

Erweiterung und Fahrzeugverifikation eines aktiven Hybrid-Filter-Konzeptes zur Reduktion transienter Gleichtaktstörungen ab der Schaltfrequenz eines HV Inverters

Dr. Peter Olbrich, AVL SFR GmbH, Im Gewerbepark B29, Regensburg, Deutschland
 Dr. Bastian, Arndt, AVL SFR, Im Gewerbepark B29, Regensburg, Deutschland
 Dipl.-Ing. Hartwig Reindl, AVL SFR, Im Gewerbepark B29, Regensburg, Deutschland
 M. Sc. Christian Waldera, VW, Brieffach 1730, Wolfsburg, Deutschland

1. Einleitung

Im Bereich der Entwicklung automobiler Filtersysteme zeigt das Konzept der aktiven Filterung zur Reduzierung leitungsgebundener elektromagnetischer Störungen zunehmendes Interesse in der Fachwelt [1-3]. Dies liegt zum einen daran, dass in Hochvolt-KFZ-Anwendungen aus Sicherheitsgründen Obergrenzen für den Einsatz kapazitiver Elemente zum Ableiten von Gleichtaktstörungen gelten. Um die Dämpfungsanforderung und damit die definierten Limits einzuhalten, muss hierbei verstärkt auf induktive Längselemente zurückgegriffen werden. Aus Kosten-, Volumen- und Gewichtsgründen ist diese Art der Kompensation in den meisten Anwendungen nur bedingt zielführend. Zum anderen ist auch die Miniaturisierung, einhergehend mit der Integrierbarkeit der Filtermaßnahme, ein wichtiger Aspekt und somit eine interessante Eigenschaft des aktiven Filterkonzeptes. Im speziellen wurde gezeigt, dass der aktive Hybridfilter vielversprechende Ergebnisse im Vergleich zu einem klassisch passiven Filtersystem, ausgelegt auf gleiche Spannungslage und Leistungsklasse, liefert [4].

Im Folgenden wird ein Konzept des aktiven hybriden Gleichtaktfilters, welches auf eine reale Anwendung in einem HV Elektrofahrzeug (400V/80kW) ausgelegt ist, vorgestellt werden. Hierbei soll gezeigt werden, dass eine hohe GesamtfILTERleistung auf vergleichsweise kleinem Bauraum realisiert werden kann. Ein ausschlaggebender Grund hierfür ist mitunter, dass es durch die aktive Reduzierung des Störstroms ermöglicht wird, die induktiven Komponenten des nachgeschalteten passiven Filters entsprechend auf den

