

Bewertung der Sensitivität eines hybriden Gleichtaktfilters für Traktionsinverter gegenüber Variationen der Betriebsparameter

M.Sc. Denis Müller, Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart
Dipl.-Ing. Michael Beltle, Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart

1 Einleitung

In der Leistungselektronik wird für die Miniaturisierung von Baugruppen viel Aufwand betrieben. Neue Halbleitertechnologien wie Siliziumcarbid unterstützen diesen Trend. Um den benötigten Bauraum der Leistungselektronik weiter reduzieren zu können, stellen hybride EMV – Filter eine Möglichkeit zur Verkleinerung der Filterbaugruppen und damit des Gesamtvolumens der Komponente dar [1]. Durch die Kombination von konventionellen passiven Filtern mit aktiven Elementen zur Störreduzierung lässt sich deutlich an Bauraum bei induktiven Filterkomponenten einsparen. Die Filterdämpfung der aktiven Filter ist jedoch, ebenso wie bei konventionellen EMV – Filtern, von der Quell bzw. Senkenimpedanz abhängig [2]. Diese Impedanzen können sich im Betrieb sowohl durch verschiedene Einbausituationen als auch unterschiedliche Betriebspunkte verändern. Im Hinblick auf mögliche Anwendungen aktiver und hybrider EMV – Filter ist eine Sensitivitätsuntersuchung auf solche schwankenden Betriebsparameter bzw. Einflüsse durch unterschiedliche Einbausituationen notwendig. Deren Analyse wird an einem Traktionsinverter im CISPR 25 Komponententest durchgeführt. Ein eigens entwickeltes, hybrides Gleichtaktfiler fungiert dabei als Prüfling. Nach einer kurzen Vorstellung der entwickelten Hardware des Hybridfilters werden anschließend die Auswirkungen von unterschiedlichen Zuleitungslängen, Ausgangsströmen, Batteriespannungen und Schaltfrequenzen auf die Filterdämpfung des Hybridfilters gezeigt. Die Auswahl der betrachteten Parameter unterliegt dabei keinem Anspruch auf Vollständigkeit, sondern bildet lediglich einen Ausschnitt aus möglichen Variationen ab und soll eine Vorgehensweise zu deren Bewertung aufzeigen.

2 Verwendetes hybrides Gleichtaktfiler in Analogtechnik

Zur Realisierung von hybriden EMV – Filtern existieren eine Vielzahl an Möglichkeiten. Um die notwendige, breitbandige Filterwirkung bis in den hohen MHz – Bereich zu erreichen, wird zusätzlich zur aktiven Filterstufe eine passive Filterstufe benötigt [3]-[7]. Die passive Filterstufe kann dabei auf Frequenzbereiche oberhalb 1 MHz dimensioniert werden, während die aktive Filterstufe ihre maximale Filterdämpfung unterhalb 1 MHz aufweist. Aktive Filter lassen sich grundsätzlich sowohl bezüglich der Regelstruktur (Feedback / Feedforward) als auch der Art von Ein- bzw. Auskopplung (Strom / Spannung) unterteilen [8]. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde ein Hybridfilter mit analoger, aktiver Filterstufe nach dem Prinzip der spannungsgesteuerten Störstromunterdrückung in Feedbacktopologie aufgebaut. Die detaillierte Auslegung wird in [5] beschrieben.

Der Filter besteht aus einer passiven LC-Filterstufe und einer nachgeschalteten, aktiven Filterstufe. Das Blockschaltbild der Anordnung zeigt Bild 1. Für die passive Filterstufe, in Bild 2 dargestellt, werden 220 nF C_Y -Kondensatoren und eine nanokristalline Gleichtaktrossel mit einer Windungszahl von $n = 1$ und einer Kernpermeabilität von $\mu_r = 30.000$ verwendet. Das Maximum der Dämpfung des Hybridfilters soll bei ca. 1 MHz erreicht werden.

