

Untersuchungen zum Potential von kombinierten Schirmlösungen zur Reduzierung der Störaussendung in Antriebssystemen von Elektro- und Hybridfahrzeugen

Sebastian Jeschke, M.Sc. , Universität Duisburg-Essen, Fachgebiet Energietransport und –speicherung

Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch, Universität Duisburg-Essen, Fachgebiet Energietransport und –speicherung

Dipl.-Ing. Marc Maarleveld, EMC Test NRW GmbH

1. Einleitung

Die in Elektrofahrzeugen eingesetzten Antriebskomponenten stellen im Fahrzeug besonders im Bezug auf die EMV Anforderungen eine enorme Herausforderung dar. Speziell die eingesetzten elektrischen Antriebssysteme mit Leistungen im 100kW Bereich stellen im Betrieb eine Störquelle in Fahrzeugen dar, die im Bezug auf die Störaussendung intensiver Gegenmaßnahmen bedarf. Das elektrische Antriebssystem solcher Fahrzeuge besteht im Wesentlichen aus einem Antriebsumrichter, welcher aus einer Hochvoltbatterie mit Spannungen von bis zu 800V gespeist wird und damit eine elektrische Antriebsmaschine betreibt. Zudem kommen meistens noch ein Gleichspannungswandler als Schnittstelle zwischen dem 12V-Bordnetz und dem HV Bordnetz sowie ein Batterieladegerät zu Einsatz. Zur Abschirmung sowie zur Gewährleistung der elektrischen Sicherheit wird das gesamte Hochvoltbordnetz als IT-Netz, also isoliert vom restlichen Fahrzeug aufgebaut und vollständig geschirmt. Im Bezug auf die EMV Anforderungen ist die Qualität der Schirmung also der Kabelschirme, der Gehäuse und der Steckverbinder entscheidend. Speziell im Bereich des Elektroantriebs entstehen aufgrund der hohen Antriebsleistungen auch hohe Störaussendungen. Der Antriebsumrichter erzeugt an seinem Ausgang ein Frequenzvariables Drehstromsystem, indem er die volle Batteriespannung auf die Ständerwicklungen des Antriebs schaltet[1]. Die IGBTs, die in den meisten Umrichtern zum Einsatz kommen sind in der Lage sehr steile Schaltflanken von ca. $4\text{kV}/\mu\text{s}$ bis $6\text{kV}/\mu\text{s}$ zu realisieren[2]. Durch diese PWM Spannungen auf den Antriebsleitungen und den angeschlossenen Ständerwicklungen entstehen breitbandige Störaussendungen[3],[4], die z.B. über Streukapazitäten in andere Teile des Fahrzeugbordnetzes überkoppeln und dort zu Funktionsbeeinträchtigungen führen können. Aktuell werden für die Antriebsleitungen im Wesentlichen zwei unterschiedliche Schirmkonzepte eingesetzt. Zum Einen werden drei Antriebsleitungen mit Einzelschirmung und zum Anderen drei ungeschirmte Leitungen mit einer Summenschirmung eingesetzt. Vorangegangene Untersuchungen hatten gezeigt, dass die Antriebsleitungen mit Summenschirmung tendenziell etwas geringere Störungen aufweisen[5][6], da die Leiterströme durch den geringeren Schirmquerschnitt nach außen hin nur teilweise kompensiert werden können. Im Folgenden sollen nun beide Schirmkonzepte kombiniert werden, um die Störaussendungen des Umrichter Motor Systems weiter zu reduzieren. Hierbei wird ein zusätzlicher Summenschirm um die einzeln geschirmten Antriebsleitungen angebracht. Die Untersuchung erfolgt sowohl anhand des in [6] verwendeten Simulationsmodells als auch anhand von Messungen an einem Antriebsstrang, wie er in Elektrofahrzeugeneingesetzt wird [7].

