



**White Paper**



# **Störfestigkeit für Single Pair Ethernet (SPE) in rauen industriellen Umgebungen**

**Andy Ackland, CTO, UWBX Ltd.**

**Peter Lu, Technischer Direktor, HALO Electronics Inc.**

September 2022



## Einführung

Ethernet hat seit seiner Einführung in den 70er Jahren einen langen Weg zurückgelegt. Die Datenraten sind nicht nur um ein Vielfaches gestiegen, ihre Anwendung ist weit über Computernetzwerke hinausgewachsen. Ethernet wurde in der industriellen Automatisierung und Steuerungen, in medizinischen Geräten, in der Automobilindustrie, in der Luftfahrt und mehr eingeführt. Kurz gesagt, es ist allgegenwärtig. Die am weitesten verbreitete Form von Ethernet verwendet mehrpaarige elektrische Übertragungsleitungen und die jüngsten Entwicklungen haben zu Single-Pair-Ethernet (SPE) geführt, welches zunehmend in der Automobil- und Industrieautomatisierungsbranche Anwendung findet.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen SPE und anderen Twisted-Pair-Systemen ist die gemeinsame Verwendung von kapazitiver Kopplung (CC) anstelle von einem Trennübertrager im Front-End. Obwohl es einige offensichtliche Vorteile bei der kapazitiven Kopplung gibt (z.B. wenn keine Anforderungen an die Hochspannungsisolierung zu erfüllen sind und dadurch eine kleine Größe und niedrigere Kosten möglich sind), sind bei einigen Anwendungen Bedenken hinsichtlich der Leistung dieses Ansatzes aufgetreten.

Während frühere Generationen von 802.3-Standards für Ethernet über Twisted Pair spezifische Anforderungen für die Gleichtaktunterdrückung (CMR) an der medienabhängigen Schnittstelle (MDI) festlegen, tun dies die neueren xBASE-T1-Spezifikationen (für SPE) nicht. Dies ist durchaus sinnvoll, da es den Einsatz von SPE in Umgebungen erleichtert, in denen z.B. CAN- oder LIN-Systeme Alternativen sind. SPE kann dabei jedoch in verrauschten Umgebungen eingesetzt werden, in denen kapazitive Kopplung und Common-Mode Choke (CMC)-Front-End-Schaltungen möglicherweise nicht genügend Gleichtaktunterdrückung (CMR) bieten, um die Verbindung zu schützen. Aufgrund von Interferenzen, die in verrauschten Umgebungen leicht zu finden sind, können Kommunikationsausfälle oder eine vollständige Signalblockierung auftreten.

Wir zeigen hier, dass die Single-Pair-Ethernet Trennübertrager von HALO die Störanfälligkeitsprobleme von Systemen mit kapazitiver Kopplung und Gleichtaktdrossel (CC+CMC) effektiv beseitigen und wir stellen fest, dass Trennübertrager auch eine kompaktere Lösung bieten, wenn der Bedarf nach einer höheren Isolation besteht, da Kondensatoren in diesem Fall automatisch ziemlich groß ausfallen und die Preisfrage relativiert sich damit im gleichen Zug.

## Vergleich der CMR-Leistung

Die gebräuchlichste SPE-Front-End-Isolationsschaltung besteht aus einem Paar Kondensatoren und einem CMC, um empfangenes Rauschen zu unterdrücken und Emissionsstandards zu erfüllen (Abbildung 1). Ab 10 MHz bietet er eine gute Gleichtakt-Rauschunterdrückung, fällt aber unterhalb von 10 MHz etwas ab (Abbildung 3).

Ein Trennübertrager hingegen kann eine erheblich verbesserte Gleichtakt-Rauschunterdrückung bis hinab zu Gleichstrom bieten und in Kombination mit einem CMC (Abbildung 2) ist die Rauschunterdrückung über das gesamte Frequenzband akzeptabel (Abbildung 3).

