

Injektorkonzepte zur aktiven Unterdrückung der elektromagnetischen Störungen aller Klemmen eines stationär betriebenen DC/DC-Wandlers

M.Sc. Marvin Rübartsch, TU Dortmund, Arbeitsgebiet Bordsysteme

M.Sc. Andreas Bendicks, TU Dortmund, Arbeitsgebiet Bordsysteme

Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, TU Dortmund, Arbeitsgebiet Bordsysteme

1 Einleitung

Die voranschreitende Elektrifizierung des Kfz erfordert den Einsatz verschiedener leistungselektronischer Konverter, die durch die funktionsbedingten Schaltvorgänge der Leistungstransistoren ein hohes Maß an elektromagnetischen Störungen verursachen können. Um andere elektronische Systeme nicht in ihrer Funktion zu beeinträchtigen, muss die Störaussendung begrenzt werden. Üblicherweise werden dazu passive Filterkomponenten eingesetzt. Diese können für hohe Störungen, Spannungen und Ströme jedoch groß, schwer und teuer werden. Um bauraumreduzierte Systeme zu ermöglichen, haben sich bereits verschiedene aktive Methoden zur Störunterdrückung etabliert [1]. Aktive EMV-Filter wurden z.B. in [2]-[5] vorgestellt. Diese Systeme nutzen das Prinzip der destruktiven Interferenz. Das Gegenstörsignal wird direkt durch Messung und Invertierung der Störungen generiert. Limitierte Verstärkungs-Bandbreiten-Produkte und unvermeidbare Verzögerungszeiten begrenzen hierbei die Filterleistung.

Bei stationär betriebenen Systemen bestehen die Störungen aus diskreten Harmonischen, die sich auf die zugrundeliegende Schaltfrequenz zurückführen lassen. Damit ist es also möglich, ein Gegenstörsignal aus einzelnen Sinuswellen zu synthetisieren. Durch Synchronisation der Ansteuersignale und Einstellen der Amplituden und Phasen der einzelnen Sinussignale ist es beispielsweise möglich, systembedingte Verzögerungszeiten, Phasen- und Betragsgänge zu kompensieren. In diesem Beitrag wird die Methodik der aktiven Störunterdrückung mithilfe von synthetisierten und synchronisierten Gegenstörsignalen eingesetzt [6], [7]. Dadurch konnten bereits überzeugende Ergebnisse für einzelne Klemmen eines stationär betriebenen DC/DC-Wandlers erzielt werden. Diese Methode wurde in [8] erweitert, um die aktive Störunterdrückung an allen Klemmen (und damit für das Gesamtsystem) zu ermöglichen. In [8] wurden die Gegenstörsignale zwischen den Leitungen und der Referenzmasse über kapazitive Injektoren eingekoppelt. Diese führen allerdings zu einer Erhöhung der Y-Kapazitäten des Gesamtsystems, die es aufgrund von Sicherheitsvorschriften zu beschränken gilt. Dieses Problem kann beispielsweise durch den Einsatz induktiver Injektoren behoben werden. Im Rahmen dieses Beitrags werden verschiedene Injektoren hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und Einschränkungen diskutiert.

Die optimale Auslegung von Injektoren zur Unterdrückung der Störungen an mehreren Klemmen eines Systems ist eine komplexe Aufgabe. Einerseits kann es problematisch sein, dass die Injektoren der Eingangsseite die Störungen auf der Ausgangsseite erhöhen, da die Injektoren über das zu entstörende System miteinander verkoppelt sind. Es könnte auch eine Modenkonzersion auftreten. Diese könnte vorhandene Gleichtaktstörungen (gleichsinnige Störungen auf den Versorgungsleitungen, engl. **Common Mode**, kurz **CM**) in Gegentaktstörungen (gegensinnige Störungen auf den Versorgungsleitungen, engl. **Differential Mode**, kurz **DM**) überführen und umgekehrt. Eine Erhöhung oder Veränderung der Störungen an den anderen Klemmen durch die Injektoren würde eine

erhöhte Leistungsaufnahme für das System zur aktiven Gegenkopplung erfordern, um die zusätzlich generierten Störungen auszulöschen.

Dieser Beitrag stellt zunächst die grundlegende Systemtheorie der verwendeten Methodik dar. Es folgt anschließend eine Diskussion verschiedener Injektorkonzepte an einem Gleichspannungswandler. Verschiedene Injektorkonzepte werden anhand ihrer Verkopplung diskutiert. Ein rein kapazitives Injektorkonzept ist bereits in [8] vorgestellt worden. Daher fokussiert sich dieser Beitrag auf ein induktives Gleich- und Gegentaktinjektor-konzept, um Kapazitäten gegen die Bezugsmasse zu vermeiden. Zuletzt werden die dargestellten Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick für weitere Untersuchungen des Injektorkonzepts gegeben.

2 Aktive Gegenkopplung an mehreren Klemmen eines stationär betriebenen Systems

Zum Verständnis dieses Beitrags wird die systemtheoretische Beschreibung zur aktiven Gegenkopplung an mehreren Klemmen eines stationären Systems skizziert. Die grundlegende Theorie, sowie die genaue Implementierung des Verfahrens ist in [8] ausführlich dargestellt.

Um die aktive Gegenkopplung an allen Klemmen eines Systems zu realisieren, sind Injektoren am Ein- und am Ausgang nötig. Injektoren können über eine kapazitive, induktive oder resistive Kopplung ausgeführt werden. Um die Zusammenhänge für die systemtheoretische Beschreibung zu erläutern, ist in Abbildung 1 das Gesamtsystem dargestellt. Die Störquellen werden hier, angelehnt an den standardisierten Messaufbau der CISPR25 [9], durch **Bordnetznachbildungen (BNN)** abgebildet.

