

# **Einfluss des Einsatzes von SiC-Halbleitern in HV-Komponenten auf den Stromripple und die niederfrequenten Magnetfelder**

Dr.-Ing. Sebastian Jeschke, EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str.76, 44227 Dortmund, Deutschland, jeschke@emc-test.de

Dipl.-Ing. Marc Maarleveld, EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str.76, 44227 Dortmund, Deutschland, maarleveld@emc-test.de

Dipl.-Ing. Jörg Bärenfänger EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str.76, 44227 Dortmund, Deutschland, baerenfaenger@emc-test.de

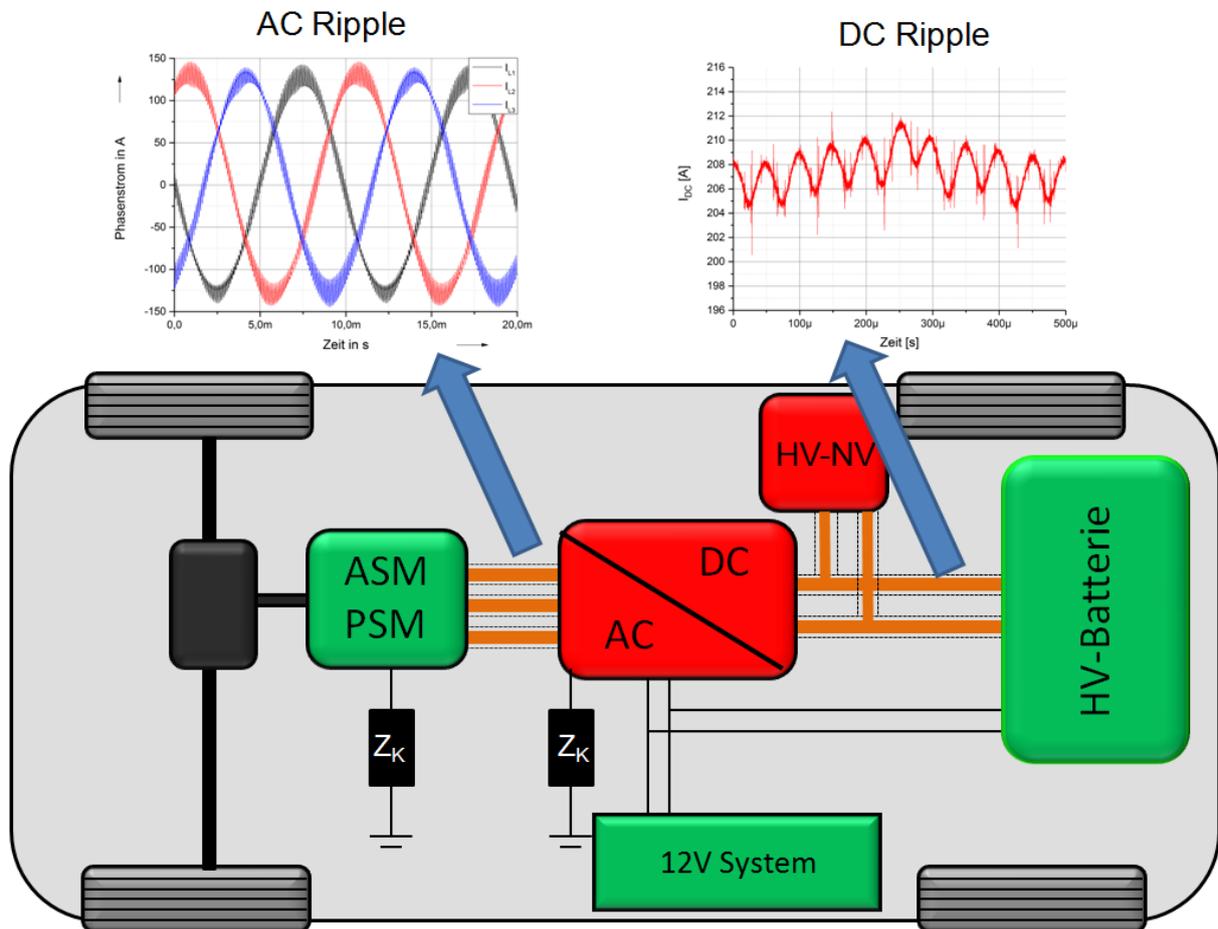
## **1 Einleitung**

Um die Abgasemissionen des Individualverkehrs zu senken, wird zunehmend der Antriebsstrang elektrifiziert bzw. teilelektrifiziert. Im Vergleich zu verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen ist die Energieeffizienz von Elektroantrieben deutlich höher. Allerdings ist die Kapazität aktueller Batteriesysteme und damit die Reichweite von Elektrofahrzeugen verglichen mit verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen deutlich geringer. Um die Reichweite zu erhöhen, wird neben der Erhöhung der Batteriekapazität die Energieeffizienz der Antriebstrangkomponenten optimiert. Hierzu werden auf Komponentenebene zunehmend Leistungshalbleiter auf SiC-Basis eingesetzt, die die hohe Gleichspannung der Batterie deutlich schneller schalten können als Halbleiter auf Si-Basis [1]. Da die Verluste im Wesentlichen während des Schaltvorgangs auftreten, kann durch eine Verringerung der Schaltzeit der Wirkungsgrad der Komponente erhöht werden. Allerdings wirken sich diese schnellen Schalthandlungen negativ auf die elektromagnetischen Emissionen der Antriebstrangkomponenten aus, so dass ggf. zusätzliche Filtermaßnahmen erforderlich werden. Zudem wird neben den Gleichtaktstörungen, die durch die Potentialsprünge im Schaltvorgang auf die Systemschirmung auskoppeln, eine Gegentaktstörung in Form eines Stromripples erzeugt. Bei einem Antriebsumrichter entsteht ein solcher Stromripple sowohl auf der Gleichspannungsseite als auch auf der Drehstromseite an dem die Antriebsmaschine angeschlossen ist.

Auf der Gleichspannungsseite entsteht der Stromripple bei hoher Belastung aufgrund der begrenzten Kapazität des Zwischenkreises. Im Betrieb wird gepulst Energie aus der Batterie entnommen. Je kleiner der Zwischenkreis dimensioniert ist, desto weniger wird der durch die gepulste Energieentnahme erzeugte Stromripple geglättet.

