

Analyse der Störunterdrückung von HV-Systemen von E-Fahrzeugen

Dipl.-Ing. (FH) Matthias Trebeck, Prof. Dr.-Ing. Matthias Richter, Westsächsische Hochschule Zwickau, Dr.-Friedrichs-Ring 2A, 08056 Zwickau
Dr.-Ing. Bernd Körber, Forschungs- und Transferzentrum e. V. an der Westsächsischen Hochschule Zwickau, Dr.-Friedrichs-Ring 2A, 08056 Zwickau
Dipl. El.-Ing. ETH Fabian Beck, EPCOS Schweiz GmbH, G.-Blotzheim-Straße 3, CH-4500 Solothurn

1 Einleitung

Die elektronischen Hochvoltkomponenten des Traktionssystems von Elektrofahrzeugen erzeugen Störungen von hoher Intensität, die gegebenenfalls die fehlerfreie Funktion anderer Elektroniksysteme im Fahrzeug beeinflussen. Die EMV-Anforderungen im Fahrzeug können bisher nur erfüllt werden, wenn diese Gesamtsysteme aufwendig geschirmt sind.

Nachfolgend werden Untersuchungen vorgestellt, bei denen die Schirmung eines Hochvoltsystems, bestehend aus Umrichter, Motor, Spannungsquelle und Ansteuerung, durch innovative Filter in den Traktions- oder Phasenleitungen ersetzt wird. Dazu wird ein Messaufbau nach CISPR 25 [1] gezielt abgeändert. Der dadurch mögliche Verzicht auf rotierende Komponenten durch die Entwicklung einer Nachbildung für die E-Maschine führt zu signifikant vereinfachten Randbedingungen bei den Messungen ohne die Aussagekraft der Ergebnisse zu beeinflussen. Die entwickelte Einrichtung lässt sich unabhängig von dem eingesetzten EUT geschirmt und ungeschirmt betreiben.

Die Einflussparameter auf die Störaussendung können damit gezielt analysiert werden. Zielstellung ist der Vergleich der Störaussendung bei Schirmung oder Filterung unter applikationsnahen Bedingungen.

Für den Messaufbau wurde ein EMV-geeignetes Netzwerksimulationsmodell entwickelt. Es wird die beispielhaft auf Randbedingungen beim Filterentwurf eingegangen und die erreichbare Störunterdrückung an Beispielen dargelegt.

Die Arbeiten erfolgten in im Auftrag der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) des Verbandes der Automobilindustrie e. V. (VDA).

2 Störquellen und Koppelpfade des elektrischen Traktionssystems

Ein Antriebssystem für Elektrofahrzeuge ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Die Quelle der Störungen sind schaltend arbeitende Leistungshalbleiter.

Der klassische Umrichter besteht im Leistungskreis aus 6 IGBT's und den zugehörigen Freilaufdioden. Im Betrieb werden die IGBT's wechselseitig aktiv geschaltet. Der Motor als induktive Last treibt auch bei ausgeschalteten IGBT den Strom weiter, so dass dieser auf die zugehörige Freilaufdiode kommutiert. Maßgeblich für die Signalformen der „Störquelle“ sind somit sowohl der IGBT als auch die Diode mit ihren spannungs- und lastabhängigen Parametern.

Die Schaltzeiten der IGBTs liegen je nach der Stromintensität im Lastkreis zum Schaltzeitpunkt beim untersuchten System im Bereich von ca. 100 ns...400 ns. Damit entsteht zusammen mit der Taktzeit und dem Tastverhältnis eine Abfolge von

Trapezimpulsen für die Spannung. Daraus lässt sich ein worst-case-Spektrum auf Basis der Fourier-Analyse ableiten. Der nicht lückende Verlauf des Stromes ist von der Last und dem Tastverhältnis der geschalteten Spannung abhängig.