2. Modellierung des Antriebsstrangs

Zur Modellierung des elektrischen Antriebsstrangs wird im Wesentlichen das in [6] präsentierte Simulationsmodell auf Basis von LTSpice verwendet. Dieses Modell wird im Folgenden um ein Modell der Antriebsleitung mit kombinierter Schirmung erweitert. Für eine detaillierte Beschreibung der Simulationsmodelle für die anderen Schirmungskonzepte sei auf die vorangegangene Arbeit verwiesen[6]. Das verwendete Simulationsmodell teilt sich im Wesentlichen auf die Komponenten Motor, Antriebsleitung und Umrichter auf, wobei hier ein spezieller Focus auf der Modellierung der Antriebsleitungen liegt. Der Umrichter wird im verwendeten Modell durch 3 Spannungsquellen, die 3 um 120° verschobene PWM Spannungen auf den Antriebsleitungen realisieren, simuliert. Die Spannungshöhe sowie die Flankensteilheit der Pulse wurden messtechnisch am verwendeten Antriebssystem bestimmt. Der zu simulierende Umrichter schaltet bei einer Taktfrequenz von 10kHz die Batteriespannung von 360V bei einer Flankensteilheit von 126ns.

2.1 Modellierung der Antriebsleitungen mit kombinierter Schirmung

Dieser Abschnitt befasst sich im Detail mit dem in der Simulation verwendeten Modell für die Antriebsleitungen mit einer kombinierten Schirmung. Das verwendete Ersatzschaltbild ist in Bild.1 schematisch dargestellt. Da die Leitung mit einer Länge von 1,2m im Bezug zu den auftretenden Störungen als elektrisch kurz angenommen werden kann, ist es möglich die Leitungsparameter mit kompakten Bauelementen zu simulieren. Die Innenleiter werden jeweils durch einen Widerstandswert und einen Induktivitätswert dargestellt. Des Weiteren ist zu sehen, dass das verwendete Modell sowohl die kapazitive Kopplung als auch die induktive Kopplung der einzelnen Komponenten beschreibt. Hierzu werden auch die Einzelschirme sowie der Summenschirm durch einen Schirmwiderstand und eine Schirminduktivität modelliert. Über diese Induktivitäten können dann die unterschiedlichen induktiven Kopplungen zwischen den Innenleitern, den Einzelkabelschirmen sowie der Summenschirmung modelliert werden. Bei der Kapazitiven Kopplung wird zum Einen die Kopplung innerhalb der einzeln geschirmten Leitungen und zum Anderen die Kopplungen zwischen den Einzelkabelschirmen untereinander und zwischen den Einzelschirmen und dem Summenschirm in Form der Kapazitäten in Bild 1 berücksichtigt.

2.1.1 Bestimmung der kapazitiven Kopplung

Da die Antriebsleitung mit kombinierter Schirmung drei einzeln geschirmte Leitungen beinhalten, welche koaxial aufgebaut sind, berechnet sich die Kabelkapazität einer einzelnen geschirmten Leitung zu.

$$C'_{LSH} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{l}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \quad (1)$$