Auf der Wechselspannungsseite zeigt sich ein ähnliches Bild. Um ein Drehfeld im Stator zu erzeugen wird die Batteriespannung abwechselnd auf die Statorwicklungen geschaltet. Durch die Induktivität der Statorspulen, wird der Strom geglättet, so dass sich in etwa ein sinusförmiger Strom einstellt. Da die Spuleninduktivitäten zur Reduktion des Gewichts möglichst klein ausgeführt werden, wird dieser Glättungseffekt reduziert und es kommt auch auf der Wechselspannungsseite zu einem überlagerten Stromripple.

Dieser Stromripple, also die schnelle Änderung des Stroms, erzeugt ein sich schnell änderndes magnetisches Feld, welches bei einer Emissionsmessung im Bereich zwischen 9kHz und 30MHz nach dem Standard GBT 18387[2] zu Grenzwertüberschreitungen führen kann. Bild 1 zeigt beispielhaft den Stromripple auf der AC und der DC Seite eines Antriebsumrichters.



**Bild 1** Schematische Darstellung eines HV Bordnetzes mit Stromripple an der AC und DC Seite des Umrichters

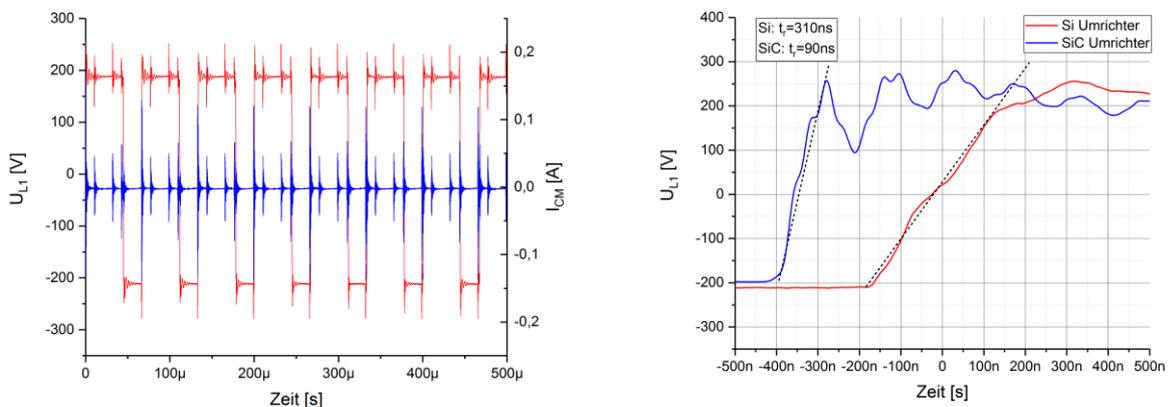
Der Einfluss der eingesetzten Halbleitertechnologie soll in dieser Arbeit am Beispiel eines Antriebsumrichters untersucht werden. Hierzu werden zwei identische B6-Umrichter, einer mit Si- und einer mit SiC-Halbleitern, vermessen und die Einflüsse auf den Stromripple auf der Gleichspannungs- und der Wechselspannungsseite untersucht. Als Belastung für den Umrichter wird auf der Motorseite eine passive Motornachbildung eingesetzt, die die Impedanz einer Antriebsmaschine im relevanten Frequenzbereich modelliert [3], [4]. Somit ist es möglich den Messaufbau vollständig innerhalb einer geschirmten Umgebung zu vermessen, ohne eine drehende Welle schirmen zu müssen. In einem weiteren Schritt werden die gemessenen Störströme im Frequenzbereich betrachtet, um einen Zusammenhang zwischen dem Stromripple des Umrichters und des niederfrequenten Magnetfeldes herauszuarbeiten. Abschließend wird dann die Wirksamkeit von Filtermaßnahmen auf die Störströme auf der DC und der AC Seite untersucht, um aufzuzeigen, wie die niederfrequenten Magnetfelder effektiv reduziert werden können. Da die eingesetzten Umrichter einen sehr großzügigen Aufbau haben, können unterschiedliche Filtermaßnahmen sehr einfach innerhalb des geschirmten Gehäuses umgesetzt werden.