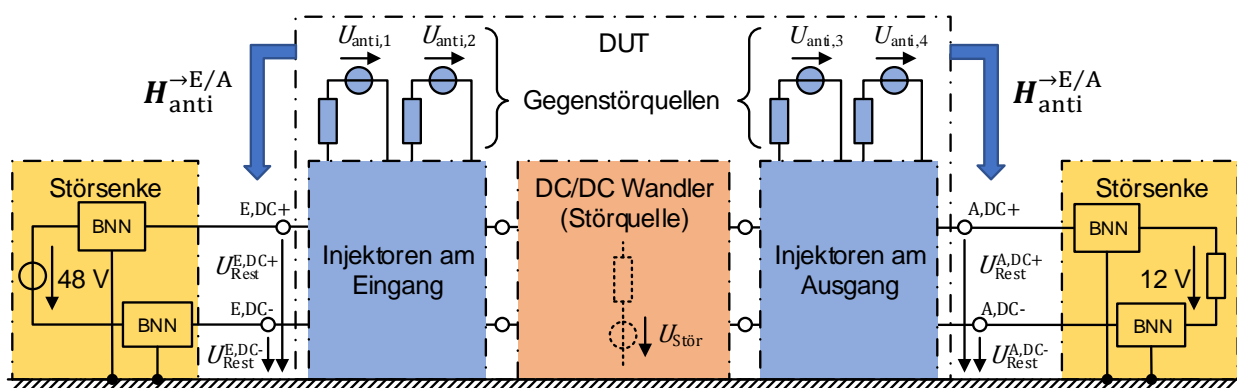


Abbildung 1: Schematische Darstellung des zu entstörenden Gesamtsystems

Zunächst werden die Störungen der zu betrachtenden Störquelle als $\vec{U}_{Stör}^{E/A}(f)$ an den Ein- und Ausgangsklemmen des DC/DC-Wandlers definiert. Diese Störungen gilt es zu reduzieren, um das Gesamtsystem zu entstören. Um alle vier Klemmen zu entstören, werden vier Gegenstörquellen benötigt. Jede Gegenstörquelle weist ein Übertragungsverhalten auf alle zu betrachtenden Klemmen auf. Dieses Verhalten wird mit der Übertragungsmatrix $H_{anti}^{E/A}$ abgebildet. Sie beschreibt das Verhalten der Injektoren auf die jeweils zu betrachtenden Klemmen. Somit beschreibt die Übertragungsmatrix in einer Spalte das Übertragungsverhalten eines Injektors auf alle Ein- und Ausgangsklemmen.

Durch Überlagerung der ursprünglichen Störungen mit den Gegenstörsignalen an den Ein- und Ausgangsklemmen kann ein Gleichungssystem aufgestellt werden, das es zu lösen gilt [8].

$$\vec{U}_{\text{Rest}}^{E/A} = \vec{U}_{\text{Stör}}^{E/A} + \mathbf{H}_{\text{anti}}^{\rightarrow E/A} \cdot \vec{U}_{\text{anti}} \quad (1)$$

Idealerweise sollen alle Störungen eliminiert werden ($\vec{U}_{\text{Rest}}^{E/A} = 0$). Aus dieser Forderung ergibt sich Gleichung (2).

$$\vec{0} = \vec{U}_{\text{Stör}}^{E/A} + \mathbf{H}_{\text{anti}}^{\rightarrow E/A} \cdot \vec{U}_{\text{anti}} \quad (2)$$

Gleichung (2) kann direkt zur Berechnung der Gegenstörsignale umgestellt werden:

$$\vec{U}_{\text{anti}} = -\vec{U}_{\text{Stör}}^{E/A} \cdot \mathbf{H}_{\text{anti}}^{\rightarrow E/A^{-1}} \quad (3)$$

Um die nötigen Gegenstörsignale zu berechnen, muss die Übertragungsmatrix invertierbar sein. Andernfalls gibt es keine eindeutigen Gegenstörsignale. Ferner hat die Verkopplung der Injektoren einen Einfluss auf die zu berechnenden Gegenstörsignale. Wenn sich ein Injektor stark auf die Klemme eines anderen Injektors auswirkt, muss dieser diesen Einfluss kompensieren. Außerdem könnte das Signal der Injektoren sich auch auf ungewünschte Pfade ausbreiten. Aus diesen zwei Aspekten resultieren größere Gegenstörsignale. Das Gleichungssystem berücksichtigt die Verkopplungen der Injektoren bereits bei der Lösung und kompensiert diese. Das heißt, die Amplituden der Gegenstörsignale können wesentlich größer werden, als es nötig wäre, um die ursprünglichen Störungen zu reduzieren. Dies hätte eine höhere Leistungsaufnahme des Systems zur aktiven Störunterdrückung zur Folge. Daher sollte die gegenseitige Verkopplung von Injektoren möglichst minimal gehalten werden.

3 Diskussion von verschiedenen Injektorkonzepten

Im folgenden Teil des Beitrags werden verschiedene Injektorkonzepte anhand ihrer Vor- und Nachteile diskutiert. Zunächst werden die getroffenen Annahmen bei der Betrachtung von verschiedenen Injektorkonzepten an einem DC/DC-Wandler-System erläutert. Injektoren können resistiv, kapazitiv oder induktiv mit dem System verkopplert sein. Resistive Injektoren würden aufgrund der Betriebsströme und –spannungen des Konverters für erhebliche Verluste sorgen, sodass diese in diesem Beitrag nicht weiter betrachtet werden.