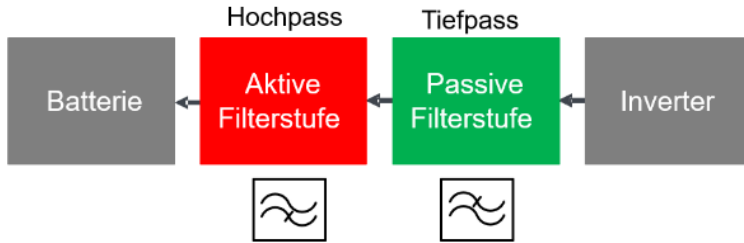


Bild 1: Blockschaltbild des Hybridfilters

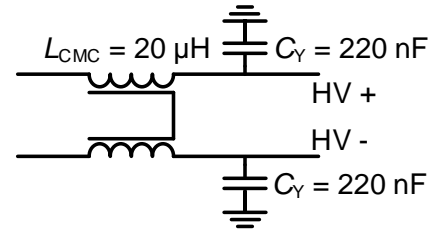


Bild 2: Passive Filterstufe

Das Schaltbild der aktiven Filterstufe zeigt Bild 3. Um die Übersichtlichkeit zu wahren wird nur die aktive Filterschaltung für die „HV+“ - Leitung dargestellt, die gleiche Anordnung findet sich ebenfalls für den „HV-“ Pfad. Das Eingangssignal wird über den Hochpass ($f_g = 18$ kHz) aus C_{Sense} und R_{Sense} von der Hochvoltleitung abgegriffen und einem invertierenden Vorverstärker zugeführt. Dieser realisiert die notwendige Phasendrehung von 180° und sorgt für eine Spannungsverstärkung des Kompensationssignals. Durch den Hochpass erreichen die ersten Harmonischen der Taktfrequenz f_c des Inverters den Verstärker nur mit reduzierter Amplitude und verhindern so ein ungewolltes Übersteuern. Um die kurzzeitig notwendigen Stromspitzen von mehreren Ampere liefern zu können, wird ein komplementärer Gegentaktverstärker nachgeschaltet. Dieser ist mit Leistungs-Bipolartransistoren in Darlingtonschaltung aufgebaut und ermöglicht Spitzenströme von über 10 A. Das erzeugte Kompensationssignal wird über die Injektionskapazität C_{inj} als Kompensationsstrom auf die HV-Leitung eingespeist. Um die Stabilität der Regelschleife zu erhöhen, wird mithilfe von R_F und C_F eine Polstellenkompensation durchgeführt.

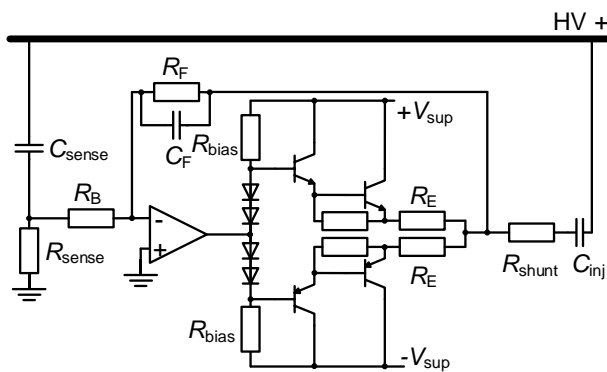


Bild 3: Schaltbild der aktiven Stufe von HV+

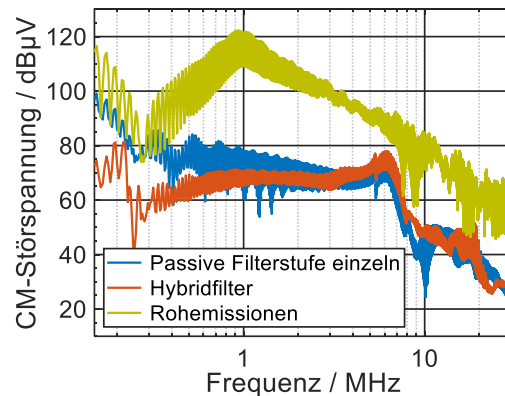


Bild 4: Gleichtakt-Störspannung an der LISN, Vergleich mit passivem, hybridem und keinem Filter

Zur Verifikation des Designs wird der Hybridfilter im CISPR 25 Komponententest an einem 300 V – Traktionsinverter vermessen. Der Inverter wird mit einer Nullmomentenmodulation, d.h. die Worst-Case Gleichaktanregung mit 50% Duty-Cycle, an einer Motor-Ersatzlast betrieben.

Detailliert wird auf den Messaufbau im folgenden Kapitel eingegangen. Die Messung der leitungsgebundenen Gleichtaktstörungen an der Netznachbildung findet sich in Bild 4. Im Vergleich mit den Rohemissionen ohne jegliche Filtermaßnahmen (in Gelb) zeigt die passive Stufe des Hybridfilters (in Blau) ab etwa 500 kHz eine signifikante Filterwirkung mit einem Maximum bei 1 MHz. Unterhalb von 300 kHz erreicht die passive Filterstufe maximal 20 dB Dämpfung. Beim Zuschalten der aktiven Filterstufe (in Rot) zeigt sich eine deutliche Erhöhung der Filterdämpfung unterhalb von 500 kHz. Bis auf zwei Spektrallinien bei 200 kHz werden in diesem Bereich Dämpfungswerte von weiteren 20 dB erreicht. Somit steigert der aktive Filterteil im unteren Frequenzbereich die Filterdämpfung erheblich.