Für den geplanten Einsatz von Filtern ist es notwendig, die auftretenden Störungen in Gleich- und Gegentaktkomponenten zu zerlegen, da diese unterschiedlich gefiltert werden. Generell lässt sich sagen, dass der Stromfluss im Antriebssystem die Gegentaktstörungen und die geschaltete Spannung die Gleichtaktstörungen hervorrufen [4].

Ein Messaufbau zur Untersuchungen solcher Systeme muss die relevanten Störer und Koppelpfade berücksichtigen, Analysemöglichkeiten bieten und EMV-Maßnahmen sollten ohne Umbauten implementierbar sein.

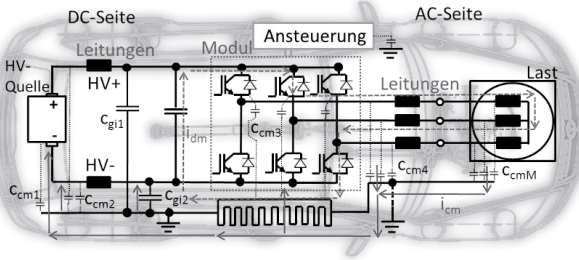


Abbildung 1
Hauptkomponenten eines elektrischen Traktionssystems mit beispielhaften Gleich- und Gegentaktstörpfad

3 EMV-Maßnahmen für Hochvoltssysteme im Fahrzeug

3.1 Schirmung

Die Wirksamkeit einer Schirmung wird im elektrisch kurzen Bereich durch die Transferimpedanz sowie im elektrisch langen Bereich (Leitungslänge größer als ein Viertel der Wellenlänge) durch die Schirmdämpfung bewertet. [2]

Für die typischen Spektren der Hochvoltssysteme ist damit maßgeblich die Transferimpedanz Z_T relevant. Die Schirmwirkung ist umso besser, je kleiner diese ist (1).

$$Z_T = \frac{U_{\text{Stör}}}{I_{\text{Stör}} \cdot l_{\text{Leitung}}} \dots \dots \dots (1)$$

Die Transferimpedanz Z_T ist eine komplexe frequenzabhängige Größe. Sie beschreibt die das längenbezogene Verhältnis der Längsspannung $U_{\text{Stör}}$, die im inneren Kreis induziert wird, zum Strom $I_{\text{Stör}}$ der im äußeren Stromkreis eingepreßt wird. [2]

Die Schirmung stößt aufgrund realisierbarer Dämpfung und den Anforderungen im Fahrzeug an ihre Grenzen. So liegt ein typischer Übergangswiderstand für den Schirmkontakt bei Hochvoltstecksystemen im Bereich von 2 mΩ. Bei zwei Steckern pro Leitung und einer Vorgabe der Automobilhersteller für $Z_T \leq 5 \text{ m}\Omega$ bei 2 MHz ergeben sich entsprechend geringe Systemreserven.

Weiterhin hat das Traktionssystem im Fahrzeug Schnittstellen zu Niederspannungssystemen. Die im Traktionssystem auftretenden Störungen werden durch die Schirmung nicht gedämpft. Somit ist eine aufwändige Entkopplung aller Schnittstellen notwendig. Dies ist insbesondere bei der Überkopplung von Störungen in mechanischen Komponenten des Traktionssystems problematisch.

3.1 Passive Filter im Hochvoltpfad

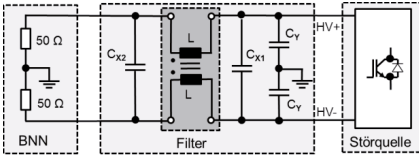


Abbildung 2
Schematische Darstellung eines DC-Filters mit Gleichakttdrossel zwischen Umrichter und BNN

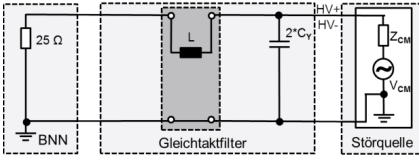


Abbildung 3 Äquivalenter Filter für Gleichaktstörungen

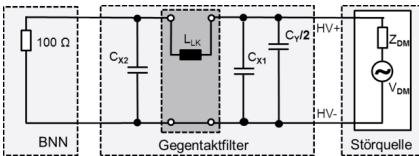


Abbildung 4 Äquivalenter Filter für Gegentaktstörungen
 L_{LK} = Streuinduktivität