## 2 Untersuchung der Störströme auf der AC Seite des Umrichters

Auf der AC Seite eines Antriebsumrichters wird durch das gepulste Aufschalten der Batteriespannung auf die Antriebswicklungen ein Drehstromsystem und somit ein magnetisches Drehfeld im Stator erzeugt. Hierbei wirken die Induktivitäten glättend auf den im Umrichter erzeugten rechteckförmigen Strom. Zudem werden aufgrund der Potentialsprünge der Sternpunktspannung gegen die Bezugsmasse über die Streukapazitäten des Systems Gleichtaktstörungen erzeugt, die über die Systemschirmung fließen. Diese schnellen Stromimpulse generieren ein Gleichtaktmagnetfeld außerhalb der Systemschirmung, die bei der Magnetfeldmessung detektiert werden kann.

Im Detail treten im Bild 2 links Stromimpulse beim Schalten der Spannung auf. Hier ist zum einen die Spannung, die durch den Umrichter auf die Statorwicklung des Antriebs geschaltete wird und zum anderen der Gleichtaktstörstrom, der auf die Systemschirmung auskoppelt zu sehen. Es wird deutlich, dass jede Schalthandlung im Umrichter durch die schnelle Spannungsänderung einen kapazitiven Ausgleichsstrom zur Folge hat, der in Form von Stromimpulsen auf der Kabelschirmung gemessen werden kann. Diese Stromimpulse generieren einen Teil des niederfrequenten Magnetfeldes zwischen 9 kHz und 30 MHz.

Im rechten Teil des Bildes sind die Schaltflanken des SiC und des Si Umrichters miteinander verglichen. Es ist klar zu sehen, dass die Schaltflanke des SiC Umrichters um den Faktor drei schneller ist als die des Si Umrichters, wodurch im Frequenzbereich höhere Störpegel bei höheren Frequenzen zu erwarten sind [5].



**Bild 2** Spannung und Gleichtaktstrom an der Drehstromseite des Umrichters (links: Spannung an L1 und Gleichtaktstrom auf der Kabelschirmung; rechts: Vergleich der Einschaltpulse von SiC und Si Umrichter bei  $U_{DC}=400$  V)

Um nun genauer zu analysieren, welchen Anteil der Gegentaktripple und die Gleichtaktstromimpulse auf das außen messbare Magnetfeld haben, werden an beiden Umrichtern Messungen der Spannungs- und Stromimpulse im Zeitbereich durchgeführt. Im Detail wird die Leiter-Erd Spannung, der Gleichtaktstrom auf der Kabelschirmung und der Gegentaktripple, der den Laststrom des Systems darstellt untersucht. Da bei einem Drehstromantrieb in Sternschaltung im Betrieb immer der Strom über eine Wicklung in