Mit den bisher angestellten Messungen wurde die Filterwirkung jedoch nur für den Komponententest im Worst-Case Szenario für einen Gleichtaktfilter charakterisiert. Wie bei passiven Filtern spielen Quellen- und Senkenimpedanz jedoch auch bei Hybridfiltern eine entscheidende Rolle für die erreichbare Filterdämpfung [8]. Zusätzlich muss beachtet werden, dass der aktive Filterteil für einen bestimmten Betriebsfall bzw. Betriebsbereich ausgelegt wird. In der späteren Anwendung im Fahrzeug können Einbausituation und Betriebsparameter jedoch von den im Komponententest geprüften Bedingungen abweichen. Auf die erweiterte Qualifikation des entworfenen Filters und damit die Bestimmung der wesentlichen Einflussparameter auf die Filterdämpfung soll im Folgenden genauer eingegangen werden.

3 Messung des Einflusses verschiedener Parameter auf die Filterwirkung

Als Parameter werden Betriebsparameter des Traktionsinverters, dessen Teil der hybride EMV-Filter darstellt, und äußere Einflüsse betrachtet. Diese Einflüsse können sich durch die Einbausituation im Fahrzeug, wie bspw. die Kabellängen, oder durch dynamische Änderungen am System wie Variation der Invertertaktfrequenz oder Absinken der Batteriespannung als Folge von sinkendem State-of-Charge (SoC) ergeben. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der betrachteten Parameter und deren Zuordnung zum System.

Inverterparameter		Äußere Parameter	
Parameter	Bereich	Parameter	Bereich
Modulationsgrad mod	0 - 15%	Batteriespannung V_{DC}	240 - 330 V
Taktfrequenz f_c	10 - 30 kHz	HV-Kabellänge $l_{HV\text{Kabel}}$	1,25 - 3 m
Versorgungsspannung V_{Sup}	12 - 15 V	Motorkabellänge l_{MK}	0,5 m & 1 m
		Impedanz Z_{LISN}	+ ind. / kap.

Tabelle 1: Zuordnung und Wertebereich der untersuchten Einflussparameter

Als Inverterparameter werden in dieser Untersuchung der Modulationsgrad, d.h. die Amplitude des am Phasenabgang erzeugten sinusförmigen Stroms [9], die Taktfrequenz der Ansteuerung der Leistungshalbleiter f_c und die Versorgungsspannung der aktiven Filterstufe V_{Sup} betrachtet. Äußere Parameter stellen wiederum die Batteriespannung V_{DC} , die Kabellänge der DC-Leitungen $l_{HV\text{Kabel}}$, die Zuleitungslänge der Phasenleitungen zum Motor l_{MK} und die Impedanz Z_{LISN} der Netznachbildung bzw. im Fahrzeug der Batterie dar.

3.1 Messaufbau

Der Messaufbau ist angelehnt an den in der CISPR25 spezifizierten Komponententest für Hochvoltkomponenten. Bild 5 zeigt den Versuchsaufbau in der Absorberhalle. Der Inverter ist mit ungeschirmten Kabeln mit der Hochspannungs-Netznachbildung verbunden. An den DC-Klemmen des Inverters ist das hybride EMV-Filter angebracht.

Die Lastmaschinen-Nachbildung ist mittels geschirmter Leitungen mit den Phasenabgängen des Inverters verbunden. Die Ansteuerung ist auf einer eigens entwickelten FPGA-Plattform realisiert, die Leistungshalbleiter werden über Lichtwellenleiter galvanisch getrennt angesteuert. Zur Versorgung der aktiven Filterstufe wird ein lineargeregeltes Labornetzteil verwendet. Gleich- und Gegentaktkomponente werden mittels Richtkopplern separiert und über einen Zeitbereichsmessempfänger aufgezeichnet.

