

# Breitbandiger aktiver Hybrid-Filter für Kfz-Anwendungen

Dr. Bastian, Arndt, AVL, Im Gewerbepark B29, 93053 Regensburg, Deutschland, [bastian.arndt@avl.com](mailto:bastian.arndt@avl.com)

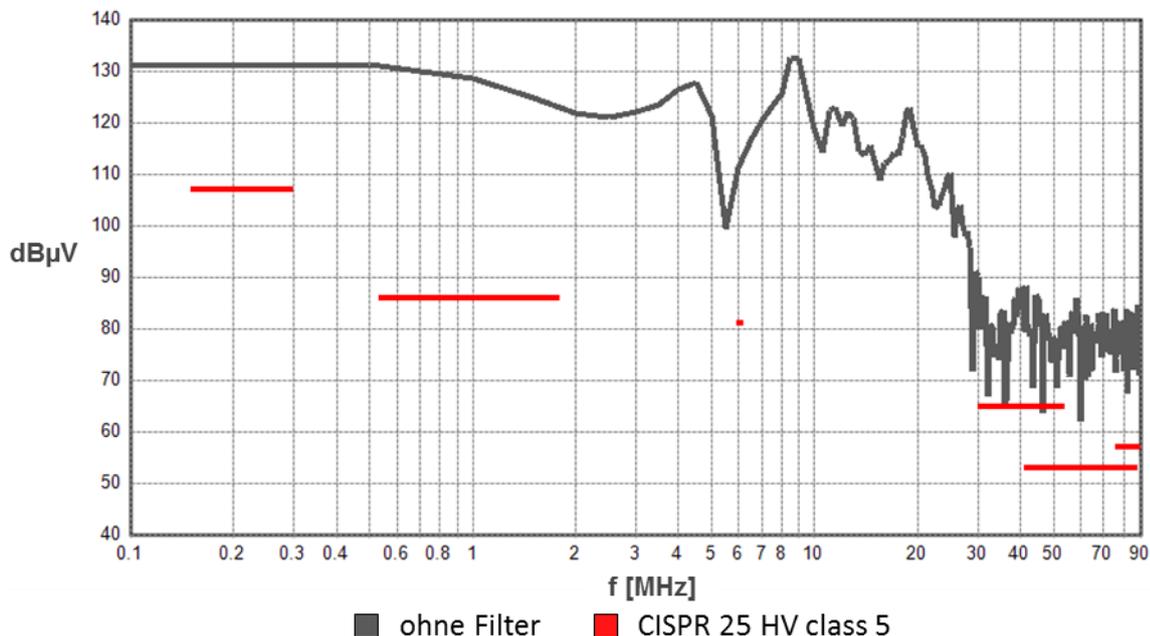
Dr. Peter Olbrich, AVL, Im Gewerbepark B29, 93053 Regensburg, Deutschland, [peter.olbrich@avl.com](mailto:peter.olbrich@avl.com)

Dipl.-Ing. Hartwig Reindl, AVL, Im Gewerbepark B29, 93053 Regensburg, Deutschland, [hartwig.reindl@avl.com](mailto:hartwig.reindl@avl.com)

M. Sc. Christian Waldera, VW, Brieffach 1730, 38436 Wolfsburg, Deutschland, [christian.waldera@volkswagen.de](mailto:christian.waldera@volkswagen.de)

## 1 Einleitung

Durch den Betrieb von elektronischen Komponenten in Elektrofahrzeugen können erhebliche EMV-Störungen entstehen. Bild 1 zeigt exemplarisch das leitungsgebundene Störspektrum am positiven HV-Batteriepol eines 250 V, 30 kW Hybridfahrzeugs unter Last (schwarze Kurve). Um mit diesem System aktuelle Emissionsgrenzwerte nach CISPR25 HV [7] (rote Markierung) zu erfüllen muss mit erheblichem Aufwand gefiltert werden.



