

# Entwicklung und Evaluierung eines aktiven EMV-Filters induktiver Topologie für KFZ-Anwendungen

M. Eng. Mario Kießlich, AVL SFR, Im Gewerbepark B29, 93053 Regensburg, Deutschland  
Dr. Bastian Arndt, AVL SFR, Im Gewerbepark B29, 93053 Regensburg  
Dr. Peter Olbrich, AVL SFR, Im Gewerbepark B29, 93053 Regensburg

## 1. Einleitung

Der Betrieb elektronischer Komponenten in Elektrofahrzeugen, vor allem der Drehfeld erzeugenden Wechselrichter des Antriebssystems, kann erhebliche elektromagnetische Störungen verursachen, denen es im Rahmen fortschreitender Elektrifizierung des Fortbewegungssektors beizukommen gilt. Er verursacht eine große Anzahl an Störspektren im zur Erreichung entsprechender Antriebsleistung erforderlichen Hochvoltssystem (Beispiel: s.Abb.1). Während passive Filtersysteme den einstmaligen Anforderungen von 12-Volt-Bordnetzen völlig genügten, bringt das HV-Bordnetz eine Reihe von Herausforderungen mit sich. Zum einen erfordern hohe Ströme bzw. Leistungen große, Bauraum greifende Induktivitäten, zum anderen wirkt sich die geforderte Spannungsfestigkeit ebenfalls massiv auf die Bauteilgröße der Kapazitäten aus. Außerdem gelten nach wie vor die Sicherheitsvorschriften bezüglich des Maximums an systemweit gespeicherter Energie, was die erlaubte Gesamtkapazität bei höheren Spannungen immer kleiner werden lässt. Limits, deren Einhaltung bei 12Volt noch keinerlei Problem darstellt, sind bei 400 oder gar 800 Volt DC sehr schnell ausgereizt.

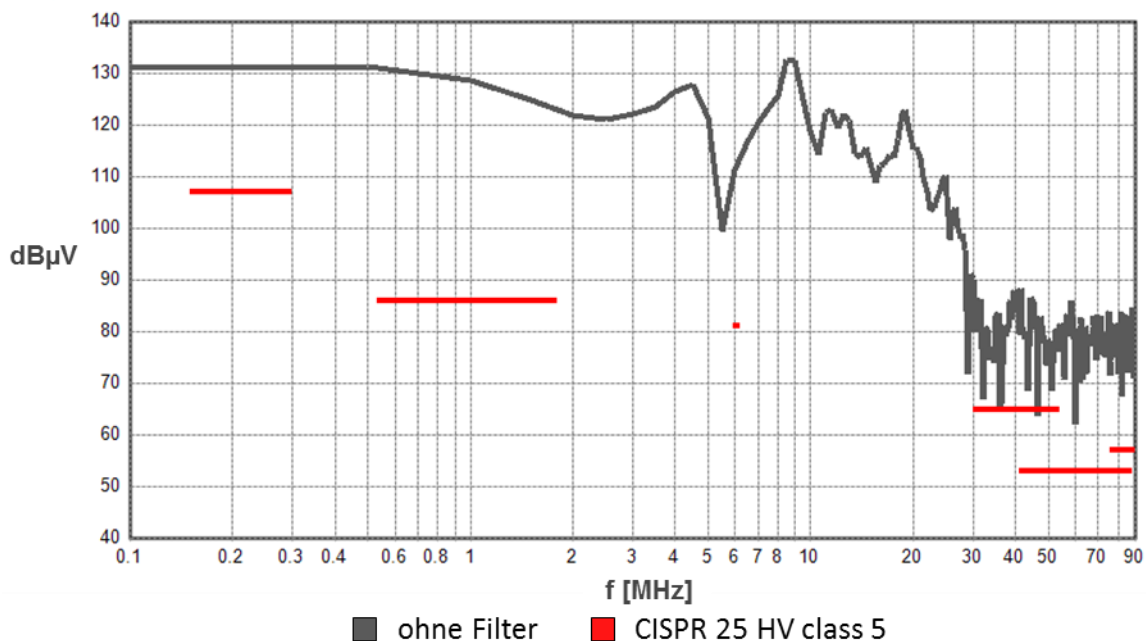


Abbildung 1: Exemplarische Störung an einer HV-Leitung eines 250V Hybridfahrzeuges unter Last

Kurzum: Es braucht alternative Filterstrategien. Dieser Beitrag beleuchtet daher die Möglichkeiten und das funktionale Potential des Einsatzes aktiver EMV-Filtersysteme in KFZ-Anwendungen, hier im Speziellen die aktive Filterung durch Störgrößenaufschaltung. Die gezeigten Erkenntnisse wurden im Rahmen einer Masterthesis erarbeitet.