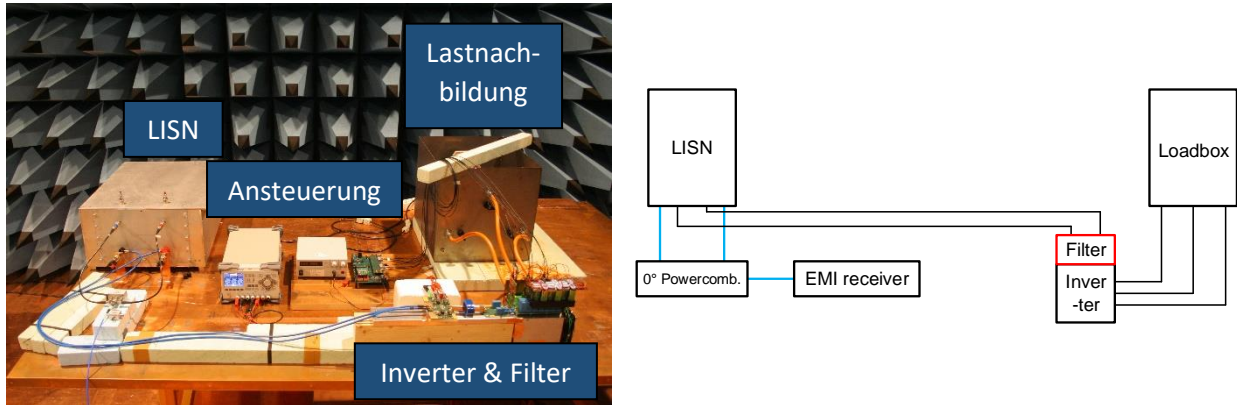


Bild 5: Versuchsaufbau mit Hybridfilter in Anlehnung an CISPR 25 Komponententest & Blockschaltbild der Versuchsanordnung

3.2 Vorgehen

Die Parametervariationen werden am Messaufbau durchgeführt. Einerseits durch Änderung der Betriebsparameter, andererseits durch Veränderungen am Messaufbau können die in Tabelle 1 dargestellten Parameter variiert werden. Aus den Messungen der Störspannungen von rein passivem und hybridem Filter können deren Einhüllende ermittelt werden. Durch den Vergleich der Störspannung mit passiver Filterstufe und derer mit hybrider Filterstufe, d.h. zugeschaltetem aktivem Filter, lässt sich die Dämpfung der aktiven Filterstufe bestimmen. Das Vorgehen ist in Bild 6 dargestellt.

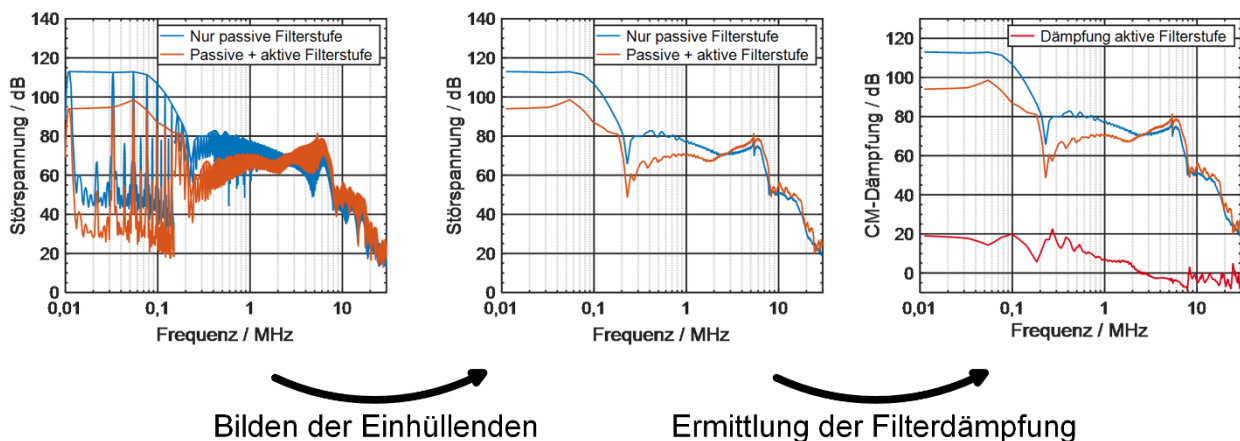


Bild 6: Ermittlung der Filterdämpfung für die Sensitivätsbetrachtung

Zur Auswertung der Sensitivität werden die ermittelten Dämpfungsverläufe immer auf den, für die Auslegung des Hybridfilters betrachteten Betriebsfall bezogen. Im Folgenden werden Inverterparameter bzw. äußere Einflussparameter separat betrachtet und keine verschiedenen Parametervariationen überlagert. Als Standardbetriebsfall gilt der Komponententest, wie in 3.1 beschrieben, bei einer DC-Spannung von $V_{DC} = 300V$, Nullmomentenmodulation mit 50% Duty-Cycle und $f_c = 10$ kHz Taktfrequenz.