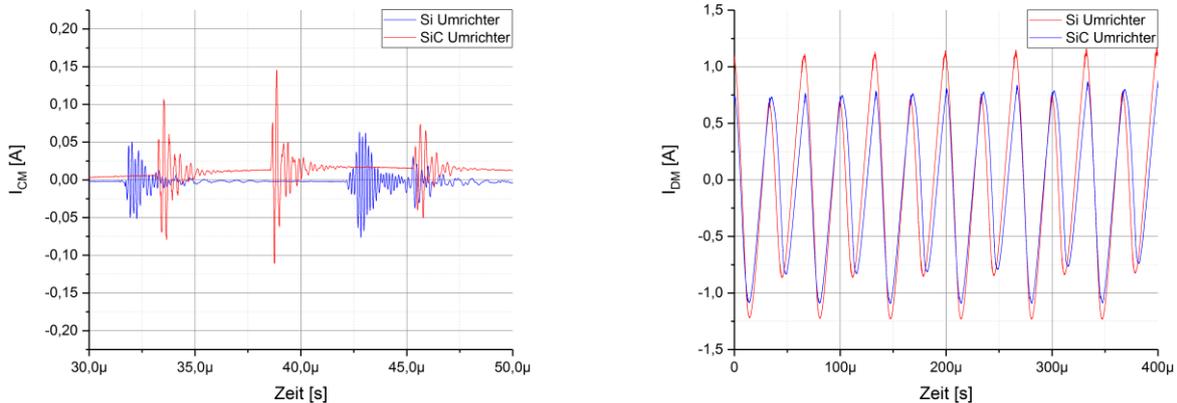
Richtung des Sternpunkts fließt und über die anderen beiden zurück [6], wird die Messung des DM Stroms so durchgeführt, das der DM Strom nach (1) gemessen wird.

$$I_{DM} = I_{L1} - I_{L2} - I_{L3} \quad (1)$$

Bild 3 zeigt den Vergleich der Gleich- und Gegentaktstromimpulse auf der AC Seite des Si und des SiC Umrichters. Auf der einen Seite wird, wie in Bild 2 gezeigt, durch jede Schalthandlung ein Stromimpuls erzeugt, der über die Kabelschirmung fließt. Auf der anderen Seite wird die pulsweitenmodulierte Spannung durch die Antriebswicklungen im Umrichter geglättet so dass ein sinusförmiger Strom entsteht. Aufgrund der endlichen Induktivität der Antriebswicklung bleibt ein hochfrequenter Stromripple der mit der Taktfrequenz des Umrichters schwingt. Die Ergebnisse zeigen, dass die schnelleren Schalthandlungen im SiC Umrichter im wesentlichen einen Einfluss auf den Gleichtaktstörstrom haben. Da sich der kapazitive Ausgleichstrom im Wesentlichen aus der Spannungsänderung ergibt, kommt es beim SiC Umrichter zu deutlich höheren Amplituden beim Gleichtaktstörstrom.

$$I_{CM} = C_{Kabel} \cdot \frac{dU_C(t)}{dt} \quad (2)$$

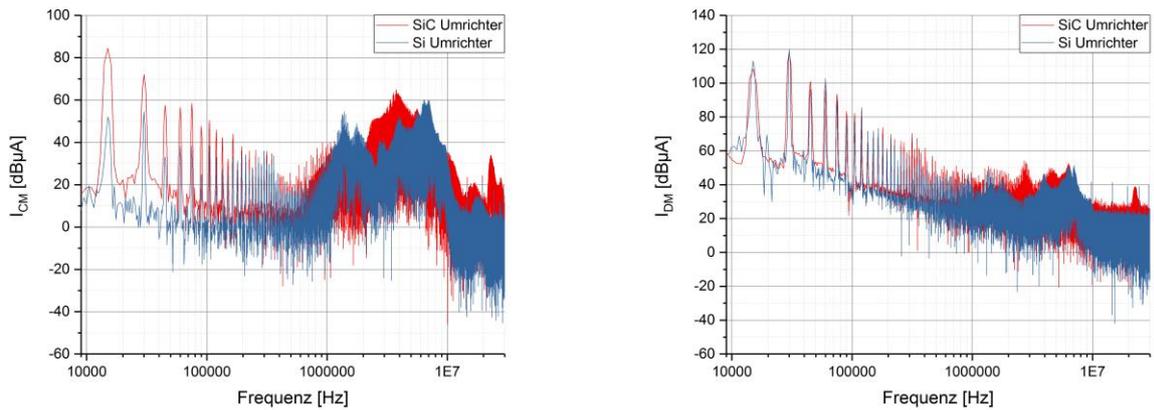
Beim Gegentaktstrom hingegen zeigt sich keine signifikanter Einfluss der verwendeten Halbleiter auf den Stromripple des Gegentaktstörstroms. Hier wirkt die Induktivität des Motors der schnelleren Spannungsänderung entgegen, so dass der Stromanstieg des Ripple begrenzt wird.