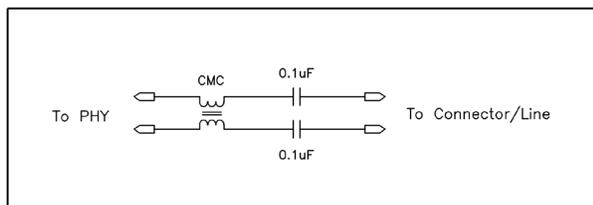


Abbildung 1: CC + CMC-Kopplungsschaltung

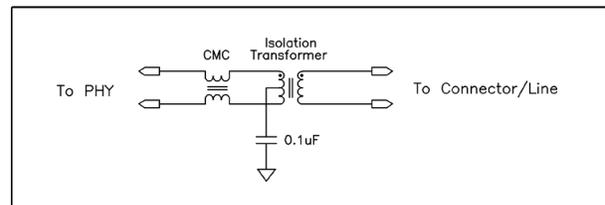


Abbildung 2: Trennübertrager + CMC-Kopplungsschaltung

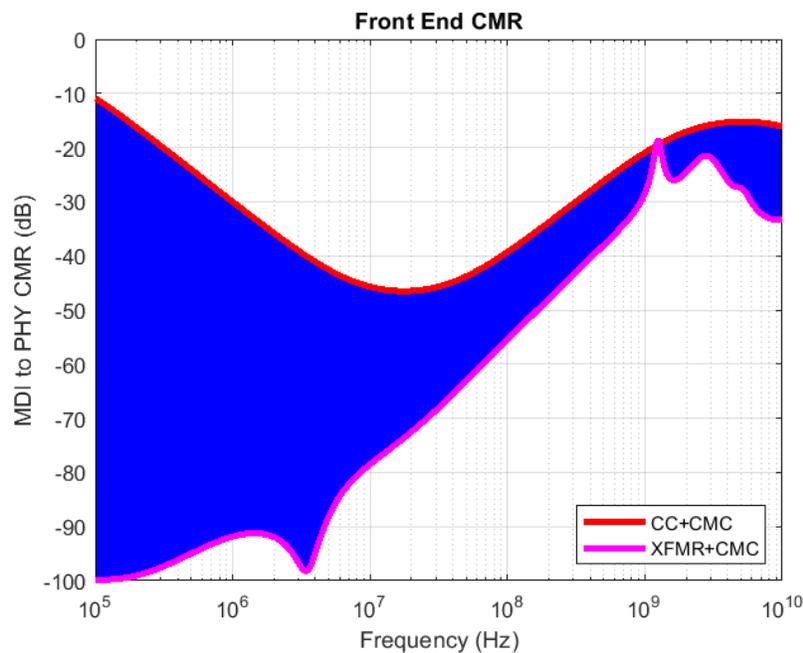


Abbildung 3: Vergleich von CMR einer CC+CMC-Kopplungsschaltung und Trafo+CMC Koppelschaltung

Abbildung 3 zeigt, dass das durch hinzufügen eines Trennübertragers die CMR bei niedrigen Frequenzen genau dort stark verbessert, wo die CMR der CC+CMC-Kopplung eine erhebliche Schwachstelle bildet.

## Störumgebungen

Verschiedene Interferenzumgebungen werden in einer Reihe von Standards zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) beschrieben und können eine nützliche Ressource zum Abschätzen der Gefahren sein, denen man unter bestimmten Umständen wahrscheinlich begegnen wird. In Umgebungen, in denen große Mengen elektrischer Energie erzeugt, transportiert, verbraucht oder (insbesondere) geschaltet werden, kann unterhalb von 10 MHz viel Rauschen erzeugt werden. Beispiele für Umgebungen in denen dies der Fall sein kann, sind Fertigungsstraßen, Maschinenhallen, Luft-, See-, Straßen- und Schienenfahrzeuge, Stromerzeugung, Umspannwerke und Schalträume, um nur einige zu nennen. SPE für Automatisierungssteuerungen kann unter 10 MHz auf viel Rauschen stoßen.