## 2. Filtertopologie

Die angestrebte Funktionalität war eine regelkreisbasierte Filterstruktur, welche Störsignale erfasst und deren Inverse in das System zurückspeist. Die erste Zusammenfassung allgemeiner aktiver Filtertopologien dieser Kategorie erfolgte 1988 durch Lawhite und Schlecht [1]. Beschrieben wurde hier die grundsätzliche Arbeitsweise, wie durch Signalarückführung eine Kapazität oder Induktivität virtuell erhöht werden kann, was enormes Einsparpotential bzgl. Bauraum und letztendlich Kosten birgt. Die erste schaltungstechnische Umsetzung der Idee wurde erst 9 Jahre später dokumentiert [2,3]. Seither blieb trotz zahlreicher Veröffentlichungen eine praktische Anwendung des Prinzips für KFZ-Anwendungen noch aus. Die Anwendung eines aktiven hybriden kapazitiven Common Mode Filters (Spannung messend, Strom kompensierend) wurde bereits für KFZ-Hochvoltsysteme gezeigt [4].

Ziel der Arbeit war die Beantwortung der Fragestellung, ob der aktive Teil des Common Mode Filters auch mit rein induktiver Störsignalaus- bzw. Gegenseignaleinkopplung, also Strom messend, Spannung kompensierend, (s.Abb.2) grundsätzlich umsetzbar ist.

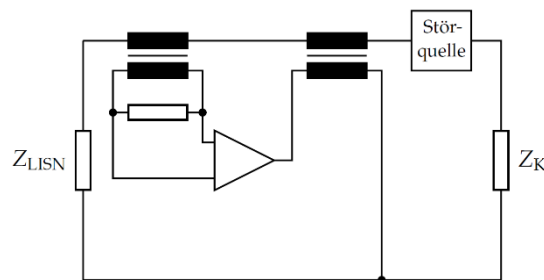


Abbildung 2: Prinzipschaltbild, aktive Feedbacktopologie mit induktiver Signalaus- und Einkopplung

## 3. Simulation

Aus den bestehenden, grundlegenden Betrachtungen wurde eine Schaltungstopologie erarbeitet. Ihre Auslegung erfolgte mittels Schaltungssimulation. Erklärtes Ziel der Schaltungsentwicklung war eine Gesamtreaktionszeit des Systems von  $<30\text{ns}$ , um aktiv Störfrequenzen bis zu 10 MHz unterdrücken zu können. Daher wurde bei der Implementierung der Schaltungstopologie auf Bipolartransistoren gesetzt, um die notwendige analoge Reaktionszeit der Schaltung zu gewährleisten. Die Wirkung des Filters wurde auf fahrzeugtypisches Impedanzverhalten hin ausgelegt. Das zu unterdrückende Störspektrum orientierte sich an KFZ-typischen Werten für HV-Systeme. Zur Ermittlung der notwendigen Filterdämpfung wurden Grenzwerte basierend auf CISPR 25 HV angewendet. Auf Basis dieser Analysen wurden geeignete Bauelemente ausgewählt und die Simulationsansätze iterativ angepasst (s.Abb.3). Die realen frequenzabhängigen Eigenschaften der magnetischen Bauteile wurden dabei mittels passiver Netzwerke im Simulator abgebildet.

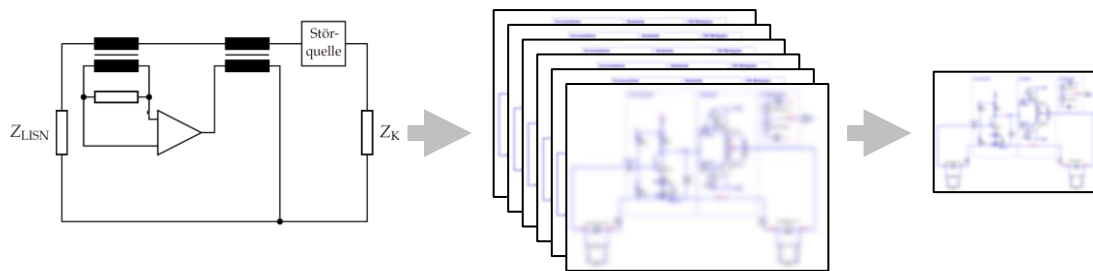


Abbildung 3: Arbeitsschritte von der Umsetzung der gewählten Topologie über iterative Anpassung der Simulation zur finalen Systemkonfiguration in LTspice