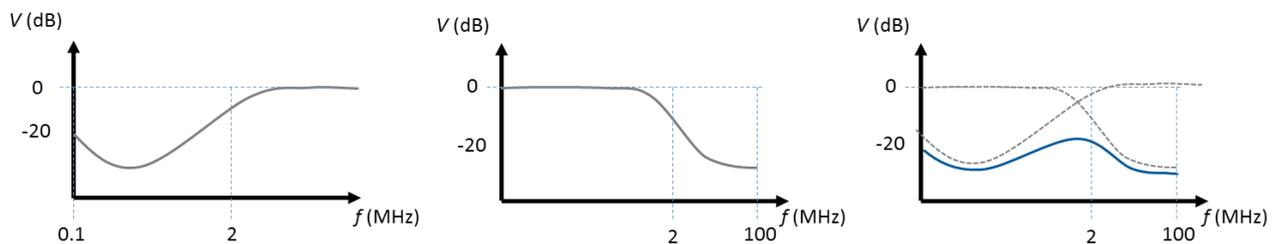
**Bild 1:** Exemplarische Störung an einer HV-Leitung eines 250 V Hybridfahrzeug unter Last

EMV-Filter auf Basis von induktiven und kapazitiven Bauelementen weisen im Hochvoltbereich deutliche Einschränkungen für automobiler Anwendungen auf. Bei kapazitiven Bauelementen steigt typischerweise die Bauteilgröße mit der geforderten Spannungsfestigkeit quadratisch an. Für Kfz-Hochvoltssysteme können Isolationsspannungen bis 3000 V gefordert werden, was für übliche Bauteilwerte schwer bzw. nur kostenintensiv umsetzbar ist. Für ausreichende Filterleistungen im unteren

Frequenzbereich kleiner 1 MHz werden Bauteilgrößen notwendig, die technisch kaum umsetzbar sind. Zusätzlich sind Filtertopologien mit Y-Kondensatoren aufgrund von Sicherheitsvorschriften stark in den Kapazitätswerten limitiert und damit für den MHz-Bereich (AM) kaum anwendbar.

Magnetischen Bauteilen werden aufgrund der hohen Leistungen und Ströme groß, schwer und teuer.

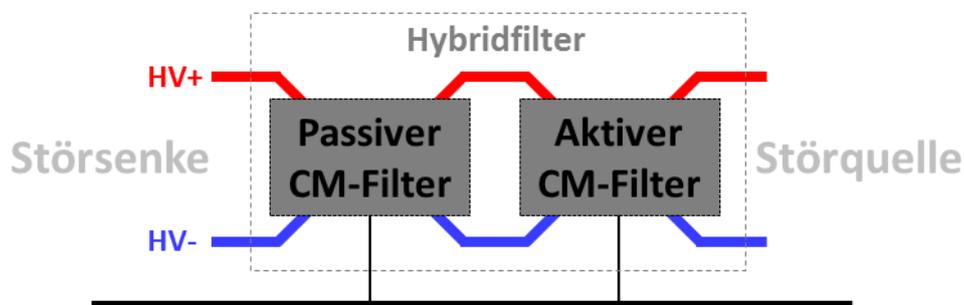
Abhilfe können aktive Filterschaltungen schaffen. Diese sind jedoch für höhere Frequenzen kaum mehr anwendbar. In diesem Beitrag wird daher eine Filterstrategie vorgestellt, welche mithilfe einer Kombination aus aktiven und passiven Filterstrukturen die die Vorteile beider Topologien vereint. Hierbei wird ein hybrider Filter aufgezeigt, der aus aufeinander abgestimmten Filtern besteht. Bild 2 skizziert eine angestrebte Aufteilung zwischen einem aktiven, kapazitiven Common-Mode-Filter (CM) für den Bereich 150 kHz bis 2 MHz und einem passiven Filterteil für den Bereich 2 MHz bis 100 MHz. Die Auslegung des hybriden Filters erfolgt hierbei mittels Simulation, die Wirksamkeit wird anhand eines Labormusters evaluiert und nachgewiesen.



**Bild 2:** Einfügedämpfung (links: aktiv, mitte: passiv, rechts: hybrid)

## 2 Filtertopologie

Der vorgestellte Filter wurde für die Anwendung an einem 75 kW / 400 V Wechselrichter konzipiert. Zur Aufteilung der Filterbereiche wurde der hybride Filter in zwei funktionale Blöcke aufgeteilt (Bild 3). Hierbei erweitert der passive Filterteil den Frequenzbereich des aktiven Filters für höhere Frequenzen und schützt diesen vor transienten Störpulsen aus dem HV-Netz. Der aktive Filter verringert zusätzlich zu seiner Gleichtaktfilterleistung die Störströme in den verwendeten passiven, magnetischen Filterelementen und erlaubt daher deutlich kleinere und kostengünstigere Bauelemente im passiven Filterteil.