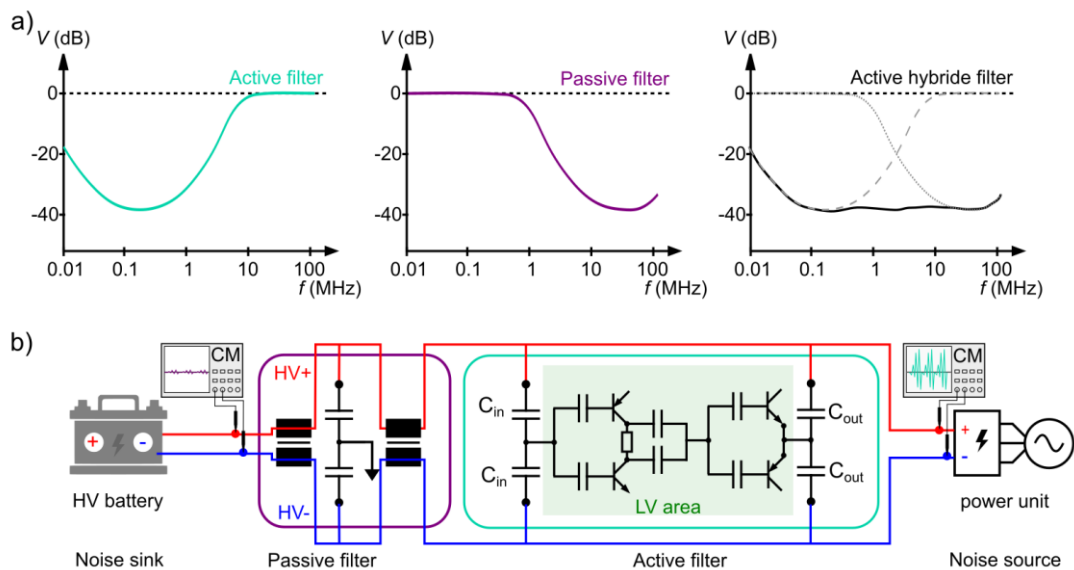


Abbildung 1: a) schematischer Frequenzgang der Einfügedämpfung (links: aktiv, mitte: passiv, rechts: hybrid), b) Darstellung der Filtertopologie des hybriden Filters relativ zur Störquelle und -senke und den bipolaren Aufbau des aktiven hybriden Gleichtaktfilters

reduzierten Störstroms auszulegen. Auch in Hinblick auf die Integrierbarkeit in die Leistungselektronik und Adaption an das spezielle Impedanzverhältnis im Fahrzeug ist das aktive System von Interesse.

2. Aktiver Hybrider Gleichtaktfilter

Bei dem hybriden Konzept handelt es sich um eine Kombination aus einem aktiven und einem passiven Filterteil. Die in Abbildung 1 a) vereinfacht skizzierten frequenzabhängigen Dämpfungseigenschaften (aktiv, passiv und hybrid) wurden simulatorisch ihren Frequenzbereichen (aktiv: 0.01 bis 2 MHz, passiv: 2 bis 100 MHz) angepasst und auf die Impedanzverhältnisse des Anwendungsfalles abgestimmt. Die Filtertopologie des hybriden Filters, sowie dessen Aufteilung in aktiven und passiven Gleichtaktfilter, relativ zu Störquelle und –senke, ist in Abbildung 1b) skizziert.

Im aktiven Konzept wird prinzipiell eine Störspannung gemessen, invertiert, verstärkt und dann als Gegenstrom in den HV Bereich zurückgekoppelt. Durch die Ein- und Auskoppelkondensatoren, C_{in} und C_{out} , ist der verarbeitende Schaltungsteil (in Abb. 1b grün hervorgehoben) vom umliegenden HV Bereich galvanisch abgetrennt und daher als Niedervolt Bereich zu betrachten. Zu erkennen ist hierin der bipolare Aufbau (NPN und PNP Transistoren) des Vorverstärkers und der Leistungsendstufe. Diese Eigenschaft erlaubt schnelle transiente Pulse bis in den MHz Bereich zu kompensieren, erfordert jedoch Reaktionszeiten im Bereich mehrerer Nanosekunden. Die durch die Gesamtlaufzeit entstehende Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zwischen gemessenem und zurückgeführtem Signal ist maßgeblich für die Bestimmung der oberen Arbeitsfrequenz f_{max} und wird der Auslegung als Designziel zugrunde gelegt. Um zum Beispiel ein Signal mit $f = 1$ MHz noch um 20 dB dämpfen zu können muss ein maximales $\Delta\varphi_{@1MHz}$ von ca. 6° erreicht werden, was einem zeitlichen Versatz von $\Delta t_{max} = \Delta\varphi / (f_{max} \times 360^\circ) = 17$ ns entspricht.