Der EMV-relevante Frequenzbereich nach CISPR 25 im Fahrzeugeinsatz beginnt bei 150 kHz, die Taktfrequenzen der Umrichter liegen im Bereich um 10 kHz. Damit würden sich Filter realisieren lassen, die mit wenigen Stufen eine ausreichende Dämpfung ab 150 kHz erreichen können. Mit dem Ansteigen der Filterordnung wird die Steilheit der Sperrkurve des Filters erhöht. Die Knickfrequenz des Filters kann zu höheren Frequenzen verschoben werden. Zur Auslegung der Filter können kleinere und kostengünstigere Bauelemente zum Einsatz kommen.

Filter wirken als Element der Fehlanpassung. Abhängig von der Quell- und Lastimpedanz werden die entsprechenden Filterelemente im Stromkreis so angeordnet, dass sich für die Störsignale ein frequenzabhängiger Impedanzsprung ergibt. Filterkondensatoren schließen hochfrequente Störströme auf kurzem Weg zur Störquelle kurz. Bei unterschiedlicher Quell- und Lastimpedanz werden somit mehrstufige Filter aus Kondensatoren und Induktivitäten sowie optional Widerständen zur partiellen Bedämpfung der Güte von Filterelementen eingesetzt.

Durch die Anordnung der Filterelemente im Strompfad und die magnetische Verkopplung der Induktivitäten ergibt sich eine unterschiedliche Wirkung auf die Gleich- und Gegentaktstörungen (Abbildung 2 - 4). Für die Filterauslegung ist es daher hilfreich die an der Bordnetz nachbildung (BNN) gemessenen Pegel in ihre Gleich- und Gegentaktanteile zu zerlegen und durch den Abgleich mit den Anforderungen aus der CISPR 25 die jeweils notwendige Dämpfung für das untersuchte System über der Frequenz zu ermitteln. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 5 zu sehen.

Die Wirksamkeit der Filterung ist von möglichst kurzen und niederimpedanten Verbindungen der Masse der Störquelle und Filters abhängig.

Für eine optimale Filterauslegung ist die Kenntnis der relevanten Parameter des zu filternden Systems hilfreich. Mit dem entwickelten Messaufbau ist die Analyse der Störpotentiale und der Systemparameter möglich.

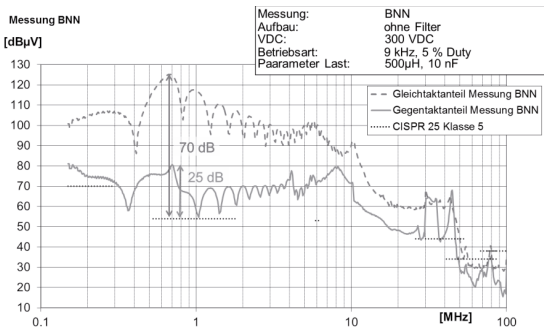


Abbildung 5
Messung Gleich- und Gegentaktsignal für die Hochvoltleitungen HV+ und HV- an der BNN und beispielhafter Abgleich mit Grenzwerten zur Ableitung der erforderlichen Dämpfung zur Filterentwicklung im Mittelwellenbereich

4 Entwicklung des Messverfahrens auf Basis eines CISPR25-Aufbaus

Für die Analyse und Bewertung des EMV-Verhaltens von Hochvoltssystemen ist der Messaufbau (Abbildung 6 und 7) so zu gestalten, dass

- die Messungen mit geschirmten und ungeschirmten Leitungen ohne weitere Umbauten möglich sind,
- der Bauraum für die Filter auf DC- und AC-Seite bereits nah am Umrrichter vorgesehen ist,
- der Messaufbau mit dem Umrrichter als DUT (DC-Leitungen vor Antenne) sowie mit dem Motor als DUT (AC-Leitungen vor Antenne) betrieben werden kann,
- möglichst einfache Ansteuerung des IGBT-Moduls möglich ist,
- die Niedervoltsanschlüsse gefiltert und über Bordnetz nachbildung (BNN) geführt werden können.