Die Einzelheiten der Pegel und des Spektrums der zu erwartenden Interferenz hängen natürlich von den Besonderheiten der Umgebung ab, in der ein System eingesetzt werden soll. Die Art der Quellen und Mechanismen der Einkopplung von Störungen auf Signalleitungen tauchen jedoch immer wieder als gemeinsame Themen in EMV-Prüfnormen und -Empfehlungen auf. Diese beinhalten:

1. Funkübertragung durch absichtliche Ausstrahlung
2. Kopplung von benachbarten Kommunikationskreisen
3. Kopplung von nahe gelegenen Stromkreisen
  - A. Kontinuierliche Störung
  - B. Schalttransienten
  - C. Kapazitive Kopplung
  - D. Induktive Kopplung
4. Gemeinsame Masserückpfade

Die erste davon, die absichtliche Übertragung, umfasst nicht nur Fernseh-, Radio- und Radarübertragungen, sondern auch Emissionen von tragbaren Funkgeräten wie Mobiltelefonen, Walkie-Talkies und Funksteuerungssendern. Als Bedrohung für die Integrität eines Systems stellen tragbare Geräte eine etwas andere Herausforderung dar als der öffentliche Rundfunk. Es kann mit einer SPE-Verbindung sehr gut verglichen werden und der resultierende Interferenzpegel kann sehr hoch sein. Die Normen (Anhang B – Relevante EMV-Normen) unterscheiden sich in ihrer Bewertung des Spektrums und des Interferenzpegels, dem ein System standhalten sollte und es gibt verschiedene Möglichkeiten die Interferenz zu Testzwecken in ein System einzubringen. Dennoch kann mit Vorsicht ein aussagekräftiger Vergleich angestellt werden (Abbildung 4) und verdeutlicht die Auswirkungen unterschiedlicher Umgebungen auf die CMR Anforderungen.

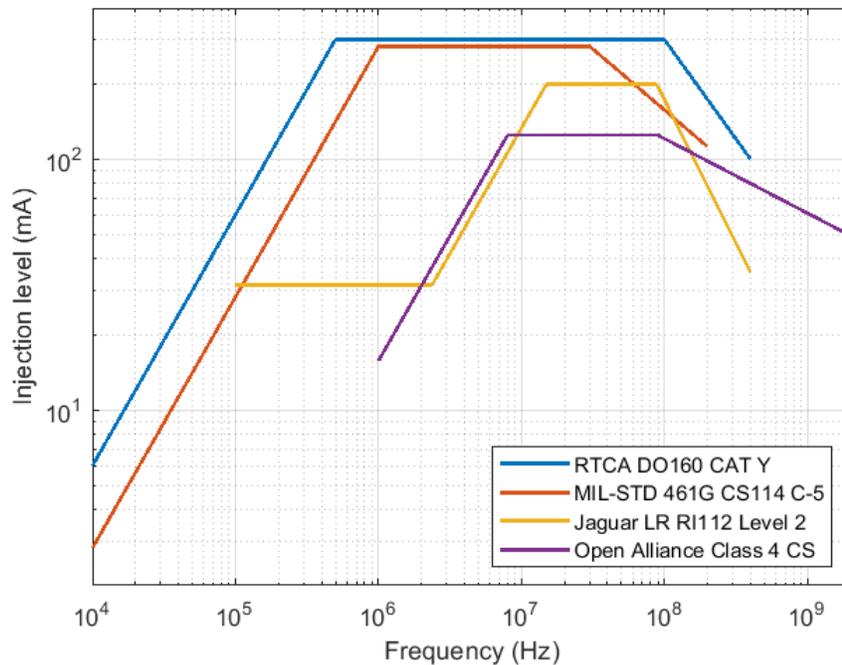


Abbildung 4: Vergleich der leitungsgebundenen Störfestigkeitsgrenzwerte für verschiedene EMV-Normen