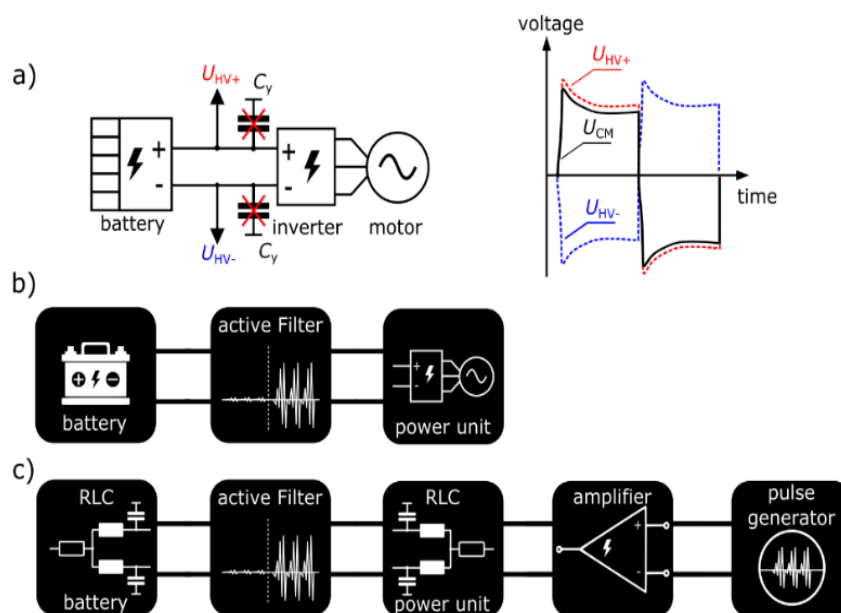


Abbildung 2: a) Messung des ungefilterten Gleichtaktsignals U_{cm} , b) Symbolhafte Darstellung der Fahrzeugelektronik, c) Symbolhafte Darstellung des Ersatzmodells zum Vergleich der Simulationsergebnisse mit Labormessungen

Wie einleitend schon angesprochen lässt sich der passive Filterteil, abgebildet in Abb. 1b), durch den deutlich aktiv reduzierten Gleichtaktstrom kompakter dimensionieren bzw. an den Frequenzbereich > 2 MHz anpassen. Durch den niedrigeren Sättigungsstrom ermöglicht dies einen flexibleren Einsatz hochpermeabler Kerne bzw. Hochfrequenzferrite.

3. Simulation und Verifikation im Fahrzeug

Im Folgenden werden die Resultate zur Erweiterung des unteren Arbeitsbereiches des aktiven Filters bis zur Schaltfrequenz des HV Inverters gezeigt. Die Ergebnisse der simulatorischen Auslegung wurden durch reale Messungen in einem Hochvolt-Elektrofahrzeug unter Last verifiziert. Hierbei konnte eine signifikante Dämpfung der Gleichtaktstörung ab der Arbeitsfrequenz des Inverters von 10 kHz von über 50 dB erzielt werden. Zugleich konnte die Gleichtaktspannung im Zeitbereich von 100 Vpp auf 0.6 Vpp reduziert werden. Dies ist insofern bemerkenswert, da der benötigte Bauraum des hybriden Filters lediglich $0,13 \text{ dm}^3$ beträgt.

3.1 Fahrzeugeigenschaften und Simulationsumgebung

Zur Vermessung der Filtereigenschaften stand ein Elektrofahrzeug ($U_{\text{HV}} = 400 \text{ V}$), mit aus der Leistungselektronik entfernten Y-Kondensatoren, zur Verfügung. Neben Messungen der ungefilterten Gleichtaktstörspannung U_{cm} , siehe Abbildung 2a), unter Last wurden Impedanzanalysen der Störsenke (HV Batterie) und Störquelle (Leistungs-elektronik – Motor) durchgeführt. Der gesamte Leistungspfad wurde im Simulator nachgebildet und mittels eines generierten Störpulses mit den Messungen korreliert, siehe Abbildung 2b) und 2c). Die Auslegung des aktiven Hybridfilters wurde in dieser Simulationsumgebung durchgeführt und somit an die Impedanzverhältnisse im Fahrzeug angepasst. Durch Messung und Simulation zeigt sich, dass zum effektiven Filtern der hochfrequenten Komponenten auch die Gleichtaktstörungen, induziert durch die Schaltfrequenz $f_s = 10 \text{ kHz}$, unterdrückt werden müssen. Im Zuge dessen musste unter anderem auch die Schaltungstopologie abgeändert und die Leistungsfähigkeit der Transistoren erhöht, sowie ein ausreichendes Kühlkonzept entwickelt werden. Die Werte für die Ein- und Auskoppelkondensatoren wurden mit $C_{\text{in}} = 27 \text{ nF}$ und $C_{\text{out}} = 270 \text{ nF}$ bestimmt. Für erste Messungen des Filters und zur Bestätigung der Simulationsergebnisse wurde das