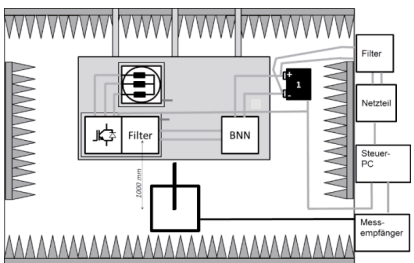


Abbildung 6
Schematische Übersicht Messaufbau mit Umrrichter als DUT und optionalem Filter; beispielhaft für Messung mit Stabantenne

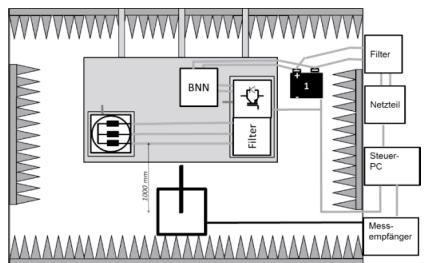


Abbildung 7
Schematische Übersicht Messaufbau mit Motor als DUT und optionalem Filter; beispielhaft für Messung mit Stabantenne

Alle Systemkomponenten aus den Abbildung 6 und 7 sind in isolierten Schirmgehäusen untergebracht. Über Massebänder können diese für Emissionsmessungen und die Störstromanalyse auf die Systemmasse kontaktiert werden. Die Schirmboxen sind modular verwendbar.

Die DC-Leitungen HV+ und HV- werden für die Messungen über eine BNN geführt. Damit ist der Aufbau konform zu den Vorschlägen für die Hochvoltmessungen in der CISPR 25. Für die Verbindung der Komponenten in den Schirmboxen werden HV-Leitungen mit

Geflecht- und Folienschirm mit einem HV-Stecksystem mit 360°-Schirmungsführung genutzt. Für den ungeschirmten Aufbau ist der Leitungsschirm des Kabels beidseitig nicht auf die Schirmhülse des Steckers kontaktiert. Es sind somit zwei komplette Leitungssätze für die jeweiligen Aufbauten aus Abbildung 6 und 7 vorhanden, die sich nur durch die Schirmung unterscheiden.

Für die ungeschirmten Messaufbauten mit dem Umrichter als DUT wurden die Traktionsleitungen zur BNN ungeschirmt ausgeführt, bei den Messungen auf AC-Seite die Phasenleitungen zum Motor. Dadurch ist auch eine Einzelbewertung der Störpotentiale auf AC- und DC-Seite für die Filterauslegung möglich.

Durch den isolierten Aufbau der Komponenten lässt sich Aufteilung der Rückströme über Massefläche und Schirm beeinflussen und analysieren.

5 Ermittlung der relevanten Koppelpfade im System und abgeleitete Filterauslegung

Die relevanten Pfade für die Gleich- und Gegentaktpfade der Störströme sind in der Literatur hinlänglich beschrieben [3, 4]. Der Messaufbau eignet sich nicht nur zur Bewertung des Emissionsverhaltens sondern auch zur Störpfadanalyse und zur Entwicklung von EMV-Maßnahmen. So hat zum Beispiel die Kapazität der Last zur Bezugsmasse einen signifikanten Einfluss auf die Emission des Gesamtsystems [5]. Die Kenntnis der parasitären Elemente ist von für den gezielten Filterentwurf von Vorteil. Auf Basis der Untersuchungen zu den Koppelpfaden konnte zum Messaufbau ein detailliertes Simulationsmodell erstellt werden.