**Bild 3:** Aufteilung des hybriden Filters in einen aktiven und einen passiven Teil

## 2.1 Aktiver Filter

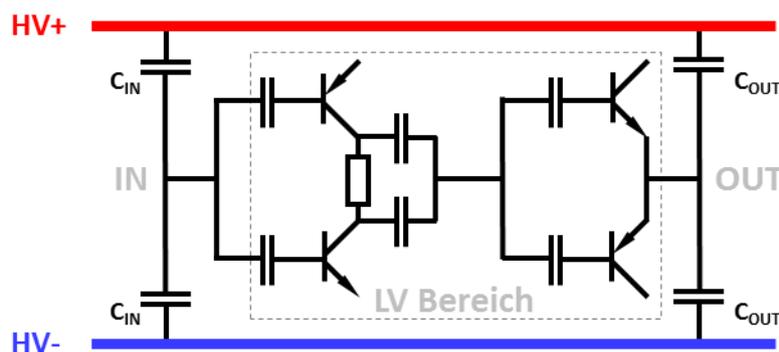
Die grundsätzliche Funktion eines aktiven Filters ist das Erfassen und Kompensieren eines Störsignals. Die erste Veröffentlichung, in der die allgemeinen Topologien von aktiven EMV Filtern zusammengefasst werden, wurde 1988 publiziert [2]. Es wird darin die grundsätzliche Arbeitsweise beschrieben, wie durch eine Rückführung eine Kapazität oder Induktivität aktiv vergrößert werden kann. Dadurch können Platz, Gewicht und Kosten gespart werden.

Zur Erfassung des Störsignals kann entweder eine Störspannung oder ein Störstrom gemessen werden. Bild [4] zeigt den grundsätzlichen Aufbau des aktiven Filterteils. In der hier beschriebenen Variante wird die Störspannung kapazitiv aus dem Hochvoltbereich ausgekoppelt. Das Störsignal durchläuft einen Bandpassfilter und wird als invertierter Gegenstrom über einen Leistungsverstärker kapazitiv in den Hochvoltbereich rückgekoppelt um die Störung zu kompensieren. Hierbei wird eine kleine, präzise Verstärkung benötigt. Bei idealer Verstärkung und Signallaufzeit in der Schaltung würde die Störung vollständig kompensiert werden. Unter realen Bedingungen ist dies jedoch nicht zu erreichen, da Ungenauigkeiten in der Verstärkung und der Phase die Filterwirkung reduzieren und im schlimmsten Fall sogar neue Störungen erzeugen.

$$t_{delay} = \frac{1}{f_{max}} \cdot \frac{\Delta\varphi}{360^\circ} \quad (1)$$

$$t_{delay\ 2\ MHz} = \frac{1}{2\ MHz} \cdot \frac{5^\circ}{360^\circ} = 27\ ns$$

Insbesondere hat die Signallaufzeit (1) einen signifikanten Einfluss auf die Filterleistung. Setzt man bei der angestrebten Grenzfrequenz  $f_{max}$  des aktiven Filters von 2 MHz eine maximal zulässige Phasenverschiebung  $\Delta\varphi$  von  $5^\circ$  als Designziel an, so ergibt sich daraus eine Signallaufzeit  $t_{delay}$  in der gesamten Schaltung von kleiner 27 ns.