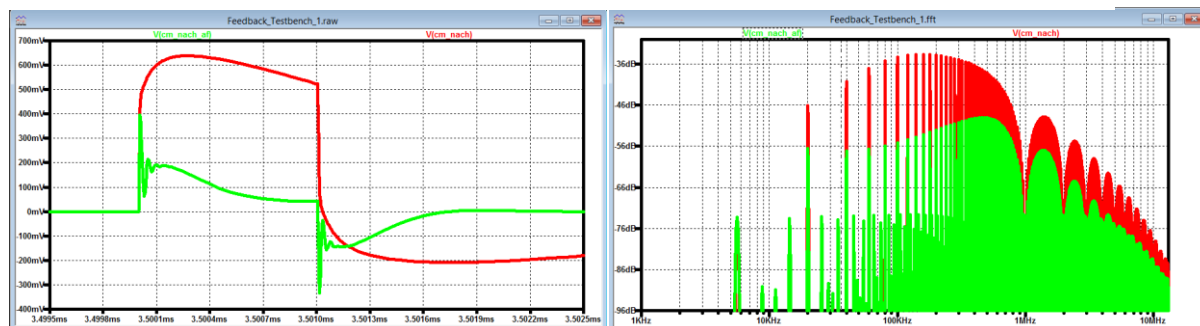


Abbildung 4: simulierte Filterwirkung im Zeit- und Frequenzbereich (rot: Aktiver Filter AUS, grün: Aktiver Filter AN)

Abb.4 zeigt das Simulationsergebnis der finalen Version im Zeit- und Frequenzbereich. Verglichen wurden hier die aktiv unterstützte gegenüber der rein passiven Wirkung der eingesetzten Induktivitäten. Sowohl in der Simulation, als auch in der späteren Messung, wurden Rechteckpulsfolgen unterschiedlicher Amplituden und Frequenzen eingepreßt. Natürlich findet die Wirksamkeit des Gegensignals ihre Grenzen sowohl in der Höhe der Versorgungsspannung des aktiven Teils von +/- 12V, als auch in der mit Frequenz steigenden Impedanz der Koppelferrite. Beim abgebildeten Verlauf hatte die Pulsfolge eine Frequenz von 100KHz mit 224mV Amplitude, 20% Tastverhältnis und 40ns Flankenzeit. Bereits im Zeitbereich (hier Zoom auf einen einzelnen Puls) ist eine deutlich stärkere Dämpfung des Signals mit aktiver Komponente erkennbar. Die FFT zeigt einen Dämpfungsgewinn von ca. 24 dB im Arbeitsbereich um 100KHz.



Abbildung 5: Realisierung der Testschaltung zur Verifikation der Filterwirkung

## 4. Realisierung und Verifikation

Zur Verifikation des simulatorischen Ansatzes und zur Bewertung des realen Entstörpotentials wurden Testschaltungen aufgebaut. Die anschließende funktionale Betrachtung erfolgte im Frequenzbereich zwischen 10 KHz und 30 MHz. Basierend auf den Ergebnissen wurde im Rahmen des Projektes ein Demonstratorsystem aufgebaut und im Zeit- und Frequenzbereich validiert (s.Abb.5). Die reale Schaltung wurde dahingehend vereinfacht, dass statt zweier Busbars ein Ein-Leiter System verwendet, und dass zunächst auf Hochvolt-Einspeisung verzichtet wurde. Genau wie im simulierten System wurde auch hier als Störimpuls ein Rechtecksignal von 100KHz mit 20% Tastverhältnis, 40ns Flankenzeit sowie 240mV Amplitude eingepreßt.

In Abbildung 6 und 7 werden jeweils die Fourier Transformaten der gemessenen und simulierten Zeitsignale direkt verglichen. Die weitgehende Übereinstimmung der Messung mit der Simulation ist nicht zuletzt den über Frequenz exakt nachmodellierten Koppelferriten zu verdanken.

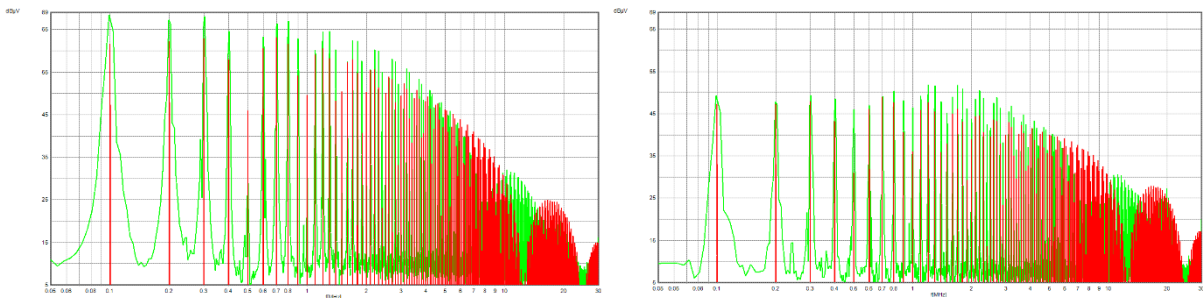


Abbildung 6: FFT-Vergleich von Messung (grün) mit der Simulation (rot); Aktiver Filter aus (links) und an (rechts)