3.1 Annahmen

Für den Konverter werden Vereinfachungen getroffen, um die Injektorkonzepte anschaulich diskutieren zu können. Die getroffenen Annahmen beziehen sich auf den Eingang eines Leistungskonverters. Die Betrachtungen für den Ausgang erfolgen analog. Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau eines DC/DC-Wandlers.

Die X-Impedanz (Impedanz zwischen den Versorgungsleitungen) des Konverters wird durch die Stützkondensatoren beschrieben. Die Stützkondensatoren des DC/DC-Wandlers bilden aufgrund der hohen Kapazitäts- und geringen Induktivitätswerte eine vernachlässigbare Impedanz für niedrige und hohe Frequenzen. Die zumeist kapazitive parasitäre Kopplung des Konverters gegenüber der

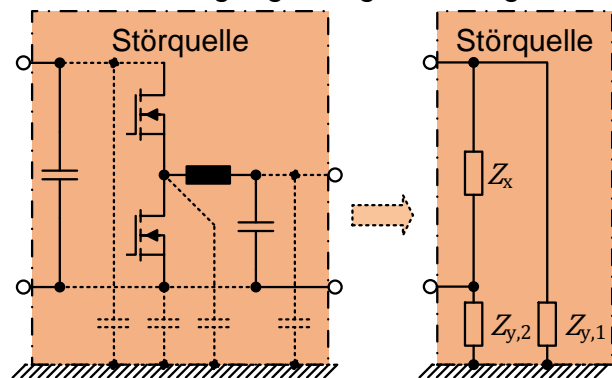


Abbildung 2: Annahmen am Konvertereingang

Referenzmasse wird über Y-Impedanzen beschrieben, welche in der Regel einen hohen Wert aufweisen. Es wird angenommen:

$$Z_x \ll Z_{y,1/2}, \text{ mit } |Z_x| \approx 0 \quad (4)$$

Die Y-Impedanzen des Konverters können für niedrige Frequenzen als sehr hoch angenommen werden. Mit steigender Frequenz sinken die Y-Impedanzen. Da es sich lediglich um eine parasitäre Kopplung mit sehr geringen Kapazitätswerten handelt, können die Impedanzen dennoch zunächst als sehr hoch angenommen werden (5).

$$|Z_{y,1}|, |Z_{y,2}| \rightarrow \infty \quad (5)$$

Die Impedanz einer Bordnetznachbildung nach CISPR 25 [9] gegen Masse beträgt bei 1 MHz etwa 50 Ω . Ferner stellt die Längsinduktivität der Bordnetznachbildung für hochfrequente Störungen eine hohe Impedanz dar. Die Spannungsquelle am Eingang des Konverters wird mithilfe einer Innenimpedanz Z_i für hochfrequente Betrachtungen vereinfacht.

3.2 Kapazitive Kopplung der Injektoren auf jeder Leitung

Das zunächst zu betrachtende Injektorkonzept sieht für jede Leitung eine separate Entstörung vor. Die Injektoren werden kapazitiv gegen die Referenzmasse ausgeführt. Bei der Auswahl von kapazitiven Injektoren ist zu berücksichtigen, dass diese mit der Betriebsspannung skalieren. Bei gleichem Kapazitätswert sind bei höheren Spannungen größere Kondensatoren notwendig. Das Injektorkonzept ist in Abbildung 3 dargestellt. Da Z_x vernachlässigbar klein ist, sind die beiden Gegenstörquellen im Prinzip direkt miteinander verkoppelt, da beide Injektoren auf demselben Potential liegen. Wie im Abschnitt 2

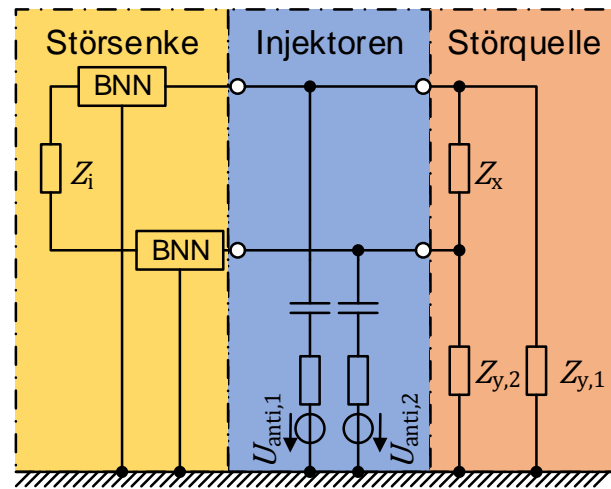


Abbildung 3: Kapazitives Injektorkonzept

beschrieben, können daraus große Gegenstörsignale resultieren. Um eine Entkopplung der Injektoren zu realisieren, muss die Impedanz des Konverters zwischen den Versorgungsleitungen erhöht werden. Dies wurde in [8] mithilfe von Entkopplungsinduktivitäten auf jeder Leitung realisiert. Die Vergrößerung der Impedanz zwischen den Einspeiseknoten der verschiedenen Injektoren vergrößert wird. Die Injektoren werden mit steigender X-Impedanz weiter voneinander entkoppelt. Die Ergebnisse der aktiven Gegenkopplung mit diesem Injektorkonzept und den entsprechenden Entkopplungsinduktivitäten sind in [8] dargestellt. Die Messungen in [8] zeigen an jeder Bordnetznachbildung Reduktionen von etwa 50 dB um 1 MHz und Reduktionen von etwa 40 dB um 30 MHz. Die Kondensatoren zur Einkopplung der Gegenstörsignale bringen gegenüber Masse zusätzliche Y-Kapazitäten in das System ein. Diese gilt es aufgrund von Sicherheitsvorschriften für die maximal zulässigen Ableitströme zu begrenzen. Daher werden im Folgenden induktive Übertrager diskutiert.