Für ersten Schritt des Filterentwurfs für den Gleichtakt ist die Kenntnis der Größe aller relevanten Kapazitäten zur Bezugsmasse wichtig. Die Aussage gilt sowohl für das hier behandelte vereinfachte Modell eines Traktionssystems als für reale komplexere Systeme, die z.B. noch Ladesteuergeräte und DC/DC-Wandler beinhalten. Daraus lässt sich mit den Formeln (2) und (3) die notwendige Größe der Gleichtaktfilterkapazität bestimmen [6].

Die Platzierung der Filterkapazität ist in Abbildung 1 mit C_{gix} gekennzeichnet. Die relevanten parasitären Gleichtaktkapazitäten sind ebenfalls dargestellt.

Am einfachsten ist die Bestimmung der Koppelkapazität der Hochvoltleitungen. Dies kann z. B. über Messung mit einem RLC-Meter oder per Berechnung aus den geometrischen Daten erfolgen. Die Kapazität des Innenleiters zum Schirm liegt typischerweise im Bereich von einigen hundert pF/m.

Die Kapazität der Motorwicklungen zur Bezugsmasse teilt sich in den Pfad vom Stator zum Gehäuse und vom Stator zum Rotor mit Motorwelle auf. Sie kann für das Ersatzschaltbild zusammengefasst werden. Sie sich ebenfalls mittels RLC-Meter bestimmen oder mittels Parametervariation aus dem Ersatzschaltbild und dem Gleichtaktimpedanzverlauf des Motors extrahieren. Typische Werte liegen im Bereich von wenigen nF bis ca. 20 nF. Messung und Ersatzschaltbild sind in Abbildung 8 und 9 dargestellt.

Durch den Lagenaufbau der Leistungselektronikmodule ergeben sich die für die Gleichtaktstörungen relevanten Kapazitäten zur Basisplatte. Die verschiedenen Streukapazitäten eines Brückenzweiges sind über die stark spannungsabhängigen Halbleiterkapazitäten parallel geschaltet, was bei einer Messung zu beachten ist.

Weiterhin müssen die Streukapazitäten im Modul anhand ihrer Relevanz für die Gleichtaktkopplung unterschieden werden. Bei der Messung wirken die aufbaubedingten Kapazitäten von Freilaufdiode und IGBT gemeinsam. Es ergeben sich Kapazitäten der

Halbleiter zu HV+ und HV- an der DC-Seite des Moduls. Diese Kapazitäten regen nur eine Gleichtaktstörung an, wenn sie unsymmetrisch ausgeführt sind. Die direkt wirksame Kapazität ergibt sich von den Phasenanschlüssen des Moduls zur Basisplatte. Hier wird durch die Umladung der Kapazität jeweils der komplette Spannungshub des Moduls für den Gleichtakt wirksam. Die Kapazitäten lassen sich nur bei bekanntem Modulaufbau ermitteln. Die Einzelwerte müssen für das Simulationsmodell extrahiert werden. Für den Filterentwurf kann vereinfachend die Faustregel genutzt werden, dass die Hälfte der ermittelten Streukapazität der direkt wirksamen Kapazität zuzurechnen ist. Diese liegt für die Leistungsklasse für Traktionssysteme im Bereich einiger hundert pF. Für das Simulationsmodell ist weiterhin die Bestimmung der Induktivitäten und ohmschen Anteile von Bedeutung. Das Vorgehen zur Ermittlung der Größen ist vergleichbar und wird an dieser Stelle nicht weiter erläutert.

Leitungen	Leistungselektronik	Last
~ 500 pF / m	100 ... 500 pF	2 ... 20 nF

Tabelle 1 Übersicht über typische Kapazitäten der Hochvoltkomponenten nach Masse zur Abschätzung der notwendigen Gleichtaktfilterkapazität

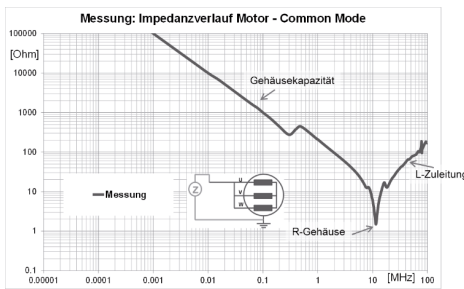


Abbildung 8 Beispielhafte Messung Gleichtaktimpedanz eines Motors mit Einflussgrößen und schematischer Messaufbau