**Bild 3** Störströme auf der Drehstromseite des Umrichters für den Si und den SiC Umrichter (links: Gleichtaktstromimpulse auf der AC Kabelschirmung; rechts: Gegentaktstromripple auf der AC Kabelschirmung)

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch bei einer Betrachtung der Signale im Frequenzbereich. Gerade beim Gleichtaktstörstrom sind deutliche Unterschiede zwischen den Si und dem SiC Umrichter zu sehen. Im vorderen Frequenzbereich treten hier Unterschiede von 20dB auf, was mit der deutlich höheren Amplitude der Pulse begründet werden kann. Beim Gegentaktstrom zeigt sich wie schon im Zeitbereich ein deutlich geringerer Einfluss der eingesetzten Leistungshalbleiter. Nur im Bereich ab etwa 1MHz sind einige kleinere Unterschiede zu sehen.

Da sich das niederfrequente Magnetfeld aber aus einer Kombination aus Gleich- und Gegentaktstörstrom zusammensetzt, sind insgesamt bei der Verwendung schnell schaltender SiC Halbleiter auch höhere Emissionen zu erwarten.



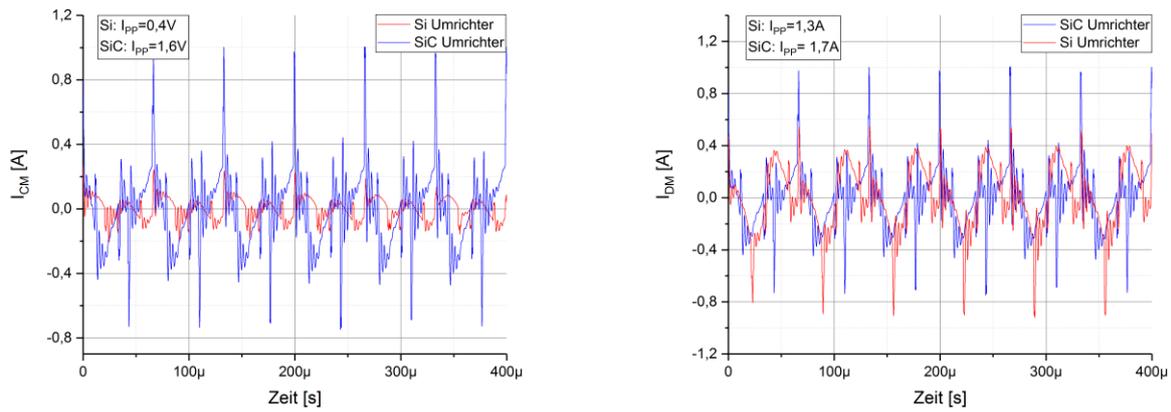
**Bild 4** Einfluss der Halbleitertechnologie auf die Gleichtakt- und Gegentaktströme auf der Drehstromseite des Umrichters im Frequenzbereich (links: Gleichtaktstrom; rechts Gegentaktstrom)

### 3 Untersuchung der Störströme auf der DC Seite des Umrichters

Auf der DC Seite des Antriebsumrichters wird durch die gepulste Entnahme von Energie aus der Antriebsbatterie ein Stromripple zwischen HV+ und HV- generiert. Dieser Stromripple steigt mit der entnommenen Leistung an. Zudem ist die Größe des Zwischenkreises entscheidend für die Höhe des Stromripples. Je kleiner der Zwischenkreiskondensator dimensioniert ist, desto höher ist der Stromripple auf der DC Seite des Systems. Neben dem Stromripple wird auf der DC auch ein Gleichtaktstörstrom auf der Schirmung detektiert. Dieser wird, wie auf der AC Seite, durch die Potentialsprünge beim Schalten der Leistungshalbleiter generiert.