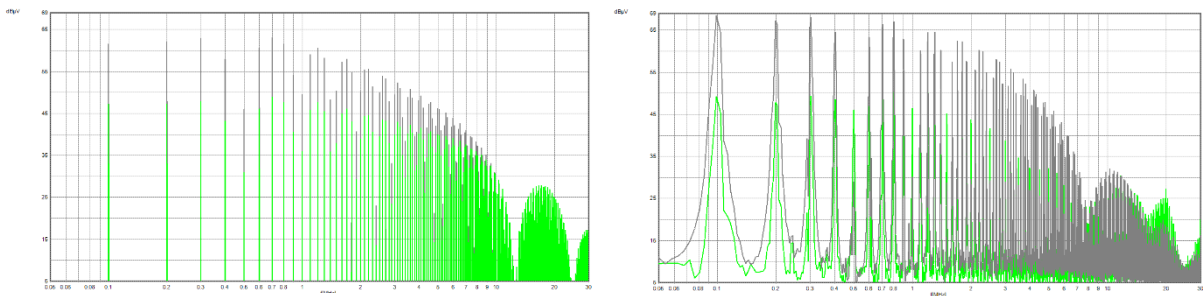


Abbildung 7: FFT-Vergleich von Messung (rechts) und Simulation (links); Aktiver Filter aus (grau) und an (grün)

## 5. Zusammenfassung

Die im Rahmen der Untersuchung durchgeführte simulationsbasierte Entwicklungsarbeit hat gezeigt, dass der aktive Filteransatz induktiver Topologie vielversprechend ist. Die Schaltungssimulation konnte in ein reales System umgesetzt werden. Die bei der Vermessung des Setups gewonnenen Daten stimmen mit den Simulationsergebnissen in großen Teilen überein. Das entscheidende Fazit daraus ist, dass die Realisierung einer virtuellen Induktivität durch aktive Verstärker- bzw. Filterschaltungen möglich ist und vor

allem im Hinblick auf Automotive-Anwendungen vielversprechende Ergebnisse liefert. Auch zeigt der Demonstrator, dass durch den Einsatz sehr kleiner, günstiger und vor allem massenproduktionstauglicher Bauelemente (s.Abb.8) in diesem Konzept ein riesiges Einsparpotential liegt.

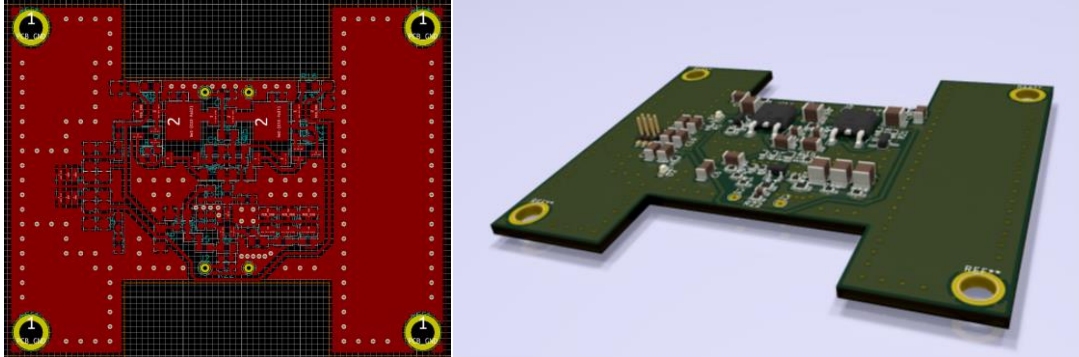


Abbildung 8: aktiver Filter, Demonstrator PCB

### Literaturangaben

- [1] 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
- [2] I. Takahashi, A. Ogata, H. Kanazawa und A. Hiruma, „*Active EMI Filter for Switching Noise of High Frequency Inverters*“, In: Power Conversion Conference, 1997
- [3] S. Ogasawara, H. Ayano und H. Akagi. „*An Active Circuit for Cancellation of Common-Mode Voltage Generated by a PWM Inverter*“, In: Power Electronics Specialists Conference, 1997
- [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