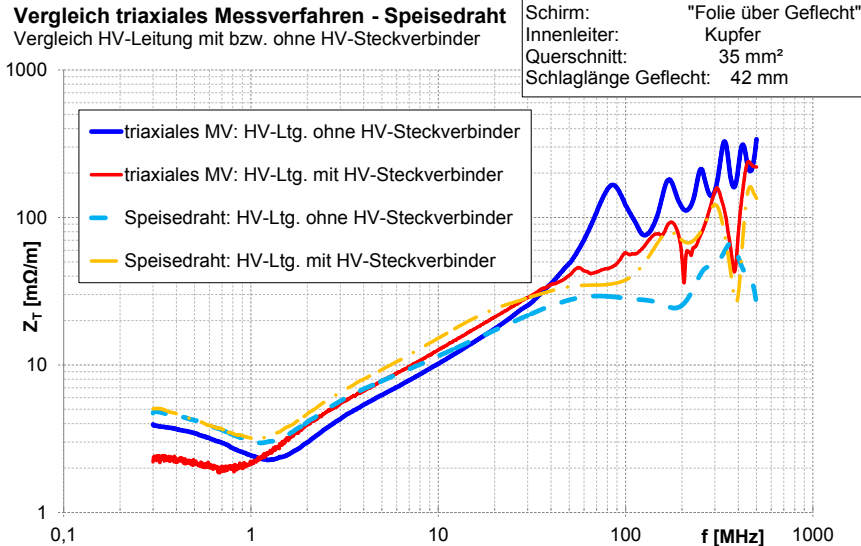


Bild 12: links: konfektionierte Leitung mit HV-Steckverbinder (ohne Kunststoffumhüllung)
oben rechts: angepasster, triaxialer Messaufbau (Fa. Bedea)
unten rechts: angepasstes Speisedrahtverfahren

Für eine Bewertung der Transferimpedanz bzw. der Schirmwirkung einer konfektionierten HV-Leitung, müssen die Messaufbauten angepasst werden, damit der Steckverbinder im Massekonzept des Messaufbaus integriert wird. Das nachfolgende Diagramm zeigt die Ergebnisse für eine unkonfektionierte sowie eine konfektionierte HV-Leitung im Vergleich der beiden Messverfahren. Die geringen Unterschiede der Ergebnisse lassen sich auf Einflüsse der Messaufbauten zurückführen.



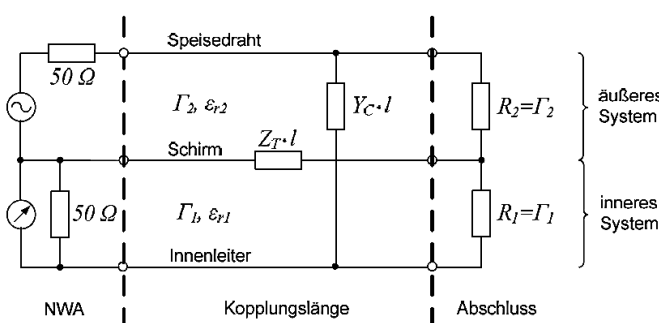
Durch die Anbindung des Schirmes der HV-Leitung an den Steckverbinder wird der ohmsche Widerstand geringfügig verändert. Dadurch fallen vor allem im Bereich der magnetischen Lochkoppung die Messergebnisse unterschiedlich aus.

Bild 13:
 Vergleich Messverfahren für Bewertung HV-Leitung mit / ohne HV-Steckverbinder

5. Simulation zu EMV-relevanten Eigenschaften von HV-Leitungen

Die vorangestellten Maßnahmen zur Bestimmung der EMV-relevanten Eigenschaften der HV-Leitungen spiegeln die Komplexität sowie den technischen Aufwand wider, die für die Bewertung der Schirmungseigenschaften notwendig sind. Daher liegt es nahe, für „worst case“-Betrachtungen mittels Simulation durchzuführen.

Für diese Betrachtungen von HV-Leitungen unterschiedlichen Aufbaus, wurden Simulationen zur Transferimpedanz auf Basis des Speisedrahtverfahrens durchgeführt. Das Prinzip wird in der folgenden Abbildung ersichtlich:



Durch die Messanordnung bilden sich zwei Systeme. Der Speisedraht bildet zusammen mit dem Kabelschirm eine Leitung mit definiertem Wellenwiderstand, hier als äußeres System gekennzeichnet. Das innere System bildet die HV-Leitung selbst, bestehend aus Innenleiter und Kabelschirm. Dadurch ergibt sich mit der HV-Leitung und dem Speisedraht ein gekoppeltes Leitungssystem.

Bild 14: Kopplungssystem HV-Leitung [5]

Durch das Einbringen von Strömen und Spannungen in den Speisedraht und der damit einhergehenden Überkopplung in den Prüfling soll die Qualität des Schirmes bewertet werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau einer HV-Leitung im Querschnitt und definiert die notwendigen Abmessungen, die für die Berechnungen notwendig sind.