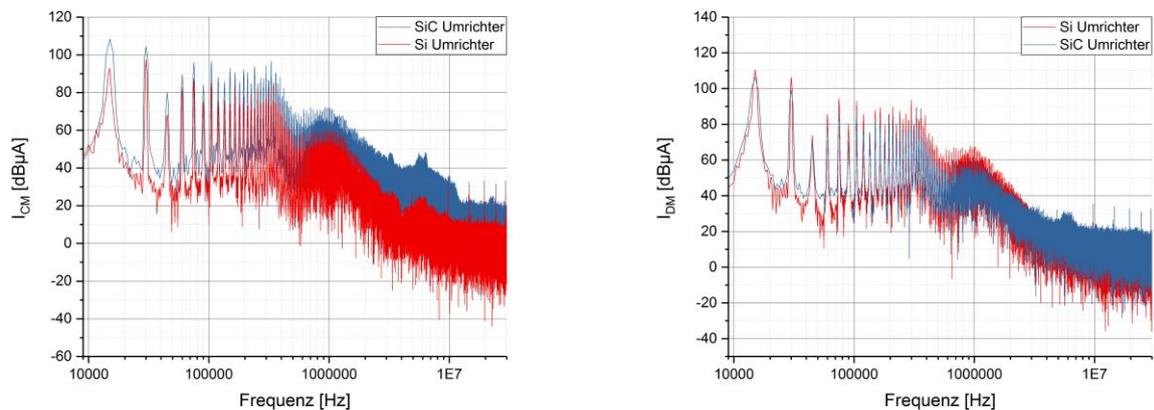
Für die Analyse werden hier der Gleichtakt- und der Gegentaktstrom gemessen. Hierdurch kann ermittelt werden welchen Einfluss die schnelleren Schalthandlungen des SiC Umrichters auf die Störströme auf der DC Seite haben. Da der Kabelbaum auf der DC Seite im Fahrzeug deutlich ausgeprägter ausgeführt ist als die meist kurze Leitung zwischen Umrichter und Motor und zudem bei einer Komponentenmessung nach CISPR 25 [4] die Antenne auf den DC Kabelbaum gerichtet wird, sind die dort generierten Ströme besonders kritisch zu betrachten.

Bild 5 zeigt die Gleich- bzw. die Gegentaktstörströme auf der DC-Seite des Umrichters bei Verwendung von Si bzw. SiC Halbleitern. Beim Gleichtaktstörstrom ist zu sehen, dass bei jeder Schalthandlung im Umrichter ein Stromimpuls erzeugt wird. Da der Umrichter bei einer Taktfrequenz von 15kHz arbeitet, kommt es alle 66µs zu einem solchen Stromimpuls. Im Vergleich zum Si Umrichter kommt es beim SiC Umrichter zu viermal höheren Gleichtaktstörungen. Bei den Gegentaktstörungen ist die Abweichung wie schon auf der AC Seite geringer. Zudem zeigt sich, dass die schnelleren Schalthandlungen nur die Amplitude der Gleichtaktstörungen erhöhen, somit ist beim Si Umrichter die Gegentaktstörung in etwa 3 mal höher als die Gleichtaktstörung. Beim SiC Umrichter sind die Stromimpulse hingegen in etwa gleich.



**Bild 5** Störströme auf der DC-Seite des Umrichters für den Si und den SiC Umrichter (links: Gleichtaktstromimpulse auf der DC Kabelschirmung; rechts: Gegentaktstromrippe auf der DC Kabelschirmung)

Bild 6 zeigt die Gleich- und Gegentaktstörströme im Frequenzbereich. Wie schon im Zeitbereich, sind auch hier die größten Abweichungen zwischen Si und SiC Umrichter bei den Gleichtaktstörungen zu sehen. Durch die schnelleren Schalthandlungen im SiC Umrichter ist der Gleichtaktstörstrom über den gesamten Frequenzbereich deutlich erhöht. Beim Gegentakt hingegen ist der Einfluss der verwendeten Halbleitertechnologie nicht so deutlich. Beim Vergleich von Gleichtakt- und Gegentaktstrom, die in Summe für das niederfrequente Magnetfeld verantwortlich sind, wird allerdings deutlich, dass beide gerade beim SiC Umrichter ähnliche Amplituden haben, so dass Gegenmaßnahmen für beide Störströme in Betracht gezogen werden müssen. Zudem ist das durch den Gegentaktstrom generierte Magnetfeld umso höher je unsymmetrischer die DC Leitungen verlegt werden. Sind die HV+ und die HV- Leitung in großem Abstand verlegt, so ist aus Sicht der Magnetfeldantenne einer der Leiter deutlich weiter entfernt, was dazu führt, dass sich Hin- und Rückstrom an der Antenne nicht vollständig kompensieren. Gerade weil die Leitungen auf der DC Seite in Elektrofahrzeugen deutlich länger und ausgedehnter sind, ist auch die Antennenstruktur für die Auskopplung der Magnetfelder deutlich größer.