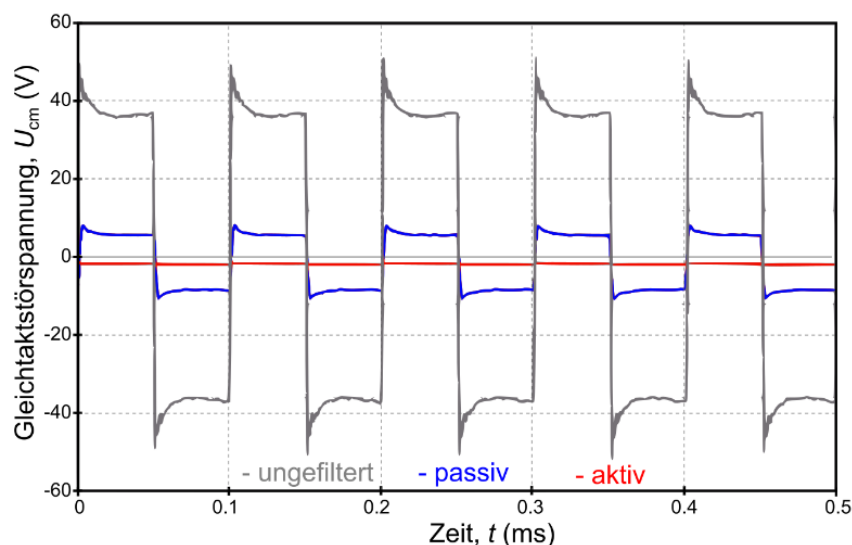


Abbildung 3: Im Fahrzeug unter Last gemessene Gleichtaktstörung (grau) ohne Filter, (blau) nur mit passivem Filter, (rot) mit passivem und aktivem Filter

Simulationssetup auf Basis von RLC Ersatzmodellen nachgebaut. Ein entsprechender Gleichtaktstörpuls wurde mittels eines Leistungsverstärkers in Kombination mit einem Pulsgenerator generiert und eingepreßt.

3.2 Validierung der Filtereigenschaften im Fahrzeug

Der Hauptaspekt des Projektes liegt jedoch darin, die Funktion und Filterwirkung im Fahrzeug zu demonstrieren. Hierzu wurde das Gehäuse der Leistungselektronik modifiziert, um den aktiven Hybridfilter an das HV-System zu kontaktieren, sowie einen messtechnischen Zugang zu den HV Leitungen vor und nach dem Filter zu schaffen. Die zeitlich korrelierten Spannungsmessungen von $U_{HV+/-}$ relativ zum Massepotential wurden mit einem Oszilloskop (HD Modus: Bandbreite 100 MHz, Auflösung 13 Bit) erfasst. Somit konnte Messgenauigkeit mit einer Auflösung ~ 78 dB relativ zum Gesamtmessbereich erreicht werden. Die Messungen wurden im Fahrzeug unter Last mit angeschalteten Verbrauchern durchgeführt. Mittels Mathematikfunktion wurden aus den erfassten Daten die Gleich- und Gegentaktstörspannung vor und hinter der Filtermaßnahme berechnet.

Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der berechneten Gleichtaktstörspannung $U_{cm} = (U_{HV+} - U_{HV-})/2$ im ungefilterten (grau), rein passiv (blau) und aktiv (rot) gefilterten System. Hier bildet sich eindeutig die dominierende Schaltfrequenz mit Fundamentaler bei 10 kHz ab. Diese liefert einen dominierenden Beitrag zum Gleichtaktsignal, wodurch der Arbeitsbereich des aktiven Filters bis hin zu dieser Frequenz erweitert werden musste. Während die Wirkung des aktiven Hybridfilters im Zeitbereich eindeutig veranschaulicht werden kann, soll zur genaueren Betrachtung das frequenzabhängige Verhalten herangezogen werden.

Die ausgewerteten Spektren von U_{cm} im ungefilterten, passiv gefilterten und im passiv/aktiv gefilterten Fahrzeug werden in Abbildung 4 gegenübergestellt. Wird zunächst die Wirkung bei niedrigen Frequenzen betrachtet, z.B. $f = 30$ kHz, zeigt sich das dominierende Verhalten der aktiven (35 dB μ V) gegenüber der passiven (15 dB μ V) Lösung. In Summe wird hier der Störpegel durch den hybriden Filter um 50 dB μ V gesenkt. Auch die eingangs beschriebene Aufteilung der Filterwirkung im Frequenzbereich lässt sich eindeutig erkennen und bis zur Rauschgrenze (50 dB μ V) bei ca. 1 MHz verfolgen. Während die sich Dämpfung des aktiven Filters auf 20 dB reduziert, steigt die des