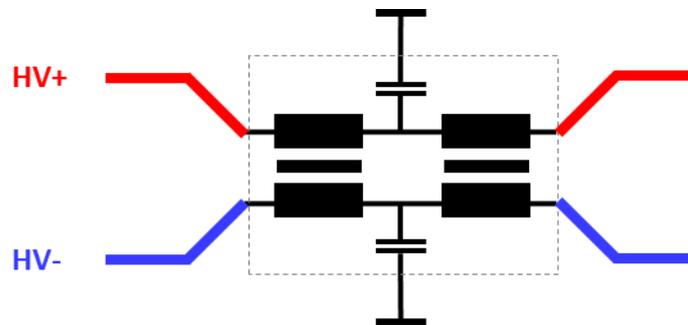


**Bild 4:** Bipolarer Aufbau des aktiven Filterteils

Um eine ausreichende Filterwirkung für transiente Vorgänge des aktiven Filters zu gewährleisten muss die Filterschaltung daher Reaktionszeiten im Bereich von Nanosekunden aufweisen. Dies ist mit konventionellen Verstärkerschaltungen und Operationsverstärkern nicht möglich. Die im Beitrag vorgestellte aktive Filtertopologie wird daher mithilfe von Bipolarbauteilen realisiert [6]. Der Aufbau folgt hierbei größtenteils der in [5] beschriebenen Struktur.

## 2.2 Passiver Filter

Bild 5 beschreibt den grundsätzlichen Aufbau des verwendeten passiven Filterteils. Dieser wurde symmetrisch und mehrstufig auf eine ausreichende Filterwirkung im Frequenzbereich größer 2 MHz ausgelegt.



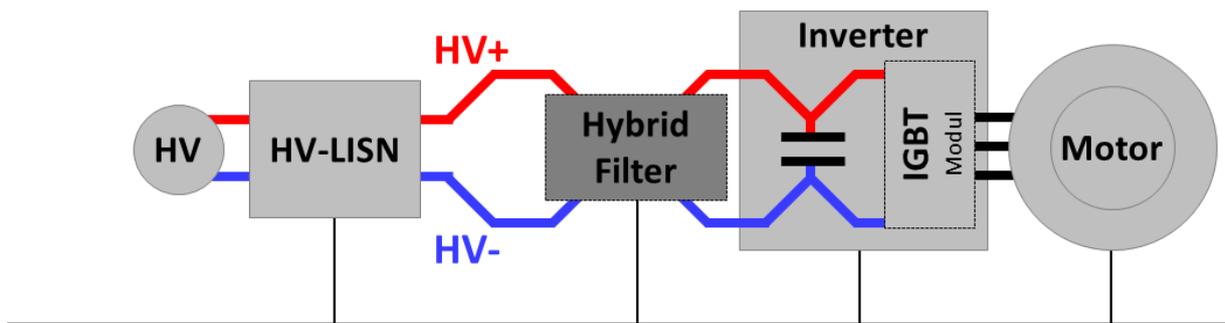
**Bild 5:** Mehrstufiger Aufbau des passiven Filterteils

Bei den magnetischen Bauelementen wurden nanokristalline, weichmagnetische Ringkerne mit hoher Permeabilität verwendet. Deren Einsatz ist aufgrund ihrer geringen Sättigungsströme in der angestrebten Leistungsklasse von 75 kW / 400 V üblicherweise kritisch. Durch die vorgelagerte Verwendung des aktiven Filters ergeben sich jedoch deutlich verringerte Gleichtaktströme in den magnetischen Bauelementen, so dass eine Verwendung möglich wird.