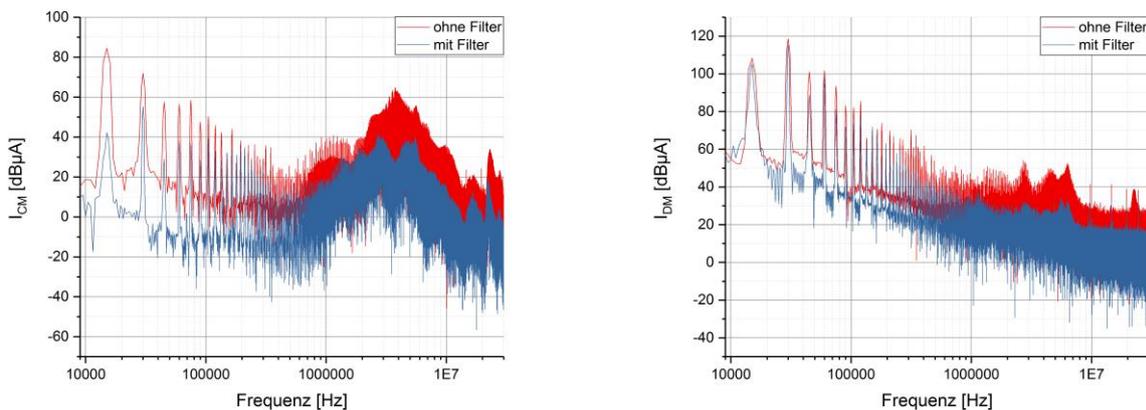


**Bild 6** Einfluss der Halbleitertechnologie auf die Gleichtakt- und Gegentaktströme auf der DC-Seite des Umrichters im Frequenzbereich (links: Gleichtaktstrom; rechts Gegentaktstrom)

## 4 Einfluss von Filtermaßnahmen auf die Störströme im System

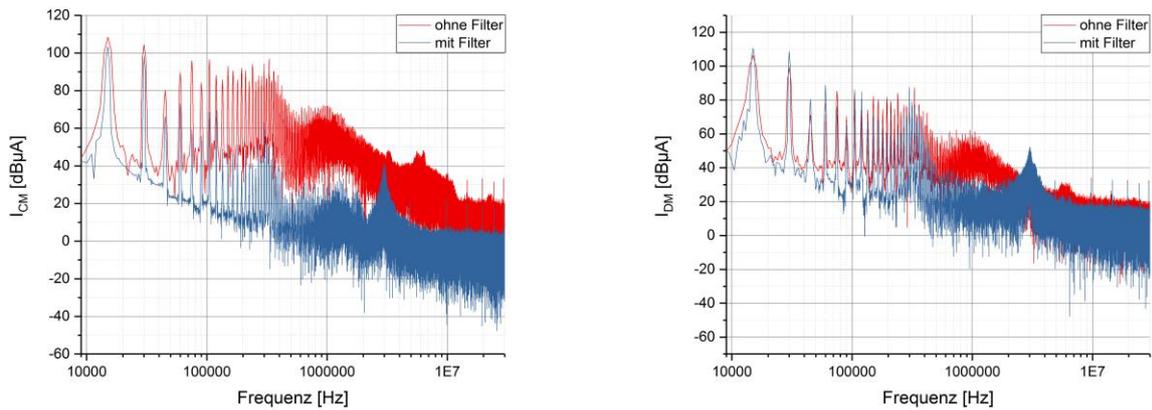
In diesem letzten Abschnitt wird untersucht, wie sich Entstörmaßnahmen auf die Störströme auf der AC und der DC Seite auswirken. Hierzu wurden entsprechende Filterkomponenten innerhalb der Schirmgehäuses des Umrichters installiert. Da das Gehäuse sehr groß ist, können auch große Filterkomponenten problemlos installiert werden.

Auf der AC Seite wird aktuell im Fahrzeugbereich nicht gefiltert. Dies liegt vor allem daran, dass Filter auf der AC Seite einen sehr großen Bauraum benötigen. Alleine  $C_X$  und  $C_Y$  Kondensatoren, die auf der DC Seite problemlos einsetzbar sind, müssen auf der AC Seite für die hohen Ausgleichsströme aufgelegt werden. Gleiches gilt für den Einsatz von induktiven Filterkomponenten zur Kompensation der Gegentaktstörungen auf der AC Seite, da diese bei den hohen Lastströmen sehr groß ausgeführt werden müssten. Als Kompromiss wurde in dieser Arbeit eine Gleichtaktdrossel in Form von zwei Ferritkernen auf den Drehstromleitungen realisiert. Die Ergebnisse in Bild 7 zeigen deutlich den Effekt der Ferrite auf die Gleichtaktstörstrom auf der AC Seite. Über den gesamten Frequenzbereich können die Gleichtaktstörströme deutlich reduziert werden. Auf den Gegentaktstrom hat diese Maßnahme allerdings nur einen geringen Einfluss. Gerade bei niedrigen Frequenzen sind die eingesetzten Ferrite nahezu wirkungslos.