Die obige Abbildung vergleicht verschiedene Empfehlungen für leitungsgebundene Störfestigkeitsgrenzwerte auf Signalleitungen gegenüber Funkübertragungen (Anhang B – Relevante EMV-Normen). Um Vergleiche zwischen Tests zu ermöglichen, werden die Pegel auf einen Strom (in mA) bezogen, der an eine 50 Ohm Gleichtaktlast am MDI, z.B. dem Anschluss für das zu testende Gerät (EUT), geliefert würde. Die meisten Normen hier empfehlen Grenzwerte bei 100kHz von 30 mA oder mehr. Dieser Interferenzpegel würde eine Modulationsspitze (bei einer 80% AM Modulationstiefe) von 1,4V RMS in der 25 Ohm Gleichtaktimpedanz eines CC+CMC-SPE-Frontends in diesem Band entwickeln. Im Gegensatz dazu wäre ein Front-End, das einen Trennübertrager verwendet, völlig immun gegen Störungen bei viel höheren Pegeln als diesem.

Der obige Vergleich geht jedoch nicht auf wichtige Unterschiede bei der Klasse der Interferenzkopplungsmechanismen ein. Die magnetische Nahfeldkopplung reagiert bei niedrigen Frequenzen schlecht auf eine Abschirmung mit dünnen Folien. Obwohl es bei der Unterdrückung von Störungen bei elektromagnetischen Interferenzen (EMI) wirksam ist, ist es bei niedrigen Frequenzen für ein Feld, das im Wesentlichen magnetischer Natur ist, viel weniger effektiv. Solche Felder entstehen, wenn große Ströme in Leitern fließen und sich über einen kleinen Bruchteil ( $< 1/6$ ) einer Wellenlänge um die Quelle herum erstrecken. Trotzdem kann dieser „kleine“ Bruchteil bei einer langen Wellenlänge ziemlich groß werden, z.B. bei 10 MHz beträgt die Wellenlänge 30 Meter und davon sind  $1/6$  immer noch 5 Meter. Eine kritische Frequenz tritt auf, wenn die sogenannte „Eindringtiefe (Skin-Depth)“ die Dicke des Abschirmleiters überschreitet. Ein Aluminiumleiter auf einem Folienband, das ein verdrehtes Paar abschirmt, kann beispielsweise 10 Mikrometer dick sein und die Eindringtiefe übersteigt 10 Mikrometer bei einer Frequenz von 67 MHz oder weniger. Der Schirm wird mit abnehmenden Frequenzen darunter abnehmend wirksam.

Systeme mit Abschirmung können EMV-Tests mit induktiver Kopplung, wie z. B. Bulk Current Injection (BCI), bei niedriger Frequenz nicht bestehen, wo sie einen ähnlichen Test auf einem scheinbar gleichwertigen Niveau mit einem anderen Kopplungsansatz bestehen können.

## Störfestigkeitsprüfungen

Um den Einfluss niedriger Frequenzstörungen auf kapazitiv gekoppelte SPE zu demonstrieren, wurde ein kontrollierter Vergleichstest zwischen einem System mit kapazitiver Kopplung und einem System mit Trennübertragern durchgeführt. Für den Test wurde ein DP83TG720 1000BASE T1-Medienkonverter-Evaluierungsmodul von Texas Instruments ausgewählt. Es handelt sich um ein leicht verfügbares Gerät mit höherer Geschwindigkeit, das leicht modifiziert werden kann. Koppelkondensatoren können einfach durch einen HALO 2,5GBASE-T1-Trennübertrager ersetzt werden. Unser Testaufbau ist in Abbildung 5 dargestellt.