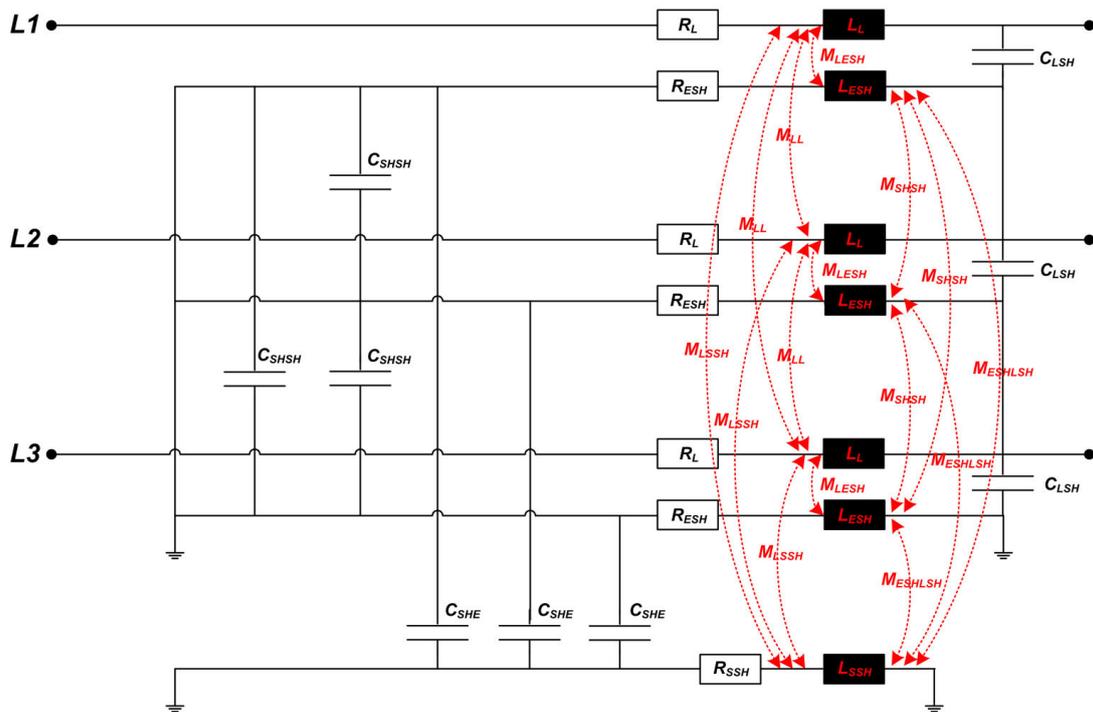


Bild 1: Ersatzschaltbild für das in der Simulation verwendete Kabelmodell mit kombinierter Schirmung

Bei weiterer Betrachtung der drei einzeln geschirmten Leitungen in Kombination mit der außen aufgebrachten Summenschirmung ergeben sich, wie bei klassischen Drehstromkabeln, weitere 6 kapazitive Kopplungen zwischen den Einzelschirmen untereinander und zwischen den Einzelschirmen und der Summenschirmung. Da die elektrischen Feldlinien in der Anordnung vom Rand der äußeren Rand der Kabeladern ausgehen, kann für die Berechnung dieser Kapazitäten die Methode der Spiegelladungen angewandt werden. Die Anordnung der Ladungen und Spiegelladungen für die Anordnung der einzelnen Schirme ist in Bild 2 dargestellt.

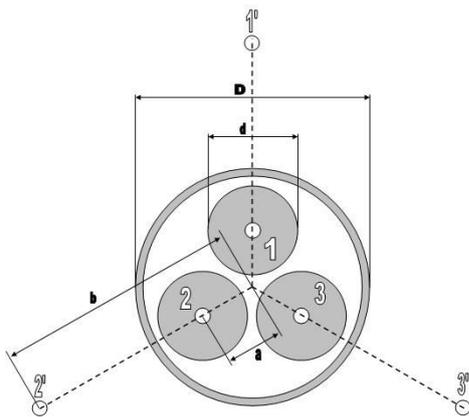


Bild 2: Struktur eines 3-phasigen Kabels für die mit Spiegelladungen

Die Kapazitäten zwischen Einzelschirm und Summenschirm berechnen sich dann zu [8].

$$C'_{SHE} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln\left(\frac{16a(b^3 - a^3)}{3D^3 d}\right)} \tag{3}$$

Die Abstände der Spiegelladungen außerhalb der Kabelanordnung können nach dem Gesetz der reziproken Radien bestimmt werden.

$$b = \frac{D^2}{4a} \tag{2}$$

Im Falle einer geometrisch symmetrischen Anordnung der einzelnen Schirmungen können sowohl die Kapazitäten zwischen den Einzelschirmen als auch die Kapazitäten zwischen den Einzelschirmen und der Summenschirmung als gleich angenommen werden.