3.2.1 Einfluss der Inverterparameter

In der ersten Messreihe wird der Einfluss der Inverterparameter untersucht. In Bild 7 und Bild 8 ist der Einfluss des Modulationsgrades auf die Gleichtakt- bzw. Gegentaktfilterdämpfung der aktiven Filterstufe zu sehen. Bei der Nullmomentenmodulation fließt außer den Schaltverlusten der Leistungshalbleiter und Umladeströmen parasitärer Elemente kein nennenswerter Strom von der DC- zur AC-Seite. Deshalb überwiegt in diesem Betriebspunkt der Gleichtaktanteil und es ist nur eine unwesentliche Gegentakt-dämpfung in Bild 8 zu erkennen. Oberhalb von 5 MHz führt das aktive Filter aufgrund der unzureichenden Phasengenauigkeit zu einer Erhöhung des Störpegels was sowohl im CM als auch im DM als negative Filterdämpfung wiederzufinden ist. Bei einer leichten Erhöhung der Modulation auf 5% der maximalen Stromamplitude bleibt die CM-Dämpfung weitgehend gleich, die DM-Dämpfung erhöht sich jedoch durch den zunehmenden Anteil an Gegentaktstörungen. Bei 15% Modulationsgrad ist ein Einbrechen sowohl der CM- als auch der DM-Dämpfung zu erkennen. Bei weiteren Messungen konnte dieser Effekt auf ein Übersteuern der Verstärkerstufen, begründet in zu hohem Gegentaktanteil, zurückgeführt werden. Für das aktuelle Design der aktiven Filterstufe lässt sich festhalten, dass die Dämpfung vor allem im Bereich oberhalb von 150 kHz stark vom Modulationsgrad beeinflusst wird. Die Grenzfrequenz bricht damit deutlich ein von 3 MHz auf unter 200 kHz.

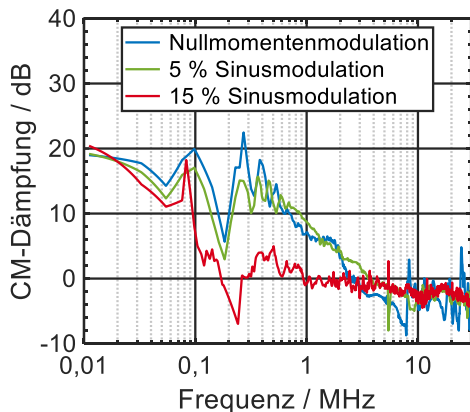


Bild 7: Vergleich der Gleichtakt-Filterdämpfung der aktiven Stufe abhängig vom Modulationsgrad

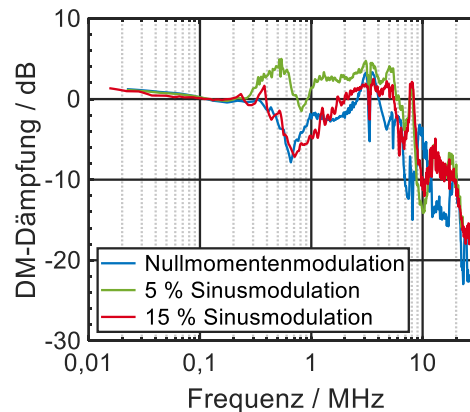


Bild 8: Vergleich der Gegentakt-Filterdämpfung der aktiven Stufe abhängig vom Modulationsgrad

Den Einfluss der Invertertaktfrequenz f_c zeigt Bild 9. Durch die Erhöhung von f_c wird zunächst kein negativer Effekt auf die CM-Dämpfung festgestellt. Steigt die Taktfrequenz über 20 kHz ist ein starker Einbruch der CM-Dämpfung oberhalb von 150 kHz und ein Verschieben der Grenzfrequenz auf unter 1 MHz festzustellen. Steigt die Taktfrequenz weiter an, auf über 30 kHz, erreicht die CM-Dämpfung wieder den Ausgangswert bei $f_c = 10$ kHz und sogar marginal höhere Dämpfung. Bild 10 zeigt die CM-Dämpfung bei Variation der Versorgungsspannung V_{sup} des aktiven Filters. Bei abnehmender Versorgungsspannung zeigt sich ein geringes Abnehmen der Filterdämpfung über den gesamten, wirksamen Frequenzbereich. Die Grenzfrequenz verschiebt sich jedoch nicht. Zwischen 14 V und 15 V ist noch kein Einfluss auf die CM-Dämpfung ersichtlich. Dies ist in der Auslegung auf 14 V Versorgungsspannung begründet, da eine Erhöhung der über diesen Punkt hinaus keine Erhöhung der Filterdämpfung als Resultat hat. Der aktive Filter reagiert diesem Parameter gegenüber schwach sensitiv.