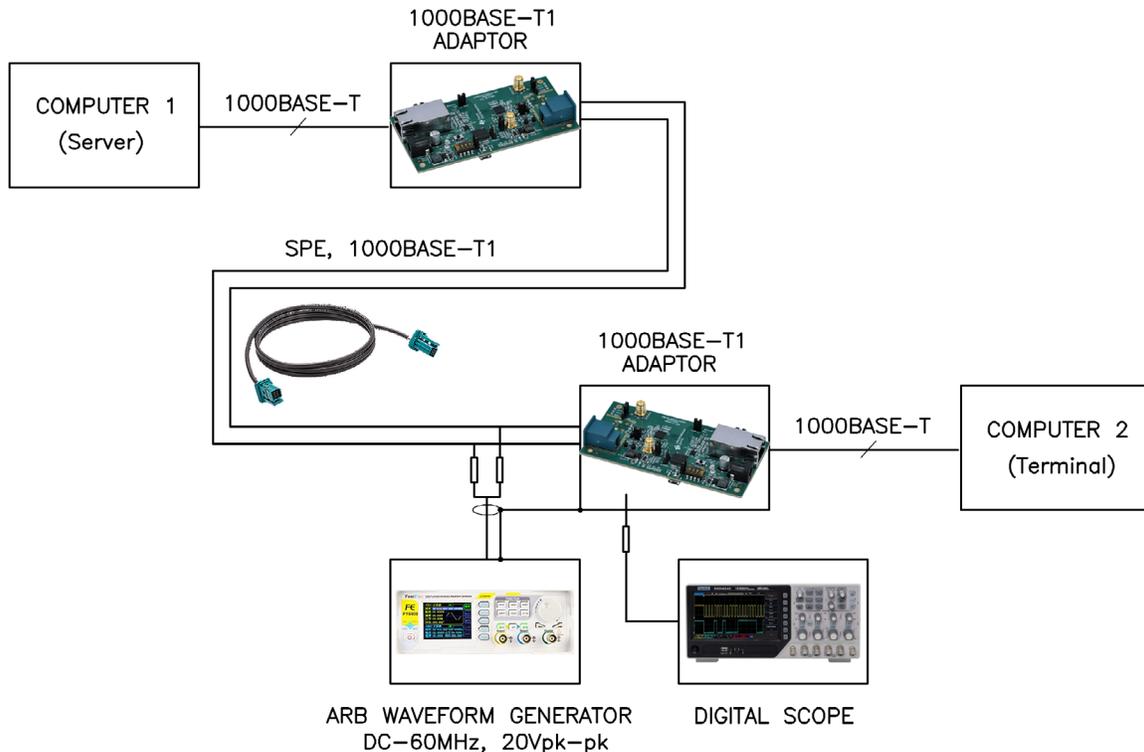


Abbildung 5: Testaufbau. Wir haben die IPERF3-Server- und -Client-Software auf Laptops verwendet, um eine 1000BASE-T1-Verbindung zwischen den TI-Medienadaptern und einem FY6900-DDS-Arbitrary-Waveform-Generator (AWG) zu testen und Gleichtaktstörungen über 120-Ohm-Widerstände an das MDI zu koppeln.

Wir haben Tests mit der Methode der Direct Power Injection (DPI) durchgeführt, ähnlich der Beschreibung in der Open Alliance IEEE ,1000BASE-T1 EMC Test Specification for Transceivers, Version 2.1', Abschnitt 3.1.3 Immunität gegen HF Störungen. Wie beim Direct Injection Mechanismus der IEC 61000- 4-6, „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-6: Prüf- und Messverfahren – Störfestigkeit gegen leitungsgeführte Störungen, induziert durch hochfrequente Felder“, verzichteten wir jedoch auf eine Kopplung mit Kondensatoren. Andere Unterschiede bestehen darin, dass wir über den Frequenzbereich DC bis 60 MHz getestet haben und eine elektromotorische Kraft (EMK) mit konstanter Welle (CW) von max. 8,5 V RMS an der 50 Ohm Quelle (+25 dBm), im Gegensatz zu einer EMK von bis zu 40 V RMS (+39 dBm) mit einer 1kHz Sinuswellen-Amplitudenmodulation (AM) von 80 % Modulationsgrad auf einem Träger im Bereich von 1 MHz – 2 GHz, verwendet haben.