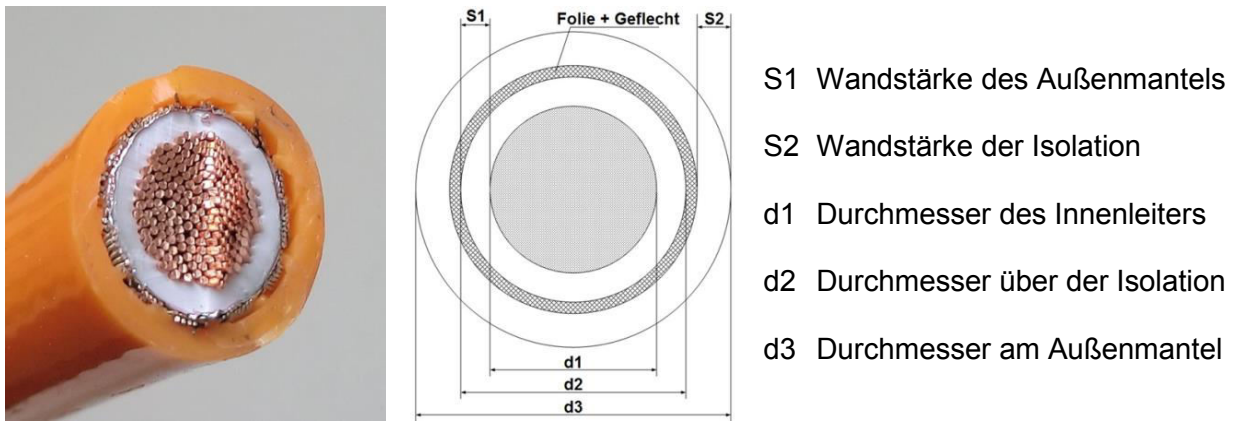


Bild 15: Aufbau einer HV-Leitung im Querschnitt – links reell / rechts: schematisch

Zur Berechnung des Wellenwiderstands der HV-Leitung gilt folgende Formel:

$$Z_l = \frac{Z_{W0}}{2\pi \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad \text{mit} \quad Z_{W0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 120\pi \, \Omega \approx \underline{376,73 \, \Omega}$$

D ist hierbei der Durchmesser des Schirmes und d der Durchmesser des Innenleiters. Als Isolationsmaterial zwischen Leiter und Schirm kommt vernetztes Polyethylen zum Einsatz, wobei von einer relativen Dielektrizitätszahl von $\epsilon_r = 2,25$ ausgegangen wird.

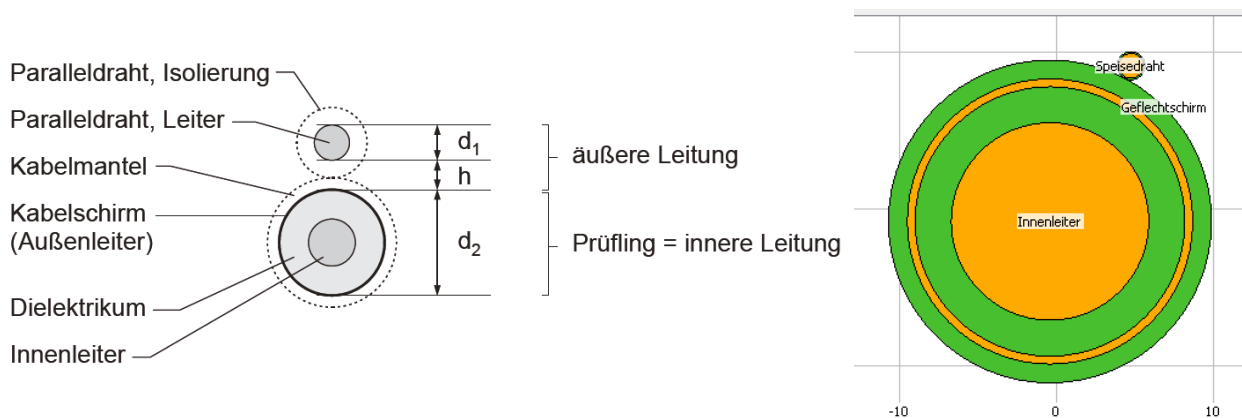


Bild 16: Darstellung Simulationsmodell

Als Simulationswerkzeug findet Feko (Fa. EMSS-SA) Einsatz. In der aktuellen Programmversion (6.3-225030 (x64) – Stand 10/2013) ist es derzeit jedoch nicht möglich, einen Folienschirm in Kombination mit einem Geflechschirm zu modellieren. In einem Programmupdate soll dies aber implementiert werden. Des Weiteren kann eine real gewickelte Folie nicht dargestellt werden, sondern ist nur als elektrisch dichtes Rohr darstellbar – im folgenden Diagramm als *Folie (elektrisch dicht)* bezeichnet.