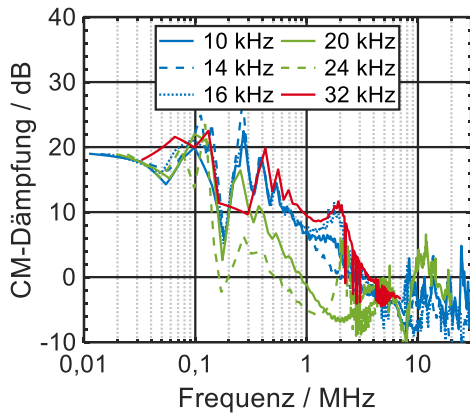


Bild 9: Vergleich der Gleichtakt-Filterdämpfung der aktiven Stufe abhängig von f_c

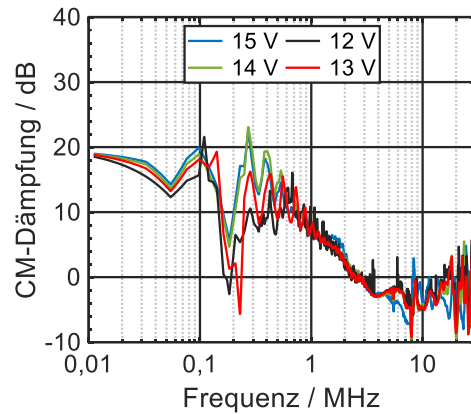


Bild 10: Vergleich der Gleichtakt-Filterdämpfung der aktiven Stufe abhängig von V_{Sup}

3.2.2 Einfluss der äußeren Parameter

Im Folgenden sollen die äußeren Einflussparameter durch die Einbausituation im Fahrzeug untersucht werden. Zur Nachbildung dieser Einflüsse wurden die untersuchten Parameter am Aufbau variiert um die Sensitivität zu ermitteln. Als erste Parameter werden die Kabellänge der Batterieleitungen und der Motorleitungen betrachtet. Die CM-Dämpfung in Bild 11 bzw. Bild 12 weist im untersuchten Bereich keinerlei Einflüsse der Kabellänge auf die Filterwirkung auf. Somit besteht keine Sensitivität gegenüber diesem Parameter. Längere Motorkabel haben sogar einen leicht positiven Einfluss auf die Filterdämpfung der aktiven Filterstufe oberhalb von 1 MHz. Bei Verwendung von geschirmten Batterieleitungen sollte eine gesonderte Betrachtung angestellt werden, da sich die Leitungsbeläge wesentlich von den hier verwendeten, ungeschirmten Leitungen unterscheiden.

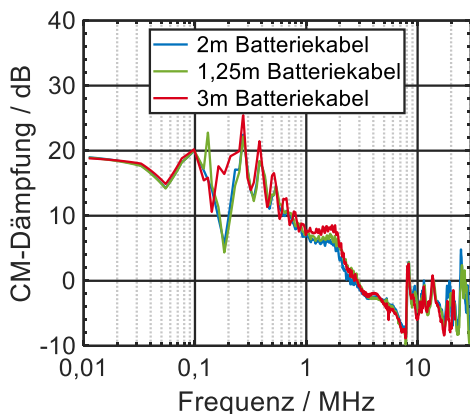


Bild 11: Vergleich der Gleichtakt-Filterdämpfung der aktiven Stufe abhängig von der Länge der Batteriekabel

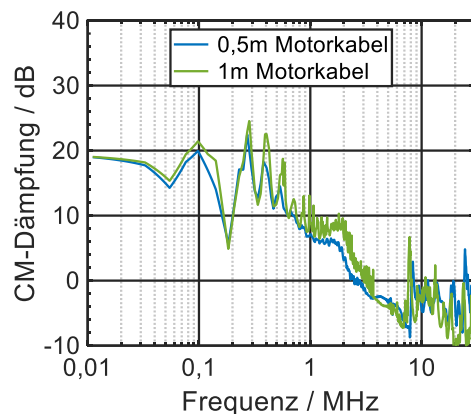


Bild 12: Vergleich der Gleichtakt-Filterdämpfung der aktiven Stufe abhängig von der Länge der Motorkabel

Die Varianz der Batteriespannung im Fahrzeug wurde durch ein Erhöhen und Absenken (+10% / -20%) [10] der Versorgungsspannung V_{DC} nachgebildet. In diesem Spannungsband lassen sich keinerlei Auswirkungen auf die CM-Dämpfung erkennen, was den in Bild 13 zu findenden Messungen zu entnehmen ist. Bild 14 zeigt den Vergleich der CM-Dämpfung für eine veränderte Impedanz der Netznachbildung. Betrachtet werden eine erhöhte Impedanz durch Einbringen einer Induktivität in jede DC-Leitung und eine verringerte Impedanz, realisiert mit einer zusätzlichen Kapazität gegen den Massetisch.