Wir haben in unseren Tests festgestellt, dass die Kommunikation auf einer Verbindung zwischen unmodifizierten kapazitiv gekoppelten + CMC-Adaptoren durch Gleichtaktstörungen von nur 0,7V RMS Konstantwelle (CW) am Anschluss (Media Dependent Interface, MDI) vollständig blockiert war. Im Gegensatz dazu haben wir festgestellt, dass wir mit dem von uns verwendeten Kit die Kommunikation bei keiner Frequenz (DC ... 60 MHz) oder Interferenzpegel (bis zu 8,5 V RMS am MDI) stören können, wenn ein Trennübertrager anstelle von Koppelkondensatoren verwendet wird. Siehe Anhang A für weitere Testdetails.

Obwohl eine kapazitiv gekoppelte Front-End-Schaltung die Open Alliance-Empfehlungen problemlos erfüllen kann, zeigt unsere Demonstration, dass Störungen bei niedrigeren Frequenzen, die üblicherweise von anderen EMV Empfehlungen abgedeckt werden, dazu führen, dass die Kommunikation blockiert wird. Dies ist ein Problem das sich bei höheren Geschwindigkeiten noch verschärft, da es zunehmend schwieriger wird, CMR bei niedrigen Frequenzen mit einem CMC auszustatten, wenn es gleichzeitig für höhere Frequenzen erforderlich ist. Im Kapitel ‚Störumgebungen‘ finden Sie eine Liste mit EMV-Empfehlungen verschiedener Stellen.

Wir haben ebenfalls untersucht, welche Leistung man in Tests zur Immunität gegenüber schnellen Transienten durch Simulation erwarten könnte. Das ist die Art von Störungen die entstehen, wenn elektrische Maschinen eingeschaltet werden. Wir fanden heraus, dass ein CC+CMC-Frontend bei dieser Art von Interferenz leicht mit externen kapazitiven Kopplungsstrukturen in Resonanz treten würde, was zu problematischen Schwingungen mit großer Amplitude führen würde. Im Gegensatz dazu war es offensichtlich, dass die Platzierung eines Trennübertragers das Auftreten einer solchen Resonanz verhindern würde. Unsere Studie zeigt auch, dass ein CMC für ein abgeschirmtes System mit Trennübertragern möglicherweise nicht mehr erforderlich ist und entfallen kann. Weitere Informationen finden Sie in Anhang A – Tests und Simulationen im Detail.

## Zusammenfassung

Unsere Tests zeigen deutlich einen signifikanten Vorteil für Trennübertrager gegenüber kapazitiver Kopplung in ihrer Fähigkeit niederfrequente Störungen zu tolerieren, die in verrauschten Umgebungen auftreten können. Obwohl unsere Tests keine höheren Frequenzen und Amplituden abdeckten, reicht es aus zu bestätigen, dass Trennübertrager mit SPE auf die gleiche Weise verwendet werden können, wie für andere Formen von Ethernet über Twisted Pair und ihr Einsatz typischerweise die Störanfälligkeit beseitigt (CC+CMC-Systeme leiden darunter). Die Fähigkeit, eine galvanische Trennung bereitzustellen, die die UL-Sicherheitsanforderungen für höhere Isolation in einem kompakten Gehäuse erfüllt, ist ein weiterer entscheidender Vorteil von Trennübertragern gegenüber kapazitiver Kopplung. Für SPE mit Power over Data Lines (PoDL)-Anwendungen, zwischen dem Trennübertrager und den leistungseinspeisenden Induktivitäten, sind DC-Sperrkondensatoren erforderlich. Dies hat jedoch keine Auswirkungen auf die CMR-Leistung.