Mit den Kapazitäten zwischen Einzelschirm und Summenschirm lassen sich nun die Kapazitäten zwischen den Einzelschirmen berechnen[8].

$$C'_{SHSH} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{3 \ln\left(\frac{2\sqrt{3}a(b-a)}{d\sqrt{a^2+b^2+ab}}\right)} - \frac{1}{3} C'_{SHE} \quad (4)$$

2.1.2 Bestimmung der induktiven Kopplung

Zur Modellierung der induktiven Kopplung zwischen den einzelnen Elementen der Kabelanordnung müssen sowohl die Eigeninduktivitäten der Leiter und der Schirmungen sowie die Gegeninduktivitäten (rote Pfeile in Bild 1) zwischen den einzelnen Elementen bestimmt werden. Die Eigeninduktivität der Leiter setzt sich aus der inneren und der äußeren Eigeninduktivität zusammen. Da die innere Eigeninduktivität des Leiters nur 80nH beträgt und mit der Frequenz stark abnimmt [9], wird für die Simulation nur die äußere Eigeninduktivität berücksichtigt. Um die äußere Eigeninduktivitäten der Leiter und der Schirmungen zu bestimmen, ist das folgende Flächenintegral zu berechnen, wobei hier die Fläche eine rechteckige Fläche parallel zum Leiter ist, welche senkrecht zu den Feldlinien steht.

$$L_L = \frac{\psi}{I} = \frac{1}{I} \cdot \iint_{A_{ref}} \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (5)$$

Nach Lösung des Integrals in (5) für die magnetische Flussdichte und die entsprechende Fläche ergibt sich die äußere Eigeninduktivität eines Leiter zu. Sie hängt also im Wesentlichen von den geometrischen Kabelgrößen Leiterradius und Leiterlänge ab [10]. Da die innere Induktivität in der Simulation nicht berücksichtigt wird, kann die äußere Eigeninduktivität der Schirmungen analog berechnet werden, indem statt dem Leiterradius der Radius der Schirmung eingesetzt wird.

$$L'_L = \frac{\mu \cdot l}{2 \cdot \pi} \left(\ln\left(\frac{l}{r_l} + \sqrt{\frac{l^2}{r_l^2} + 1}\right) + \frac{r_l}{l} - \sqrt{\frac{r_l^2}{l^2} + 1} \right) \quad (6)$$

Zusätzlich zu den Eigeninduktivitäten müssen nun im Folgenden die induktiven Kopplungen zwischen den einzelnen Komponenten modelliert werden. Die erste Kopplung tritt bei den drei einzeln geschirmten Leitern zwischen dem Innenleiter und der Schirmung auf. Wird nun ein Innenleiter in die Schirmung eingebracht, so ergibt dadurch das ein magnetischer Fluss ausschließlich außerhalb des Leiters auftritt, keine Änderung für die magnetische Flussdichte bei gleichem Schirmstrom und es gilt [11].

$$L_{ESH} = \frac{\psi}{I_{ESH}} = M_{LESH} \quad (7)$$

Da die Einzeladerschirmungen eine deutlich geringeren Querschnitt aufweisen, als die Innenleiter, wird das vom Laststrom verursachte magnetische Feld nicht vollständig durch die Schirmung kompensiert und es ergeben sich weitere induktive Kopplungen im betrachteten Kabelmodell. Diese induktiven Kopplungen treten zwischen den Innenleitern und der Summenschirmung und zwischen den Kabelschirmen und der Summenschirmung auf. Diese können unter der Annahme, dass sich der Innenleiter bzw. der Einzeladerschirm innerhalb der Summenschirmung befinden analog zur Berechnung der Gegeninduktivität zwischen Innenleiter und Einzeladerschirmung bestimmt werden. Zuletzt treten noch aufgrund der nicht vollständigen Kompensation des Laststroms indukti-

ve Kopplungen zwischen den 3 Innenleitern und den 3 Kabelschirmen untereinander auf. Die Gegeninduktivität zwischen zwei parallel verlaufenden Leitern berechnet sich nach[10].

$$M'_{LL} = \frac{\mu \cdot l}{2 \cdot \pi} \left(\ln \left(\frac{l}{d} + \sqrt{\frac{l^2}{d^2} + 1} \right) + \frac{d}{l} - \sqrt{\frac{d^2}{l^2} + 1} \right) \quad (8)$$