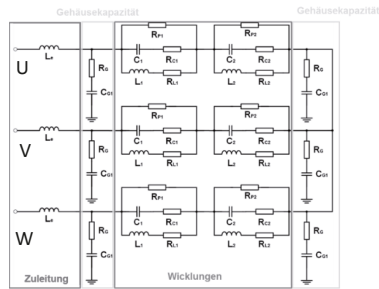


Abbildung 9 Ersatzbild eines Motors für die Verwendung in der Simulation und Filterauslegung; die dargestellten Induktivitäten sind verkoppelt

Für die Auslegung der Filterkapazitäten ergeben sich folgenden zwei Bedingungen als Faustregel:

$$(c_{g1} + c_{g2}) > 5 * \sum_{s=1}^n c_{cms} \quad (2)$$

$$(c_{g1} + c_{g2}) > 10 * c_{cmM} \quad (3)$$

Wie man aus der Formel (3) und den in Tabelle 1 angegebenen Größen erkennt, bestimmt hier die Lastkapazität des Motors entscheidend die Größe der Filterkapazität. Dieser Kapazitätswert wurde im Messaufbau in der Impedanznachbildung der Last für Analyse Zwecke variabel gehalten.

Die so ermittelten Kondensatoren c_{g1} und c_{g2} stellen bereits einen ersten Low-Cost-Filter dar, der auch bereits in geschirmten System zur Optimierung eingesetzt werden kann. Um die Schirmung im Hochvoltsystem zu ersetzen müssen allerdings mehrstufige Filter genutzt werden, um die erforderliche Störunterdrückung zu erreichen.

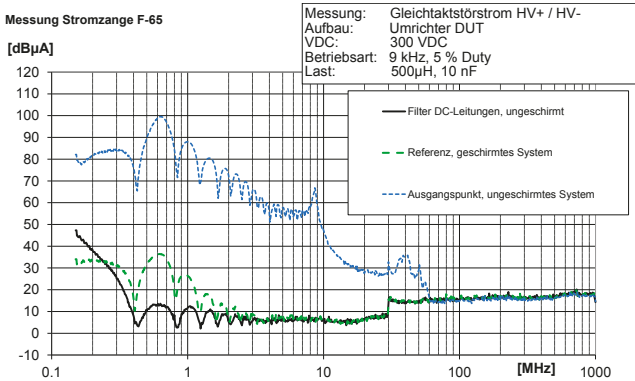


Abbildung 10
 Messung Gleichtaktstörstrom auf den Hochvoltleitungen für Messaufbau mit Schirmung, ohne Schirmung und ohne Schirmung aber mit Filter; deutlich erkennbar die Reduzierung des Gleichtaktstörstromes durch Filter

6 Messergebnisse mit Schirmung und Filterung

Der Aufbau entsprechend Abbildung 11 kann sowohl mit statischer Last (Impedanznachbildung) als auch mit realem Motor betrieben werden. Es hat sich bei vorausgehenden Messungen gezeigt, dass die generelle Störcharakteristik auch mit Betrieb des Umrichters mit einer aktiv angesteuerten IGBT-Dioden-Kombination (Tiefsetzsteller-Modus) nachgebildet werden kann. Der verringert den Aufwand der Ansteuerung enorm und ermöglicht auch z.B. eine Variation des Ansteuertaktes sowie einfache Variation der parasitären EMV-relevanten Elemente im Aufbau durch Änderung der Last (C_{gx}).