Jüngste und geplante Entwicklungen bei SPE für höhere Geschwindigkeiten machen es schwieriger mit einer kapazitiv gekoppelten+CMC-Schaltung eine angemessene CMR für eine verrauschte Umgebung zu erreichen. Das sah bei Systemen mit niedrigerer Geschwindigkeit anders aus. Obwohl es eine Herausforderung sein kann, die erforderliche Bandbreite in Trennübertragern für diese Systeme mit höherer Datenrate zu erreichen, hat UWBX eine zum Patent angemeldete Technologie entwickelt, die HALO unter Lizenz für seine Reihe von Hochgeschwindigkeits-Ethernet-Trennübertragern verwendet, wie z. B. 2.5GBASE-T1 (<https://www.haloelectronics.com/2-5gbase-t1-isolation-transformers/>) und 25/40GBASE-T Isolationsmodul (<https://www.haloelectronics.com/25g-40g-isolation-transformer/>).

# Anhang A - Tests und Simulationen im Detail

## Detaillierter Vergleich der CMR-Leistung

Unser Test bestätigt, dass die Verbesserung der CMR bei niedriger Frequenz mit einem Trennübertrager ohne Gleichakttdrossel für die meisten Anwendungen durchaus ausreichend sein kann, insbesondere wenn auch ein Schirm (geschirmtes Kabel) verwendet wird. Ein detaillierter Vergleich der CMR-Leistung in verschiedenen Konfigurationen ist unten dargestellt.