## 3 Verifikation der Filterleistung

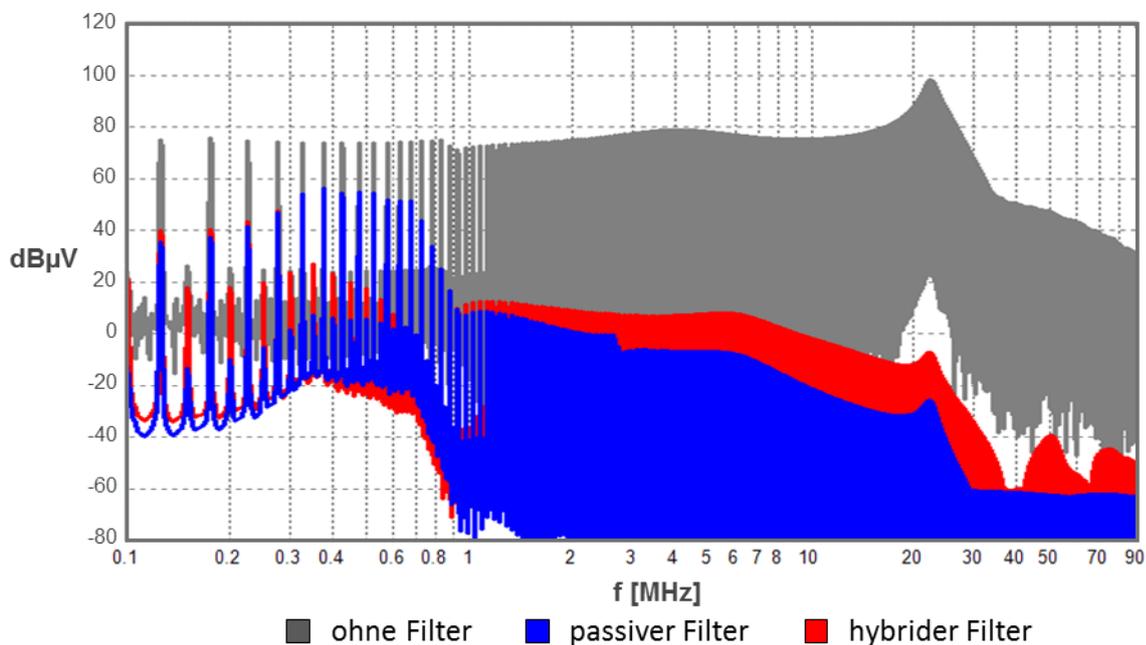
### 3.1 Simulatorische Verifikation

In einem ersten Schritt wurden die Eigenschaften des hybriden Filters mittels Simulation ermittelt und das Design der Filterschaltung stellenweise angepasst. Die Auslegung des aktiven Filterteiles wurde wie in [5] beschrieben mittels Schaltungssimulation durchgeführt. Hierbei war die Zielsetzung zur Schaltungsauslegung eine Einfügedämpfung von mindestens 20 dB. Zur Schaltungssimulation wurde ein hierarchischer Simulationsansatz mittels LTspice gewählt.



**Bild 6:** Blockschaltbild des verwendeten Messaufbaus

Bild 6 stellt die verwendete Bewertungsgrundlage und den Messaufbau für leitungsgebundene Störungen nach CISPR25 mit einem 400 V Inverter dar. Im Gegensatz zur normativen Messmethode mittels kapazitiver Auskopplung aus der LISN wurde die Störspannung auf den HV-Leitungen zwischen DUT und LISN verwendet, um die Filterleistung für Frequenzen kleiner 150 kHz bewerten zu können. Die in Bild 4 dargestellten Ein- und Ausgangskapazitäten wurden hierbei mit  $C_{IN} = 10 \text{ nF}$  und  $C_{OUT} = 135 \text{ nF}$  bedatet. Bild 7 zeigt die simulatorisch ermittelte Gleichtaktstörspannung des Systems. In grau ist hierbei das ungefilterte System dargestellt. In rot ist der Hybridfilter aufgetragen. Die Simulationsanalyse zeigt ein deutliches Entstörpotential. Die gewünschte Einfügedämpfung von 20 dB für den aktiven Filterteil kann laut Simulation gut erreicht werden. Die blaue Kurve zeigt die simulierte Gleichtaktstörspannung mit einem rein passiven Filter. Im Vergleich zum aktiven Filter mussten die Kondensatoren  $C_{OUT}$  um ein 50faches auf  $C_{OUT} = 6.75 \text{ }\mu\text{F}$  vergrößert werden, um ähnliche Filterleistungen zu erhalten. In einem realen HV-System entsprechende Filterkondensatoren aus Sicherheitsgründen nicht verbaut werden.