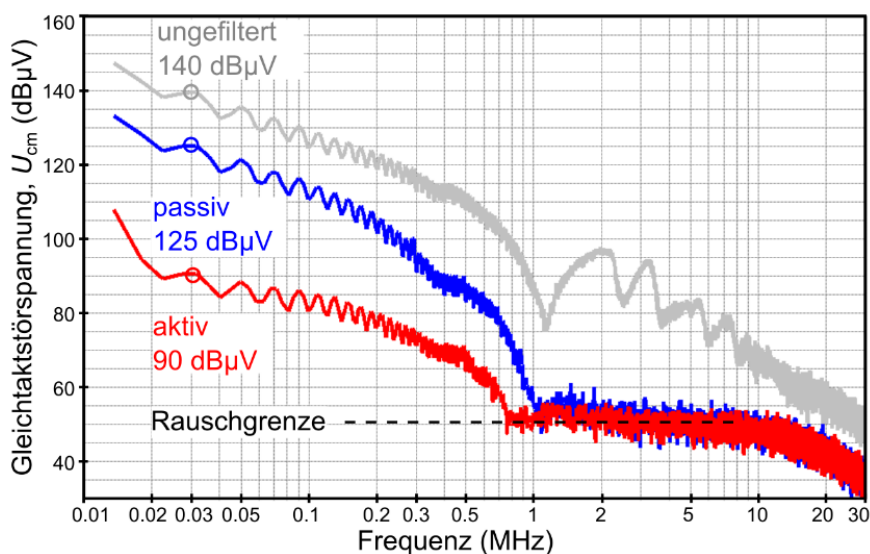


Abbildung 4: FFT der gemessenen Gleichtaktspannung auf Abbildung 1 (grau) ohne Filter, (blau) nur mit passivem Filter, (rot) mit passivem und aktivem Filter

passiven Filters auf 30 dB an. Mit dem relativ kleinen Aufbau des aktiven Hybridfilters von ca. 86 x 78 x 20 mm³ wurde eine Gesamtdämpfung im niederfrequenten Bereich von bis zu 50dB erzielt. Beeindruckend ist hierbei die Wirkung des aktiven Filterteils von ca. 35 dB bei 30 kHz (vergleiche Abb. 4 blaue und rote Kurven).

4. Zusammenfassung

Die Messungen demonstrieren eindeutig, dass das Konzept des aktiven Hybridfilters auf eine reale Anwendung in einem HV Elektrofahrzeug (400 V / 80 kW) angewendet und ausgelegt werden kann. Dies stellt eine Neuerung für die EMV Filtertechnik im automobilen Bereich dar. Die hierbei erreichte GesamtfILTERwirkung von knapp 50 dB wurde in einem Volumen von ca. 0.13 dm³ realisiert. Hervorzuheben ist hierbei auch, dass die simulatorische Auslegung des Filters, wie auch die messtechnische Erfassung der Filterwirkung in der Impedanzumgebung des Fahrzeugs durchgeführt wurde und somit eine realistische Bewertung stattfinden kann. Weiterhin ermöglicht die aktive Lösung neben ihrer Integrierbarkeit in die Leistungselektronik auch eine einfache schaltungstechnische Anpassung an geänderte Fahrzeugparameter, wie zum Beispiel Impedanzverhältnisse der Störquelle und –senke.

Literaturangaben

- [1] A. Nasiri, „Different Topologies of Active EMI Ripple Filters for Automotive DCDC Converters,“ in Vehicle Power and Propulsion, 2005
- [2] W. Chen, W. Zhang, X. Yang, Z. Sheng und Z. Wang, „An Experimental Study of Common- and Differential-Mode Active EMI Filter Compensation Characteristics“, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. **51**, no. 3, 2009.
- [3] C. Waldera, M. Obholz, A. Ruta, B. Arndt, P. Olbrich, H. Reindl, H. Hirsch, „Aktive EMI-Filter zur Reduktion von CM-Störimpulsen auf den HV-Leitungen von Elektrofahrzeugen“, GMM-Fachtagung, 2017
- [4] B. Arndt, P. Olbrich, H. Reindl, C. Waldera, „Breitbandiger aktiver Hybrid-Filter für Kfz-Anwendungen“, In: emv: Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 2018, S. 432-438