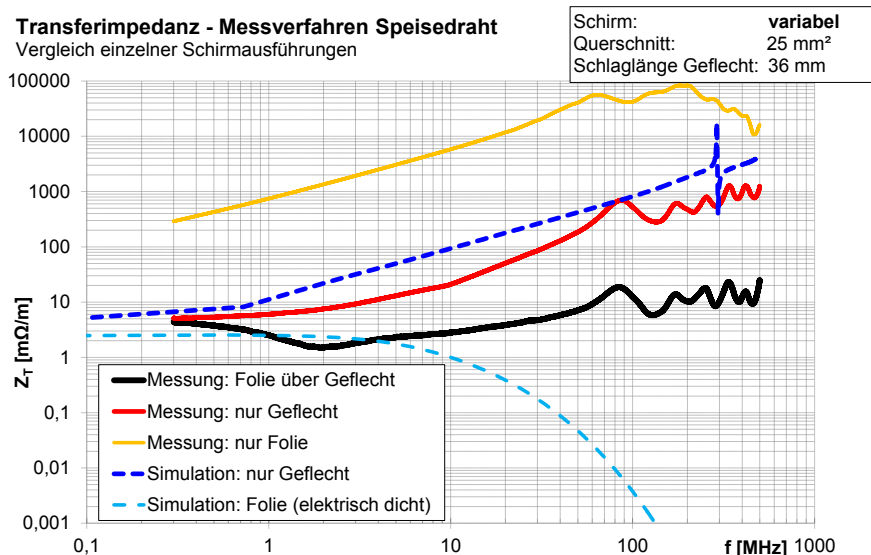


Bild 17: Vergleich Schirmvarianten Messung / Simulation

Dies wird aus nebenstehendem Diagramm deutlich.

Der Vergleich von Messung und Simulation einer HV-Leitung, die nur mit Schirmgeflecht versehen ist, zeigt eine vergleichbare Charakteristik. Durch Anpassung des Modells durch Verifikation mit weiteren Messreihen, soll eine bessere Übereinstimmung erreicht werden.

Ein Vergleich von Messung und Simulation einer HV-Leitung, die nur mittels Folie geschirmt ist, zeigt die bereits angedeutete Diskrepanz in der Software. Bei der Messung wird deutlich, dass der Folienschirm durch das Trägermaterial teilweise isoliert ist, wobei bei der Simulation ein geschlossenes Rohr nachgestellt wird mit.

Durch verbesserte Modelle und Anpassung des Softwareumfangs sollten zukünftig umfangreiche „worst case“-Betrachtungen zu EMV-relevanten Eigenschaften von Schirmausführungen von HV-Leitungen herangezogen werden können.

6. Ausblick

Die Untersuchungen verdeutlichen die Notwendigkeit einer hochqualitativen Schirmung von Hochvolt-Leitungen.

Der Aufwand zur Bewertung von ungeschirmten sowie geschirmten Leitungen im Fahrzeug ist kosten- und materialintensiv. Um die Lücke zum geschirmten HV-System im Fahrzeug zu schließen ist daher geplant, einen geschirmten Komponentenaufbau zu generieren. An diesem können konfektionierte HV-Leitungen bewertet werden. Auf Basis dieser Ergebnisse kann dann abschließend die Integration in ein Fahrzeug erfolgen.

7. Fazit

Ziel des Beitrags war das Aufzeigen des Störpotentials durch HV-Komponenten bzw. komplette Antriebssysteme in Elektro- und Hybridfahrzeugen. Um eine Entkopplung zur übrigen Fahrzeugelektronik zu gewährleisten, ist der Einsatz von geschirmten HV-Leitungen unabdingbar. Dabei wurden Untersuchungsergebnisse mit zwei typischen Messverfahren zur Bewertung der Transferimpedanz bzw. Schirmdämpfung dargelegt. Durch einbaubedingte Biegeradien und Stecker-Konfektionierung wurden Anpassungen dieser Messverfahren vorgestellt und mit Ergebnissen untermauert.

Des Weiteren wurde die Anwendbarkeit der Simulation zu „worst case“ Betrachtungen vorgestellt.

8. Literatur

- [1] ECE-R10, Ed. 4: „CONCERNING THE ADOPTION OF UNIFORM TECHNICAL PRESCRIPTIONS FOR WHEELED VEHICLES, EQUIPMENT AND PARTS WHICH CAN BE FITTED AND/OR BE USED ON WHEELED VEHICLES AND THE CONDITIONS FOR RECIPROCAL RECOGNITION OF APPROVALS GRANTED ON THE BASIS OF THESE PRESCRIPTIONS“
- [2] CISPR12: „CISPR 12 Ed.6: Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of off-board receivers“
- [3] CISPR25: „CISPR 25 Ed.3: Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers“
- [4] Mund, B.: „Messen der Schirmwirkung von HV-Leitungen mit der „Triaxialen Zelle““, Bedea GmbH, Asslar 2011
- [5] Hochloch, J.: „Messverfahren zur Beurteilung des Emissionsverhaltens von geschirmten Energiekabeln für KFZ-Hochvoltbordnetze“, Universität Stuttgart, 2010