3.3 Induktive Kopplung der Injektoren auf jeder Leitung

Induktive Übertrager auf jeder Leitung können auch zur Entstörung verwendet werden. Im Gegensatz zu Kondensatoren skalieren Induktivitäten mit dem Betriebsstrom. Für hohe Ströme sind häufig große Elemente nötig, damit es zu keinen Sättigungen im magnetischen Kern und keinen Überhitzungen in den Wicklungen kommt. Das Injektorkonzept ist in Abbildung 4 dargestellt. Analog kann auch hier eine Verkopplung der Injektoren über Z_x gesehen werden. Um für dieses Injektorkonzept eine Entkopplung zu realisieren, müssten zusätzliche Y-Impedanzen in das System eingebracht werden, die wesentlich kleiner als die X-Impedanz sind. Dies könnte durch zusätzliche Kapazitäten gegen Masse erfolgen, die jedoch größer als die Stützkapazitäten des Konverters sein müssen. Dies würde die Y-Kapazitäten dieses Systems unzulässig erhöhen. Wie im Folgenden gezeigt, kann dieses Problem jedoch durch andere Konfigurationen der induktiven Übertrager vermieden werden.

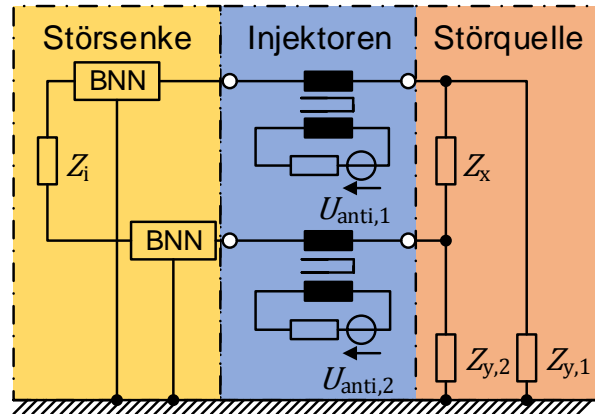


Abbildung 4: Induktives Injektorkonzept

3.4 Induktive Gleich- und Gegentaktinjektoren

Um möglichst wenig zusätzliche Y-Kapazitäten in das System einzubringen, soll im Folgenden ein induktives Injektorkonzept für Gleich- und Gegentaktinjektoren untersucht werden. Das Konzept ist in Abbildung 5 dargestellt. Dieses Konzept hat den Vorteil, dass die Injektoren durch die Betrachtung von Gleich- und Gegentaktstörungen voneinander entkoppelt sind. Eine direkte Verkopplung am Eingang ist für dieses Konzept nicht ersichtlich. Dennoch kann eine Verkopplung auf den Ausgang auftreten. Um eine Verkopplung auf den Ausgang zu verringern, können die Y-Impedanzen verkleinert werden. Dies könnte durch das zusätzliche Einbringen von Kapazitäten gegen Masse erfolgen. Bei der Auslegung ist zu beachten, dass der Gegentaktinjektor durch hohe Gleichströme in Sättigung gebracht werden würde. Der Gleichtaktinjektor hingegen weist dieses Problem nicht auf, da sich die magnetischen Flüsse im Kern größtenteils auslöschen würden.

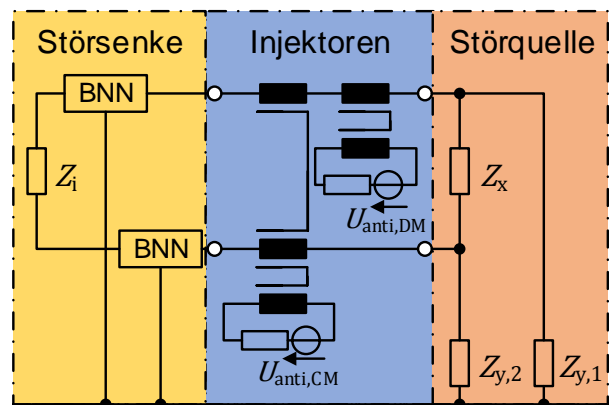


Abbildung 5: Induktive Gleich- und Gegentaktinjektoren

3.5 Kapazitive Kopplung des Gegentaktinjektors und Induktive Kopplung des Gleichtaktinjektors

Um die Sättigung des Gegentaktinjektors zu vermeiden, könnte dieser auch kapazitiv zwischen den Versorgungsleitungen ausgeführt werden. Die Betrachtung der Verkopplung der Injektoren würde hier analog erfolgen. Ein weiterer Vorteil des kapazitiven Gegentaktinjektors wäre außerdem die Skalierung der Kapazität über die Betriebsspannung anstatt des Betriebsstroms, sodass Sättigungseffekte für den Gegentaktinjektor vernachlässigt

werden können. Ein Problem ist, dass der eingebrachte Gegentaktinjektor über Z_x annähernd kurzgeschlossen werden könnte. Dies hätte eine hohe Leistungsaufnahme des Injektors zur Folge, um die an den Störsenken notwendigen Gegenstörsignale zu erzeugen. Um dies zu vermeiden, wird der Gleichtaktinjektor zwischen Gegentaktinjektor und der Störquelle platziert (vgl. Abbildung 6). Aufgrund von Asymmetrien des Gleichtaktübertragers wird ein Teil der Gleichtaktinduktivität auch für den Gegentakt wirken, wodurch der Gegentaktinjektor von der Störquelle zum Teil entkoppelt wird. Dieses Konzept wurde bisher noch nicht praktisch erprobt, kann aber eine Verbesserung des Konzeptes aus 3.4 darstellen.