Durch Einfügen eines Kondensators, und somit einer Verringerung der Impedanz an den Klemmen, sinkt die CM-Dämpfung unterhalb 150 kHz um auf 12 dB im Maximum ab. In diesem Bereich besteht somit eine starke Sensitivität auf die Impedanz der Netznachbildung bzw. Batterie im Fahrzeug. Die Erhöhung der Impedanz durch Einfügen einer Induktivität zeigt lediglich für zwei Harmonische zwischen 150 kHz und 200 kHz eine größere, positive Auswirkung.

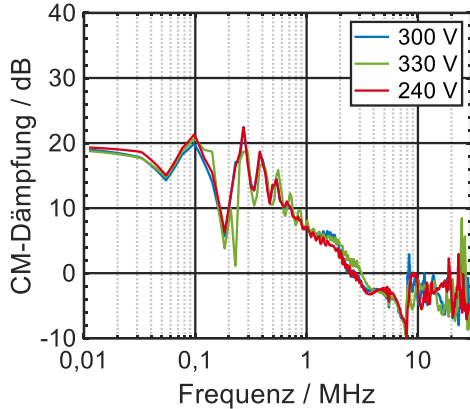


Bild 13: Vergleich der Gleichtakt-Filterdämpfung der aktiven Stufe abhängig von der Batteriespannung

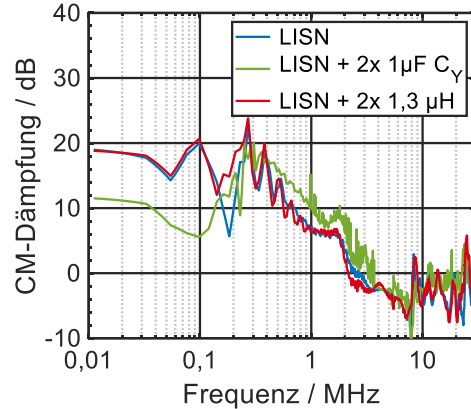


Bild 14: Vergleich der Gleichtakt-Filterdämpfung der aktiven Stufe abhängig von der Impedanz der LISN

3.3 Bewertung der Abhängigkeiten

Die vorangegangenen Untersuchungen lassen sich anschaulich mit Hilfe eines Netzdiagramms darstellen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden für Inverterparameter und äußere Parameter in einem separaten Diagramm zusammengefasst, wobei eine Skalierung von 0 – „nicht sensitiv“ bis 4 – „sehr stark sensitiv“ vorgenommen wurde. Die Unterteilung wurde dabei anhand einer, über mehrere harmonische gleichbleibenden, Änderung der Dämpfung im Bereich von 3 – 5 dB für „leicht sensitiv“, 6 – 10 dB für „mittel sensitiv“, 10 – 15 dB für „stark sensitiv“ und über 16 dB für „sehr stark sensitiv“ definiert. Betrachtet für die Inverterparameter zeigt Bild 15, dass vor allem der Modulationsgrad und die Taktfrequenz f_c sich stark auf das Filterverhalten auswirken. Dieser Effekt sollte bei der Auslegung eines hybriden Gleichtaktfilters demnach genau betrachtet werden. Der Vergleich der äußeren Parameter in Bild 16 stellt heraus, dass der größte Einfluss auf die Filterdämpfung unterhalb 150 kHz durch die Impedanz der Batterieseite verursacht wird. Die übrigen Parameter weisen nur moderate Einflüsse auf, durch angemessene Dimensionierung des aktiven Filters lässt sich dieser Effekt kompensieren.

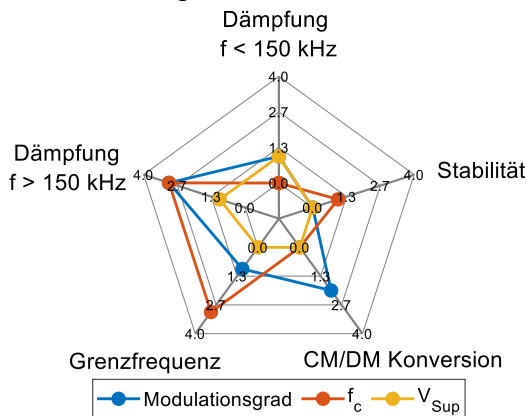


Bild 15: Übersicht der Sensitivität des Hybridfilters gegenüber den Inverterparametern