Abbildung 11
 Messaufbau auf Komponentenmesstisch mit Umrichter als DUT und den Leitungen HV+ und HV- vor der Antenne

Bei dargestellten Messungen in Abbildung 12 werden verglichen:

- ungeschirmter und ungefilterter Aufbau,
- geschirmter und ungefilterter Aufbau sowie
- ungeschirmter und gefilterter Aufbau (DC-Filter)

Nachfolgend werden Messungen der gestrahlten Emission beispielhaft für die DC-Seite gezeigt. Die dargestellten Grenzwerte nach CISPR 25 gelten für ungeschirmte Versorgungsleitungen. Hierbei werden nur Ergebnisse für jeweils einen der untersuchten mehrstufigen, passiven Filter dargestellt. Die Kurven sollen das mit vertretbarem Aufwand erreichbare Maß der Dämpfung darstellen. Die gemessenen Filter für die Untersuchungen wurden von zwei kommerziellen Anbietern zugeliefert.

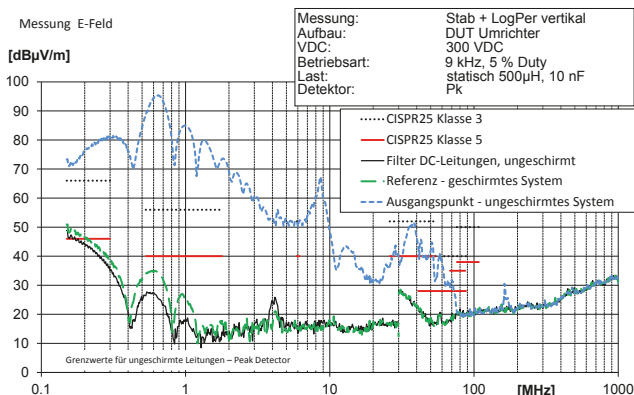


Abbildung 12
 Vergleich der gestrahlten Emission bei Messungen mit der Stabantenne bis 30 MHz und ab 30 MHz mit der Bikonisch-Logarithmisch-Periodischen Antenne für ein ungeschirmtes System, ein System mit Schirmung sowie ein auf DC-Seite ungeschirmtes System mit einem mehrstufigen Filter

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Messungen mit den verwendeten passiven Filtern auf der DC-Seite zeigen, dass eine Filterung der Traktionsleitungen die Dämpfungswerte der Schirmung des Versuchsaufbaus mindestens erreichen und teilweise übertreffen kann. Die DC-Filter können somit die Schirmung auf der DC-Seite aus EMV-Sicht ersetzen.

Der Vorteil der Filterung gegenüber der Schirmung liegt in der Dämpfung der Störungen nah an der Störquelle. Der benötigte Bauraum und das Gewicht der Filter liegen trotz der verwendeten A-Sample-Gehäusen in einer vertretbaren Größenordnung für Fahrzeuganwendungen.

Da die Hochvoltssysteme heute neben dem hier untersuchten Traktionsstrang noch weitere Komponenten beinhalten können (DC/DC-Wandler, Kompressor,...), müssen bei Entfall der Schirmung alle Komponenten des HV-Bordnetzes konsequent gefiltert werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] CISPR 25: Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers, Edition 3, IEC, Bruxelles, 2007
- [2] DIN EN 50289-1-6: Kommunikationskabel - Spezifikationen für Prüfverfahren - Teil 1-6: Elektrische Prüfverfahren - Elektromagnetisches Verhalten, Deutsche Fassung EN 50289-1-6:2002, Beuth Verlag, Berlin
- [3] Domurat-Linde, A.: Optimierung des Störemissionsverhaltens von Leistungsmodulen im UKW-Frequenzbereich; VDI-Verlag, Düsseldorf, 2013
- [4] Klotz, F.: Leitungsgebundene elektromagnetische Störemissionen von Leistungshalbleitertopologien, Verlag ISLE, Ilmenau, 1997
- [5] Trebeck, M.; Körber, B.; Enziger, T.; Rinckleff, T.: Bewertung der Störemission von Hochvolthalbleitern für E-Fahrzeuge, GMM-Fachbericht 77, 2013; VDE-Verlag Berlin
- [6] Beck, F.: EMC-Filter Challenges in xEV's, EMV von Hochvoltssystemen in Elektrofahrzeugen, EMV Stuttgart, 2015