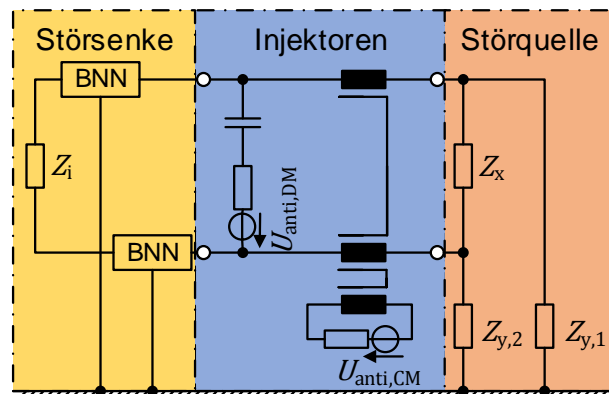


Abbildung 6: Induktiver Gleichtaktinjektor und kapazitiver Gegentaktinjektor

4 Demonstration

Im folgenden Kapitel wird der verwendete Testaufbau für das verwendete induktive Gleich- und Gegentaktinjektorkonzept beschrieben. Der verwendete Algorithmus, sowie die erzielten Ergebnisse mit dem Injektorkonzept werden präsentiert.

4.1 Testsystem

Um die aktive Gegenkopplung mit dem in Abschnitt 3.4 vorgestellten Injektorkonzept zu analysieren, wird im Folgenden das Testsystem vorgestellt. Als Demonstrator/DUT (Device Under Test) wird ein stationär betriebener DC/DC-Wandler (Evaluation Board GS61009P-EVBHF) verwendet, der beispielsweise genutzt werden kann, um einen Leistungsfluss zwischen dem 12 V- und 48 V-Bordnetz im Fahrzeug zu ermöglichen. Die Schaltfrequenz beträgt 1 MHz. Als Last wird ein 1 Ω Widerstand verwendet. Dies entspricht bei einer Ausgangsspannung von 12 V einer Transferleistung des Konverters von 144 W. Der Messaufbau orientiert sich am Automobilstandard CISPR25 [9]. Der DC/DC-Wandler wird galvanisch getrennt von dem Tisch (Massefläche) betrieben. Daher entstehen Gleich- und Gegentaktstörungen und es ist jeweils eine Bordnetznachbildung an jeder Leitung notwendig. Der realisierte Testaufbau ist in Abbildung 7 dargestellt. Mithilfe eines Messempfängers erfolgt eine Auswertung der Reststörungen an den Bordnetznachbildungen.

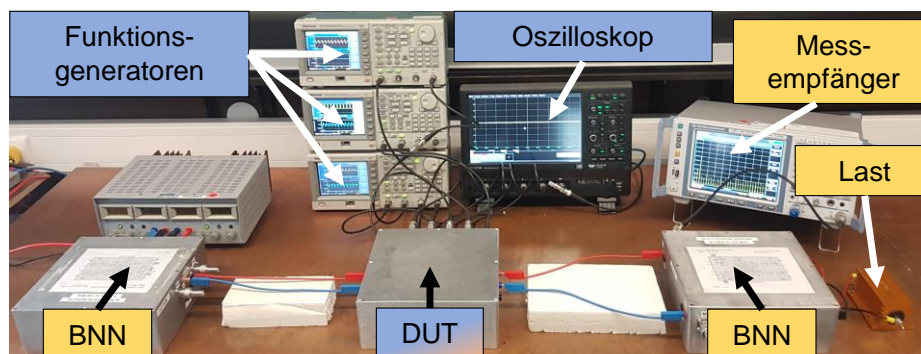


Abbildung 7: Foto des realisierten Testaufbaus

Die Messung der Störungen des DUT erfolgt mit einem Oszilloskop im Zeitbereich. Zur Injektion der Gegenstörsignale werden mehrere Funktionsgeneratoren genutzt. Diese ermöglichen das Stellen von beliebigen Gegenstörsignalen. Außerdem wird das Oszilloskop mit dem Funktionsgenerator, sowie das Ansteuerungssignal mit den Gegenstörsignalen synchronisiert. Um die Messgeräte anzusteuern, wird ein PC mit Matlab genutzt. Dieser führt ebenfalls die notwendigen Berechnungen durch. Das DUT besteht aus einem DC/DC-Wandler und vier Injektoren, welche in einer Aluminiumbox untergebracht sind. Über BNC-Durchführungen in der Aluminiumbox können die Gegenstörsignale der Funktionsgeneratoren direkt auf die entsprechenden Klemmen eingepägt werden. Der Demonstrator ist in Abbildung 8 dargestellt. Als Sensoren zur Messung der Störungen und Charakterisierung des Systems wird der Messabgriff der Bordnetznachbildungen genutzt. Als Gleichaktinjektor wird ein Ferritkern des Materials N30 gleichsinnig mit zwei aufgebrachten Windungen der Versorgungsleitungen DC+ und DC- genutzt. Die Einkopplung des Gegenstörsignals erfolgt über eine weitere Leitung, die auch mit zwei Windungen auf dem Kern in gleichsinniger Richtung wie die Versorgungsleitungen angebracht ist. So ergibt sich eine induktive Kopplung des Injektors, um Gleichaktstörungen zu reduzieren. Der Gegentaktinjektor unterscheidet sich darin, dass nur die Versorgungsleitung DC+ auf dem Ferritkern aufgebracht wird.