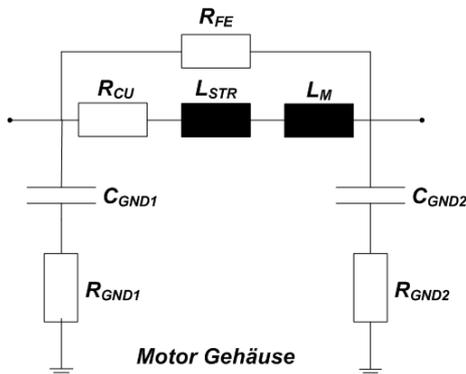
Die Gegeninduktivität zwischen zwei Leitern hängt also im Wesentlichen von dem Abstand der beiden Leiter und der Leiterlänge ab. Da der durch den Schirmstrom hervorgerufene magnetische Fluss bei den Einzeladerschirmen nur außerhalb auftritt, können die Gegeninduktivitäten zwischen den Einzeladerschirmen analog bestimmt werden. Die fehlenden Widerstandswerte ergeben sich aus den Herstellangaben. Unter Berücksichtigung der Herstellerangaben und der geometrischen Abmessungen des Kabelaufbaus ergeben sich die einzelnen Parameter des Kabelersatzschaltbildes zu.

R_L	R_{ESH}	R_{SSH}	L_L	L_{ESH}	L_{SSH}	C_{LSH}
1,392mΩ	5,233mΩ	0,05mΩ	1,582μH	1,527μH	1,217μH	883,14pF
C_{SHSH}	C_{SHE}	M_{LESH}	M_{LL}	M_{SHSH}	M_{ESHSSH}	M_{LSSH}
66,38pF	172,24pF	1,527μH	913nH	913nH	1,217μH	1,217μH

Tabelle 1 ESB Parameter für das verwendete Simulationsmodell

2.2 Modellierung der Asynchronmaschine

Um die unterschiedlichen Schirmkonzepte für die Antriebsleitungen simulativ vergleichen zu können, muss auch die angeschlossene Lastmaschine hinreichend genau für Simulationen in Zeit und Frequenzbereich modelliert werden [6]. Hierzu wird, wie in [12] beschrieben, ein Ersatzschaltbild für die Ständerwicklungen verwendet, welches das Gleichtakt- und das Gegentaktverhalten von Drehstrommaschinen beschreibt. Die Parameter dieses Ersatzschaltbildes ergeben sich aus zwei Impedanzmessungen an den Klemmen der Maschine. Die Gleichtaktimpedanz der Maschine wird zwischen den drei kurzgeschlossenen Ständerwicklungen und dem Maschinengehäuse und die Gegentaktimpedanz wird zwischen einer Wicklung und den anderen zwei kurzgeschlossenen Wicklungen gemessen. Aus der Messung können dann die einzelnen ESB Parameter bestimmt werden. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens ist in [12] zu finden. Für das in Bild 3 dargestellte Wicklungersatzschaltbild ergeben sich für die Simulation die Werte in Tabelle 2.



R_{FE}	R_{CU}	L_{STR}	L_M
164,83Ω	124mΩ	186,83μH	6,11μH
C_{GND1}	C_{GND2}	R_{GND1}	R_{GND2}
1,241nF	0,574nF	4,545Ω	12,77Ω

Tabelle 2 verwendete ESB Parameter für das ASM Modell

Bild 3 ESB einer Ständerwicklung der ASM

3. Ergebnisse der Simulation

Um den Einfluss der unterschiedlichen Schirmkonzepte auf die auftretenden Störspannungen auf den Phasenleitungen vergleichen zu können, werden mit dem beschriebenen Modell Simulationen sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich durchgeführt. Die gepulste Spannung auf die Kombination aus Antriebsleitung und Ständerwicklung, die ein schwingfähiges System darstellen, resultiert in hochfrequenten Spannungsüberhöhungen in den Schaltflanken. Zum Vergleich der Schirmkonzepte im Zeitbereich, wurde jeweils die Phasenspannung U_{L1} an den Motorklemmen simuliert. Die Ergebnisse der Simulation sind in Bild 4 abgebildet.