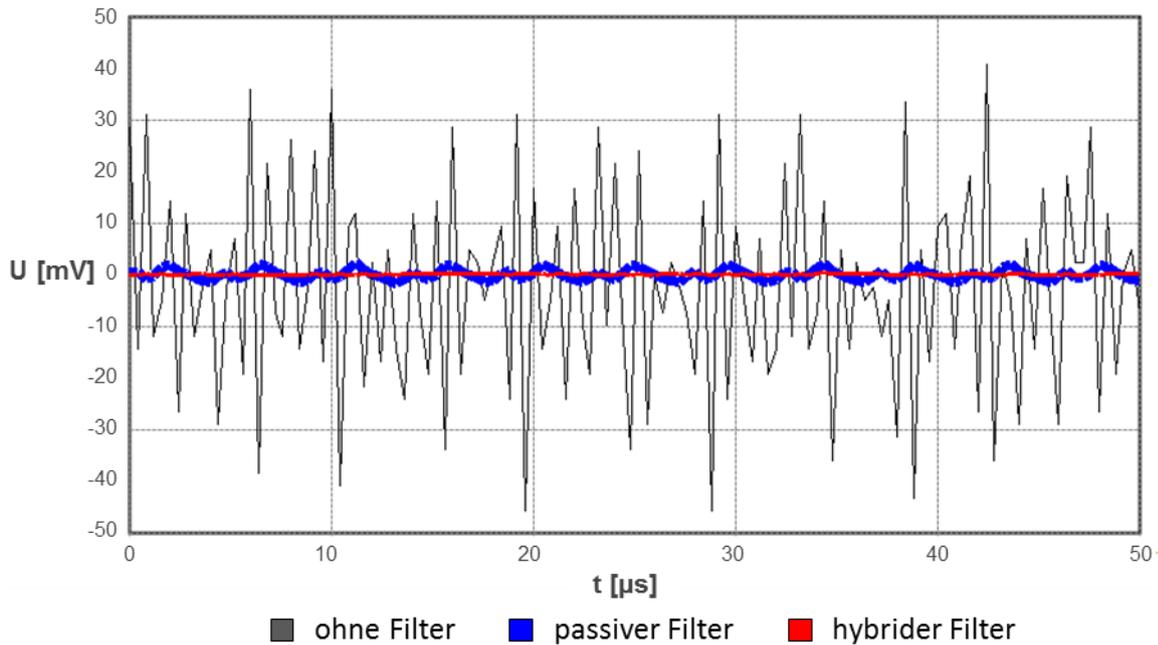


**Bild 7:** Simulationsergebnisse der Filterleistung im Frequenzbereich

### 3.2 Messtechnische Verifikation

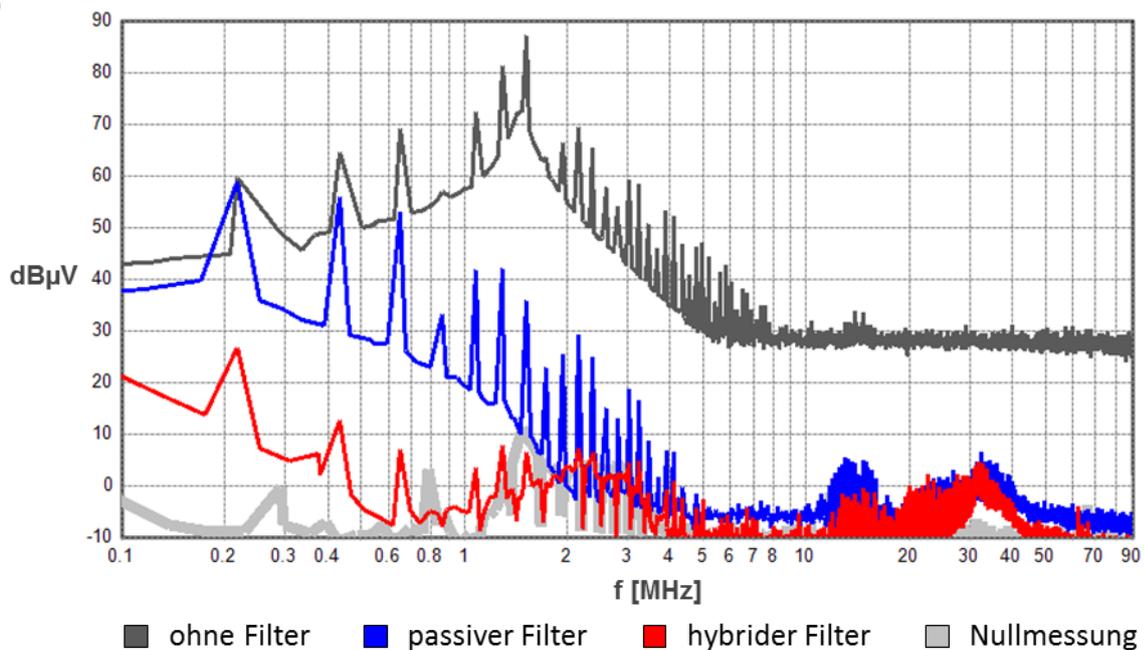
Zur Verifikation der elektrischen Eigenschaften der aktiven Filterschaltung und der kombinierten Filterleistung wurde an einem Labordemonstrator die Filterwirkung des hybriden Filters vermessen. Hierzu wurde ein vereinfachter Wechselrichter auf Basis eines Infineon Hybridpack 2 aufgebaut. Die Labormessung folgt hierbei der Darstellung aus Bild 6 und wurde bei HV-Spannung von 380 V durchgeführt. In Bild 8 wird ein Ausschnitt der gemessenen Common-Mode (CM) Störspannung an HV dargestellt. In schwarz ist der Spannungsverlauf des ungefilterten Systems dargestellt. Die blaue Kurve zeigt das Entstörpotential des passiven Filterteils bei abgetrennten aktiven Filtern. Die rote Kurve zeigt die Störspannung des hybriden Filters mit passivem und zugeschaltetem