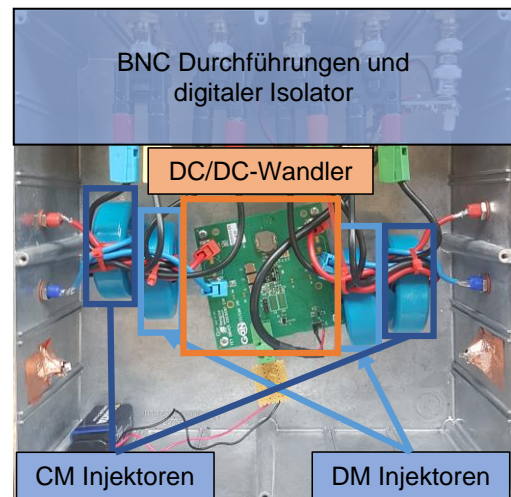


Abbildung 8: Foto des DUT mit Gleich- und Gegentaktinjektoren

4.2 Algorithmus

Um die Gegenstörsignale zu berechnen, muss das System zunächst charakterisiert werden. Die Berechnung der Gegenstörsignale kann in drei Schritte unterteilt werden [8]:

1. Charakterisierung der Störungen
2. Bestimmung des Übertragungsverhaltens der Injektoren auf die Ein- und Ausgangsklemmen
3. Berechnung der Gegenstörsignale

Das Oszilloskop misst die Störungen des DC/DC-Wandlers im Zeitbereich an den Ein- und Ausgangsklemmen (hier wird der Messabgriff der Bordnetznachbildungen verwendet). Durch Anwenden einer **Fast Fourier Transformation (FFT)** können die gemessenen Störungen in den Frequenzbereich überführt werden und die Störungen können für die Schaltharmonischen in Betrag und Phase ausgewertet werden.

Um das Übertragungsverhalten der Injektoren auf die Ein- und Ausgangsklemmen zu bestimmen, werden Testsignale generiert, die aus einzelnen Sinussignalen bei Vielfachen der Schaltfrequenz bestehen und den zu betrachtenden Frequenzbereich von 1 MHz bis 30 MHz abbilden. An den Ein- und Ausgangsklemmen kann somit mit dem Oszilloskop ausgewertet werden, wie sich die Testsignale auf die Ein- und Ausgangsklemmen abbilden. Daraus kann die Übertragungsmatrix bestimmt werden.

Nach Bestimmung der Störungen und des Übertragungsverhaltens des Systems können schlussendlich die Gegenstörsignale nach Gleichung (3) berechnet werden. Eine ausführlichere Beschreibung der praktischen Implementierung des Verfahrens ist in [8] dargestellt.

4.3 Charakterisierung des Systems

Bei der Charakterisierung des Systems können Verkopplungen der Injektoren auf den Ausgang erkannt werden. Die Charakterisierung des Systems ist beispielhaft für die Injektoren der Eingangsseite in Abbildung 9 dargestellt. Dargestellt sind die betragsmäßigen Einträge der Übertragungsfunktion.

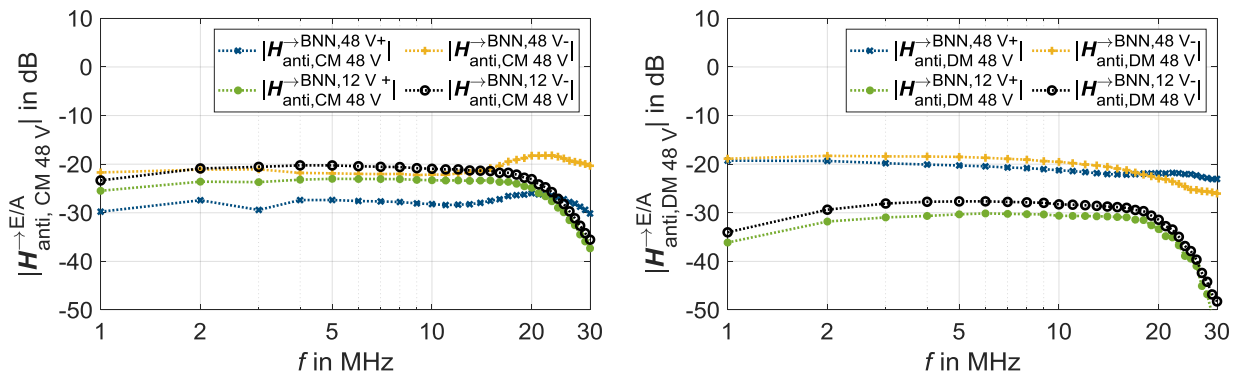


Abbildung 9: Charakterisierung des Systems mit Gleich- und Gegentaktinjektoren

Zunächst wird das Verhalten am Eingang betrachtet (blaue und gelbe Kurve). Das gewünschte Verhalten des Gleichtaktinjektors wäre, dass sich dieser betragsmäßig gleich auf die Bordnetznachbildungen auf der 48 V Eingangsseite auswirkt. Es kann eine Verstimmung des Gleichtaktinjektors durch die Impedanz des Gegentaktinjektors beobachtet werden. Dies hat zur Folge, dass der Gleichtaktinjektor sich schwächer auf die Bordnetznachbildung der DC+ Leitung auf der 48 V Seite auswirkt. Das gewünschte Verhalten des Gegentaktinjektors am Eingang wäre, dass dieser sich betragsmäßig gleich auf die Bordnetznachbildungen der 48 V Seite auswirkt. Im Gegensatz zu dem Gleichtaktinjektor ist hier allerdings die Phase zwischen der 48 V DC+ und DC- Leitung um 180° gedreht, damit ein Gegentaktstrom fließt. Der magnetische Fluss des Gegentaktinjektors in der Gleichtaktinjektorspule kompensiert sich am Eingang, sodass die Impedanzen des Gleichtaktinjektors am Eingang für den Gegentaktinjektor vernachlässigt werden können.