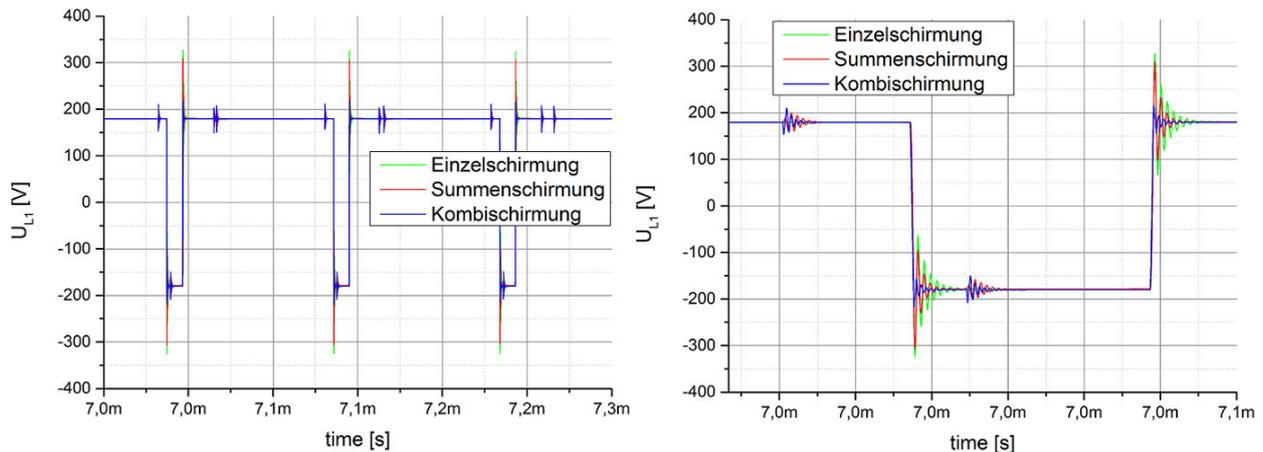


Bild 4 simulierte Spannung auf Phasenleitung L1 für die unterschiedlichen Schirmkonzepte

Wie bereits in [5],[6] gezeigt, treten bei den Antriebsleitungen mit Summenschirmung tendenziell geringere Spannungsüberhöhungen in den Schaltflanken auf, als bei den Leitungen mit Einzeladerschirmung. Bei einer Kombination der beiden Schirmkonzepte, ergibt sich eine weitere deutliche Reduzierung der Störspannung in den Schaltflanken. Bei genauerer Betrachtung der Überspannungsamplitude ergibt sich bei Vergleich mit der Summenschirmung eine Reduktion von ca.90V und im Vergleich zur Einzeladerschirmung sogar eine Reduktion von ca.110V. Diese Störspannungen können nun beispielsweise über Streukapazitäten in andere Teile des Bordnetzes überkoppeln, wo sie z.B. in Form von hochfrequenten Gleichtaktschirmströmen auftreten. Dieser Gleichtaktstörstrom, der zwischen dem Motorsternpunkt und dem Motorgehäuse fließt wird in einer zweiten Simulation zu Vergleich der Schirmkonzepte im Frequenzbereich herangezogen (Bild 5). Da die Störspannungen also die Spannungsüberhöhungen in den Schaltflanken eher hochfrequent sind, treten auch erst im Bereich ab 10MHz sichtbare Abweichungen zwischen den Schirmkonzepten auf. Auch hier zeigt sich das gleiche Bild, wie auch schon bei der Simulation im Zeitbereich, was den Vergleich der Schirmkonzepte angeht. Speziell im Bereich ab 10MHz zeigt sich, dass die Einzeladerschirmung deutliche höhere Störströme im System verursacht, als die Summen- bzw. die kombinierte Schirmlösung. Zudem treten bei der kombinierten Schirmung tendenziell noch geringere Störströme bei den höheren Frequenzen auf als bei der einfachen Summenschirmung.