aktivem Schaltungsteil. Die Spannungspegel sind hierbei so gering, dass in der linearen Darstellung keine Spannungsrippel mehr erkennbar sind.



**Bild 8:** Ausschnitt der gemessenen Common-Mode (CM) Störspannung an HV im Zeitbereich

In Bild 9 sind die resultierenden Pegel der Common-Mode (CM) Spannungspegel an HV im Frequenzbereich dargestellt. Hier wird die Verteilung der Filterleistung über Frequenz für den passiven und den aktiven Filter deutlich. Der passive Teil (blau) zeigt ab 2 MHz ein gutes Entstörpotenzial im Vergleich zum ungefilterten System (schwarz). Bei zugeschaltetem aktivem Schaltungsteil (rot) wird auch der Frequenzbereich kleiner 2 MHz gut entstört.



**Bild 9:** Gemessene Common-Mode (CM) Störspannung an HV im Frequenzbereich

## 4 Zusammenfassung

In der bisherigen gängigen Praxis werden insbesondere im automobilen Bereich meist passive Bauteile zur Filterung von leitungsgebundenen Störungen verwendet. Bei aktuellen Kfz-Hochvoltssystemen stoßen diese Filterstrategien an ihre Grenzen. Mittels passiver Filterkomponenten könnten Filtertopologien mit Y-Kondensatoren aufgrund von Sicherheitsvorschriften nicht in dem hier gezeigten Umfang angewendet werden, da die maximal zulässigen Kapazitätswerte in HV-Systemen limitiert sind und damit für den Bereich kleiner 1 MHz kaum anwendbar sind. Die Kombination aus aktiven und passiven Filterstrukturen und deren Abstimmung aufeinander können daher hilfreich sein kleinere, leichtere und kostengünstigere EMV-Filter zu konzipieren. Der Aufbau der aktiven Filterstrukturen mit dem Augenmerk auf schnelle Laufzeiten durch bipolare Verstärker ermöglicht den Einsatz zur Unterdrückung von transienten Störungen bis in den MHz-Bereich. Dies stellt für Kfz-Hochvoltssysteme eine Neuerung dar.

### Literaturangaben

- [1] Y.-C. Son und S.-K. Sul, „Generalization of Active Filters for EMI Reduction and Harmonics Compensation,“ in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, no. 2, 2006
- [2] L. Lawwhite und M. F. Schlecht, „Design of active ripple filters for power circuits operating in the 1-10 MHz range,“ in IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 3, 1988
- [3] A. Nasiri, „Different Topologies of Active EMI Ripple Filters for Automotive DCDC Converters,“ in Vehicle Power and Propulsion, 2005
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] AVL Trimerics GmbH, „Aktiver Filter zwischen Inverter und CMC“, Anmeldung 09.02.2017 DE, Patentschrift DE 102017102608.8
- [7] IEC CISPR 25 HV, „Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles, boats, and on devices – limits and methods of measurement“, Draft 2013