Aus dem Verhalten der Injektoren auf den Ausgang (grüne und schwarze Kurve) kann geschlossen werden, dass die Stützkapazität des Konverters am Ausgang auch eine vernachlässigbare Impedanz darstellt (vgl. Abbildung 2). Dies hat eine direkte Verkopplung der Injektoren über die Stützkapazitäten des Konverters auf den Ausgang zur Folge. Beide Injektoren prägen eine Gleichtaktstörung auf den Ausgang ein. Das bedeutet für den Gegentaktinjektor, dass dieser bereits, durch die Gleichtaktspule am Ausgang, vom Ausgang entkoppelt ist. Durch Erhöhung der Gleichtaktimpedanz am Ausgang kann also der Gegentaktinjektor stärker vom Ausgang entkoppelt werden. Für den Gleichtaktinjektor hingegen wirken auf allen Strompfaden die gleichen Impedanzen. Der Gleichtaktinjektor hat also einen direkten Durchgriff auf den Ausgang. Um diese Verkopplung auf den Ausgang zu minimieren, müssten die Y-Impedanzen verkleinert werden. Die Entkopplung über die parasitären Y-Impedanzen des Konverters kann ab etwa 20 MHz beobachtet werden, da die Y-Impedanzen mit steigender Frequenz betragsmäßig abnehmen. Die Verstimmung des Gleichtaktinjektors am Ausgang ist wesentlich geringer, da der DC-

Stromfluss auf der Ausgangsseite viermal so groß ist, wie der DC-Strom auf der Eingangsseite. Die Impedanz des Injektors sinkt aufgrund von Sättigungseffekten.

4.4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der aktiven Gegenkopplung mit Gleich- und Gegentaktinjektoren dargestellt. Die gefundenen Gegenstörsignale sind in Abbildung 10 dargestellt. Der Funktionsgenerator hat einen Innenwiderstand von 50Ω .

Zur Betrachtung der Leistungsaufnahme wird aufgrund fehlender Anpassung der Funktionsgeneratorausgänge eine Impedanz von 0Ω als Worst Case Abschätzung angenommen. Der Leistungsverbrauch des Systems zur aktiven Gegenkopplung beträgt also mit den dargestellten Gegenstörsignalen etwa 7 mW . Die reduzierten Störungen mithilfe dieser Gegenstörsignale sind in Abbildung 11 dargestellt. Die eingebrachten Injektoren dämpfen die ursprünglichen Störungen des Konverters passiv.

Bei diesem Versuch der aktiven Störunterdrückung liegt die maximale Reststörung bei etwa $36 \text{ dB}\mu\text{V}$. Es wurde eine maximale Reduktion von ca. 70 dB erzielt. Der Mittelwert aller Reduktionen beträgt etwa 50 dB . Das hier vorgestellte Injektorkonzept liefert überzeugende Ergebnisse zur aktiven Gegenkopplung mithilfe von synthetisierten und synchronisierten Gegenstörsignalen. Außerdem mussten keine zusätzlichen Y-Kapazitäten in das System eingebracht werden.