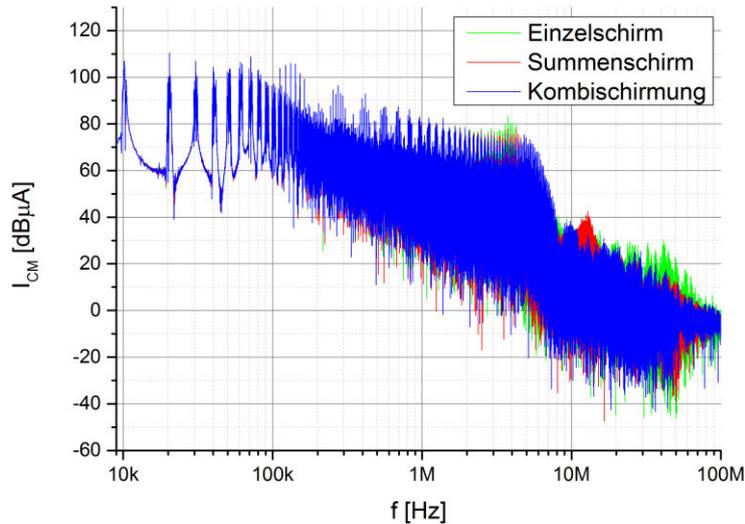


Bild 5 simulierter Gleichtaktstörstrom zwischen Sternpunkt und Motorgehäuse für die unterschiedlichen Schirmkonzepte

4. Ergebnisse der Messungen

Die vergleichenden Messungen wurden an einem elektrischen Antriebs durchgeführt, wie er auch in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommt. Für weitere Details zum Aufbau sei auf die Arbeit [7] verwiesen. Zum Vergleich der Schirmkonzepte werden, wie schon in der Simulation Messungen im Zeitbereich sowie im Frequenzbereich durchgeführt. Bei den Messungen im Zeitbereich wird die Phasenspannung L1 mit einem Oszilloskop gemessen und um die Konzepte vergleichen zu können auf den breitesten Puls getriggert. Die Ergebnisse sind im Bild 6 links dargestellt.

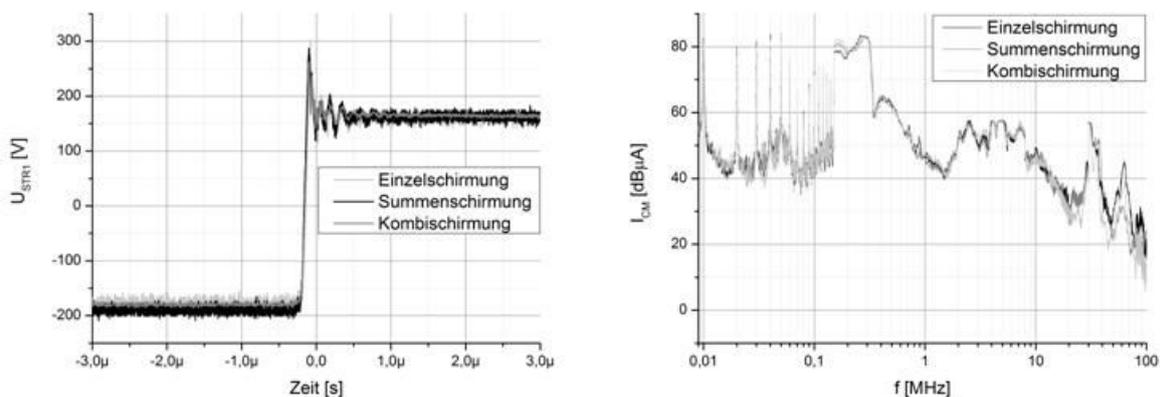


Bild 6 links gemessene Phasenspannung L1 für die unterschiedlichen Schirmkonzepte; rechts gemessener Gleichtaktstörstrom über den Kabelschirm für die unterschiedlichen Schirmkonzepte