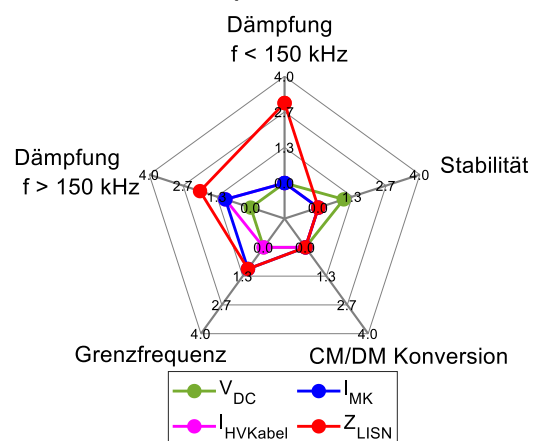


Bild 16: Übersicht der Sensitivität des Hybridfilters gegenüber den äußeren Parametern

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Arbeit zeigt eine Möglichkeit zur Sensitivitätsbetrachtung der Einflussparameter auf ein hybrides Gleichtaktfilter auf. Anhand einer Messreihe können grundlegende Einflüsse auf die Filterdämpfung dargestellt werden. Im Rahmen der betrachteten Parameter kann gezeigt werden, dass das untersuchte Hybridfilter unter Variationen stabil funktioniert. Die Erhöhung des Modulationsgrades zeigt, dass die vorgestellte Filtertopologie durch die Erfassung von CM und DM Anteilen der Störspannung anfällig für Veränderungen der Gegentaktkomponente reagiert. Durch Anpassung des Auskoppelpfad (Sense) lässt sich diese Problematik jedoch beheben. Gegenüber weiteren Inverterparametern bzw. äußeren Einflussparametern wird die Sensitivität ermittelt und somit starke und weniger starke Einflussparameter identifiziert. Mit der Darstellung als Netzdiagramm lässt sich übersichtlich zeigen, welche Parameter bei der Entwicklung genau betrachtet werden sollten und welche Parameter für den späteren Betrieb eine eher untergeordnete Rolle spielen.

Mit Hilfe der identifizierten Parameter kann im nächsten Schritt die Dimensionierung der aktiven Filterstufe überarbeitet und robuster gegenüber kritischen Parametern ausgelegt werden.

Literatur

- [1] D. Shin, S. Kim, G. Jeong, J. Park, K. Han und J. Kim: Analysis and Design Guide of Active EMI Filter in a Compact Package for Reduction of Common-Mode Conducted Emissions, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 57, No. 4, August 2015, pp. 660-671, DOI: 10.1109/TEMC.2015.2401001
- [2] W. Chen, W. Zhang, X. Yang, Z. Sheng and Z. Wang: An Experimental Study of Common- and Differential-Mode Active EMI Filter Compensation Characteristics, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No. 3, August 2009, pp. 683-691, DOI: 10.1109/TEMC.2009.2021258
- [3] S. Wang, Y. Mailliet, F. Wang, D. Boroyevich und R. Burgos: Investigation of Hybrid EMI Filters for Common-Mode EMI Suppression in a Motor Drive System, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, No. 4, April 2010, pp. 1034-1045, DOI: 10.1109/TPEL.2009.2033601
- [4] R. Goswami, S. Wang, E. Solodovnik und K. Karimi: Differential Mode Active EMI Filter Design for a Boost Power Factor Correction AC/DC Converter, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 7, No. 1, March 2019, pp. 576-590, DOI: 10.1109/JESTPE.2018.2839734
- [5] D. Müller, K. Spanos, M. Beltle und S. Tenbohlen: Design of a Hybrid Common – Mode EMI Filter for Traction Inverters in Electrical Vehicles, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM), Nürnberg, 2019, pp. 638-642
- [6] B. Arndt, P. Olbrich, H. Reindl und C. Waldera: Breitbandiger aktiver Hybrid-Filter für Kfz-Anwendungen, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Düsseldorf, 2018, pp. 432-438
- [7] A. Amaducci: Design of a Wide Bandwidth Active Filter for Common Mode EMI suppression in Automotive Systems, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), Washington DC, USA, 2017, pp. 612-618, DOI: 10.1109/IEMC.2017.8077941
- [8] Y. Song und S. Sul: Generalization of Active Filters for EMI Reduction and Harmonics Compensation, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 2, March/April 2006, pp. 545-551, DOI: 10.1109/TIA.2006.870030
- [9] P. Hillenbrand, S. Tenbohlen, C. Keller und K. Spanos: Understanding Conducted Emissions from a Automotive Inverter Using a Common-Mode Model, IEEE and EMC Europe Joint Conference, Dresden, 2015, pp. 685-690, DOI: 10.1109/IEMC.2015.7256246
- [10] B.G. Kim, F.P. Tredeau und Z.M. Salameh: Performance Evaluation of Lithium Polymer Batteries for Use in Electric Vehicles, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), China, 2008, DOI: 10.1109/VPPC.2008.4677513