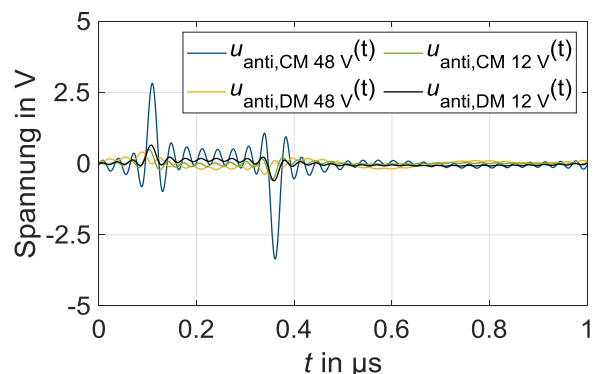


Abbildung 10: Gegenstörsignale für die Gleich- und Gegentaktinjektoren

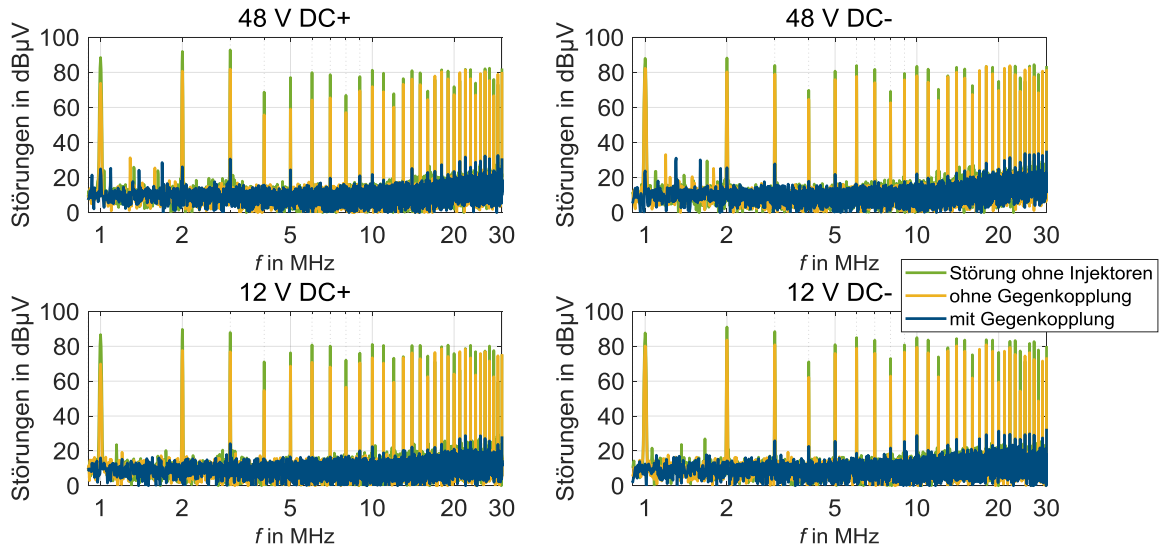


Abbildung 11: Ergebnisse der aktiven Gegenkopplung mit Gleich- und Gegentaktinjektoren

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden verschiedene Injektorkonzepte für die aktive Störunterdrückung mithilfe von synthetisierten und synchronisierten Gegenstörsignalen diskutiert. Die Vor- und Nachteile von kapazitiven, sowie induktiven Injektorkonzepten wurden herausgestellt. Die ersten Injektorkonzepte sehen eine Entstörung jeder einzelnen Leitung vor. Dies kann

kapazitiv oder induktiv geschehen. Um die Nachteile dieser Konzepte zu umgehen, wurden im Folgenden zwei weitere Injektorkonzepte vorgestellt. Diese Injektorkonzepte sehen eine Betrachtung der Störungen als Gleich- und Gegentaktstörungen vor um die Nutzung von zusätzlichen Kapazitäten gegen Masse zu umgehen. Um eine Änderung oder Erhöhung der Störungen an anderen Klemmen zu minimieren, sollten die Injektoren voneinander entkoppelt werden. Wenn das System nicht oder nur wenig entkoppelt ist, muss das Gegenstörsystem zur Reduktion der Störungen größere Amplituden bei den Gegenstörsignalen aufbringen, da sich die injizierten Signale auch auf die restlichen zu entstörenden Klemmen auswirken und dieser Einfluss wieder kompensiert werden muss. Diese Kompensation hätte einen erhöhten Leistungsverbrauch zur Folge.

Es wurden die Störungen eines DC/DC-Wandlers in einem standardisierten Messaufbau sowohl an den Ein- als auch an den Ausgangsklemmen mit einem rein induktiven Gleich- und Gegentaktinjektorkonzept reduziert. Das verwendete Injektorkonzept zeigt überzeugende Ergebnisse für die verwendete Methodik der aktiven Störunterdrückung. Die an allen Klemmen anliegenden maximalen Reststörungen überschreiten den Pegel von 36 dB μ V nicht. Die maximal erzielte Reduktion der Störungen liegt bei etwa 70 dB. Außerdem kommt das Injektorkonzept ohne zusätzliche Y-Kapazitäten aus. Y-Kapazitäten würden die Ableitströme gegen Masse erhöhen, welche aufgrund von Sicherheitsvorschriften in der Regel begrenzt werden müssen.

Weitere Untersuchungen können den Gegentaktinjektor betreffen. In der induktiven Auslegung kann es aufgrund der hohen Betriebsströme des DC/DC-Wandlers zu Sättigungseffekten in den Ferritkernen kommen. Um dieses Problem zu lösen, können kapazitive Injektoren eingesetzt werden.

Literatur

- [1] Y.-C. Son, S.-K. Sul: Generalization of active filters for EMI reduction and harmonics compensation. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*, Bd. 42, H. 2 (2006), S. 545-551
- [2] S. Feng, W. Sander, T. Wilson: Small-capacitance nondissipative ripple filters for dc supplies. In: *IEEE Trans. Magn.*, Bd. 6, H. 1 (1970) S. 137-142
- [3] J. Walker: Designing practical and effective active EMI filters. In: *Proc. Powercon 11 Conf.*, Dallas, Texas, USA (1984), Paper I-3.
- [4] L. E. LaWhite, M. F. Schlecht: Active filters for 1-MHz power circuits with strict input/output ripple requirements. In: *IEEE Trans. Power Electron.*, Bd. PE-2, H. 4 (1987), S. 828-290
- [5] L. E. LaWhite, M. F. Schlecht: Design of active ripple filters for power circuits operating in the 1-10 MHz range. In: *IEEE Trans. Power Electron.*, Bd. 3, H. 3 (1988), S. 310-317
- [6] A. Bendicks, T. Dörlemann, S. Frei, N. Hees, M. Wiegand: Active EMI reduction of stationary clocked systems by adapted harmonics cancellation. In: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Bd. 61, H. 4 (2019), S. 998-1006
- [7] A. Bendicks, T. Dörlemann, S. Frei, N. Hees, M. Wiegand: FPGA-basierte aktive Gegenkopplung der Schaltharmonischen von leistungselektronischen Systemen. In: *EMV Düsseldorf*, Deutschland (2018)
- [8] A. Bendicks, M. Rübartsch, S. Frei: Simultaneous EMI suppression of the input and output terminals of a dc/dc converter by injecting multiple synthesized cancellation signals. In: *Proc. Int. Symp. Electromagn. Compat. Eur.*, Barcelona, Spanien (2019), S. 842-847
- [9] "CISPR25 - Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers", Ed. 4.0, 2015.