Es zeigt sich, dass sich die Höhe der Überspannung bei Verwendung einer kombinierten Schirmlösung noch einmal reduziert. Im Vergleich zur Einzelschirmung reduziert sich bei einem Lastmoment von 40Nm die Überspannung um 40V und im Vergleich zur einfachen Summenschirmung um 10V. Da die Überschwinger in den Schaltflanken hochfrequente Anteile haben, sollten bei einer Betrachtung des Frequenzbereichs dort auch die größten Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Schirmkonzepten auftreten. Für

eine vergleichende Messung wurde jeweils der Gleichtaktstörstrom, der über den Kabelschirm fließt mit einer BCI-Zange gemessen. Die Messergebnisse (Bild 6 rechts) zeigen, das auch hier im höheren Frequenzbereich bei der Kombischirmung niedrigere Schirmströme auftreten als bei den anderen Schirmkonzepten. Allerdings gibt es im betrachteten Frequenzbereich auch Abschnitte, in denen bei der einfachen Summenschirmung geringere Störströme auftreten.

5. Zusammenfassung

Die vergleichenden Untersuchungen zum den auftretenden Störspannungen bei Verwendung unterschiedlicher Schirmkonzepte im Antriebsstrang von Elektro- und Hybridfahrzeugen haben gezeigt, dass diese einen Einfluss auf die auftretenden Störungen haben. Das verwendete Simulationsmodell ist in der Lage die auftretenden Störungen für die verschiedenen Schirmkonzepte sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich zu beschreiben. Speziell durch die Verwendung einer kombinierten Schirmung konnten die auftretenden Störungen im Vergleich zu einzeln geschirmten Antriebsleitungen reduziert werden. Im Vergleich zu den Leitungen mit Summenschirmung liegen teilweise niedrige und teilweise höhere Gleichtaktstörströme auf. Durch eine entsprechende Auswahl des Schirmkonzeptes lässt sich die Störaussendung des Antriebsstrangs im Bereich ab ca. 30MHz reduzieren.

6. Literatur

- [1] K. Hofer, *Elektrotraktion*. Berlin: VDE Verlag 2006.
- [2] Specovious, J.: *Grundkurs Leistungselektronik*, 4. Auflage, Vieweg-teubner Verlag, 2010.
- [3] C. Hillmer, M. Mayer, U. Reinhardt: *EMV von Elektro- und Hybridfahrzeugen*, Beitrag 5. GMM- Fachtagung, München, 2009.
- [4] S. Jeschke, M. Obholz, M. Maarleveld, H. Hirsch, J. Bärenfänger: *Ermittlung typischer Störspannungen in Antriebssystemen für Elektro- und Hybridfahrzeugen*, Beitrag 7. Dortmunder Autotag, Dortmund, 2012
- [5] S. Jeschke, M. Maarleveld, H. Hirsch: *Untersuchungen zu den Einflüssen des Schirmkonzepts auf die auftretenden Störspannungen in Antriebssystemen von Elektro- und Hybridfahrzeugen*, AmE 2013.
- [6] S. Jeschke, M. Maarleveld, H. Hirsch: *Investigation on the influence of the shielding concept on the disturbances from the propulsion system of an electric vehicle*, EMC Europe 2013
- [7] S. Jeschke, H. Hirsch, M. Koppers, D. Schramm: *HiL simulation of electric vehicles in different usage scenarios*, IEEE IEVC 2012
- [8] Küpfmüller, K.: *Theoretische Elektrotechnik*, 17. Auflage, Springer Verlag, 2006
- [9] O. Zinke, H. Brunswick: *Hochfrequenztechnik 1 Hochfrequenzfilter, Leitungen, Antennen*, 6. Auflage, Springer Verlag, 1999
- [10] Weber S.: *Effizienter Entwurf von EMV-Filtern für leistungselektronische Geräte unter Anwendung der Methode der partiellen Elemente*, Dissertation, TU Berlin, 2007
- [11] W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*, Wiley Publication, 2009
- [12] Schinkel et al.: *Efficient HF Modelling and Model Parameterization of Induction Machines for Time and Frequency Domain Simulations*, IEEE APEC, 2006