**Bild 7** Einfluss von Gleichtaktdrosseln auf der Drehstromseite auf die Störströme des Umrichters im Frequenzbereich (links: Gleichtaktstörstrom auf der Kabelschirmung; rechts: Gegentaktstörstrom)

Auf der Gleichspannungsseite werden auch in aktuellen Antriebssystemen Filter eingesetzt. Dies liegt zum einen an der deutlich ausgedehnteren Leitungsstruktur, von der ein höheres Abstrahlpotential ausgeht. Zum anderen ist der Einsatz von  $C_X$  bzw.  $C_Y$  Kondensatoren aufgrund der geringeren Potentialsprünge deutlich einfacher zu realisieren. Gegentaktdrosseln kommen aber auch hier nicht zum Einsatz, da Sie bei den hohen Gleichströmen in Sättigung gehen. Hier wurde ein Filter bestehend aus 680nF  $C_Y$  Kondensatoren in Kombination mit einer Gleichtaktdrossel und einem 680nF  $C_X$  Kondensator eingesetzt. Die Ergebnisse in Bild 8 zeigen deutlich, dass gerade die Gleichtaktstörströme effektiv gedämpft werden können. Bei den Gegentaktstörungen ist der Filtereffekt, wie auch schon auf der AC Seite nicht so stark.



**Bild 8** Einfluss eines Filter mit X-, Y-Kondensatoren und Gleichtaktinduktivität auf der DC Seite des Umrichters auf die Störströme im Frequenzbereich (links: Gleichtaktstörstrom auf der Kabelschirmung; rechts: Gegentaktstörstrom)

## 5 Zusammenfassung

Beim Betrieb von Antriebsumrichtern kommt es sowohl auf der AC als auch auf der DC Seite zu Gleichtakt und Gegentaktstörströmen, die in Kombination ein niederfrequentes Magnetfeld erzeugen, welches bei Messungen nach dem Standard GBT 18387 zu Grenzwertüberschreitungen führen kann.

Ein Teil der Arbeit war die Untersuchung des Einflusses der Halbleitertechnologie und somit der Schaltzeit der Leistungshalbleiter auf die Störströme auf der AC und der DC Seite. Hier zeigte sich, dass die schnelleren Spannungsflanken im Wesentlichen einen Einfluss auf die Gleichtaktstörströme haben. Zum einen sind die Stromimpulse schneller sprich hochfrequenter und zum anderen steigt ihre Amplitude mit sinkender Einschaltzeit an. Auf den Gegentaktstrom hingegen hat die Schaltzeit nur einen geringen Einfluss.

Ein weiterer Teil war die Untersuchung des Einflusses von zusätzlichen Filtermaßnahmen auf die Störströme auf der AC und DC Seite des Umrichters. Gerade beim Gegentaktstörstrom sind die im Fahrzeug einsetzbaren Filtermaßnahmen begrenzt. Die Gleichtaktströme hingegen können effektiv gefiltert werden, so dass zur Reduktion der durch den Gegentaktstrom erzeugten Magnetfeldkomponenten auf der DC Seite eine möglichst symmetrische und enge Kabelverlegung realisiert werden sollte. Auf der AC Seite kann eine möglichst kurze Ausführung der Motorleitungen die generierten Magnetfelder deutlich reduzieren.

## Literaturangaben

- [1] N.Oswald et.al.: An Experimental Investigation of the Tradeoff between Switching Losses and EMI Generation With Hard-Switched All-Si, Si-SiC, and All-SiC Device Combinations, IEEE Transactions on Power Electronics ( Volume: 29, Issue: 5, May 2014)
- [2] GB-T 18387-2008: Limits and Test Method of Magnetic and Electric Field Strength from Electric Vehicles, Broadband, 9 kHz to 30 MHz
- [3] S. Jeschke, et. al.: EMI Measurement on Electric Vehicle Drive Inverter using a Passive Motor Impedance Network, APEMC 2016
- [4] S. Jeschke, et. al.: Entwicklung einer passiven Motornachbildung zur Prüfung von Antriebssystemen von Elektro- Hybridfahrzeugen, EMV 2016, Düsseldorf 2016
- [5] J. Specovius: Grundkurs Leistungselektronik, 3. Auflage, Vieweg Teubner Verlag, 2009
- [6] E.Spring: Elektrische Maschinen, 2. Auflage, Springer Verlag, 2006