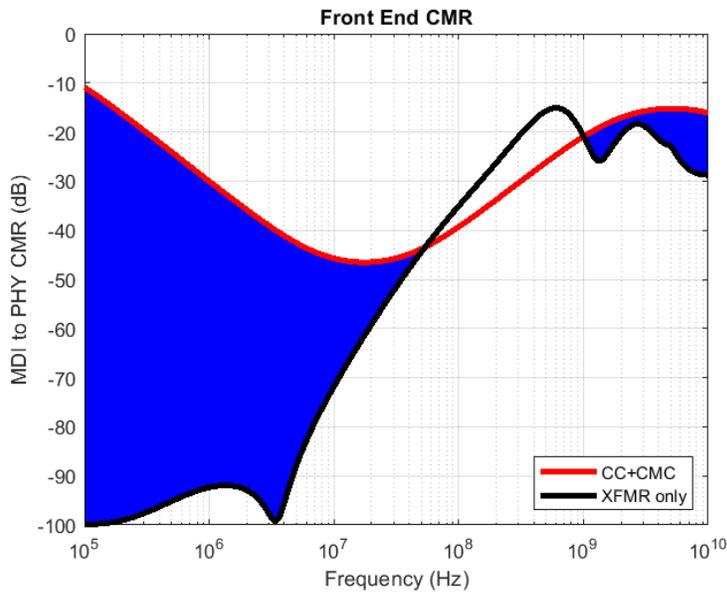


Abbildung 6: CC+CMC vs. Nur Übertrager

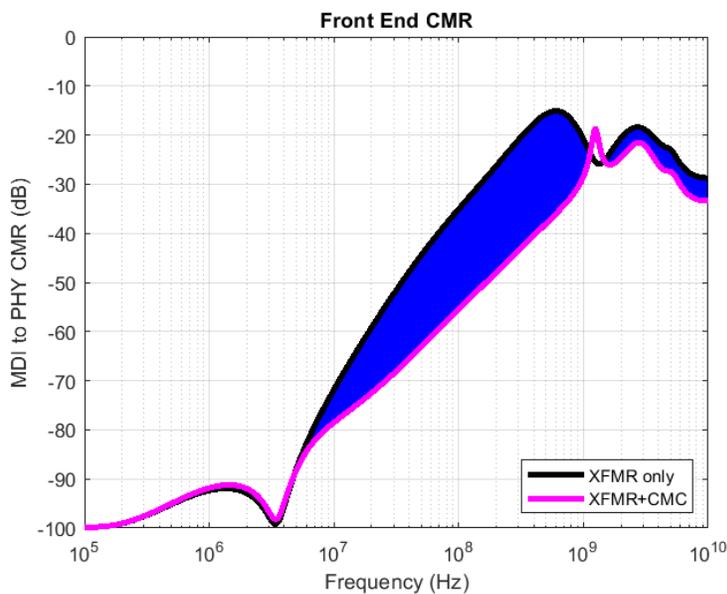


Abbildung 7: Nur Übertrager vs. Übertrager+CMC

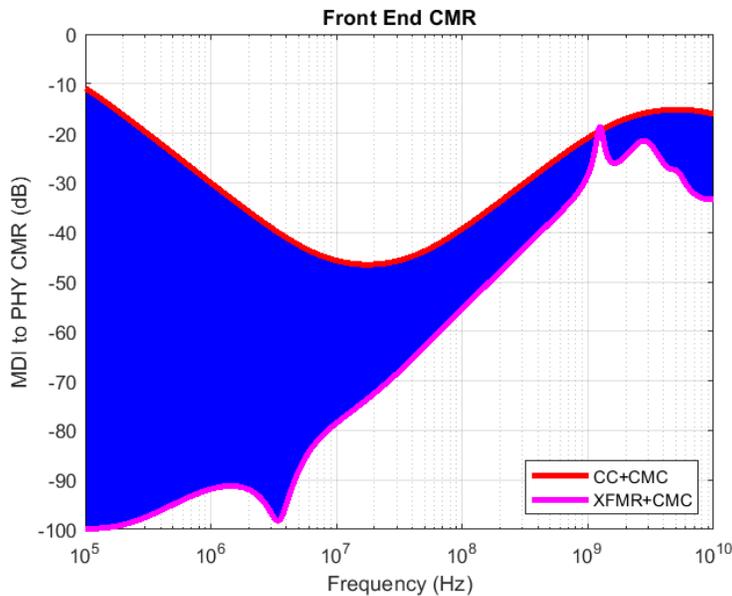


Abbildung 8: Übertrager+CMC vs. CC+CMC

Ein weiterer Vorteil eines Trennübertragers besteht darin, dass man durch die Platzierung eines Übertrager-Mittelabgriffs auf Masse auf der Leitungsseite die Anzahl der Komponenten reduzieren kann, die für die Gleichtakt- und ESD-Ableitung benötigt werden.

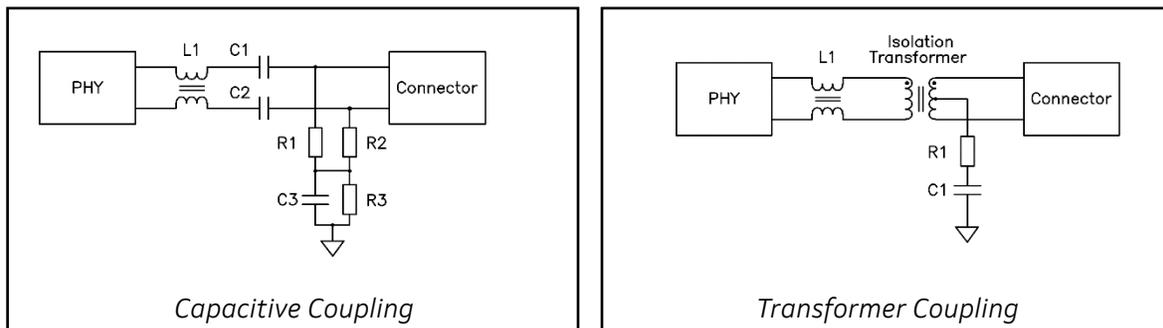


Abbildung 9: Vergleich von ESD-Schutzschaltungen für kapazitive Kopplung und Übertrager kopplung

## Test durch Direct Power Injection (DPI) im Detail

Wir haben die Störfestigkeit eines DP83TG720 1000BASE T1-Medienkonverters von Texas Instruments bewertet, der CC+CMCs zur Bereitstellung von Isolation und CMR verwendet und mit einer Einheit verglichen, die durch Ersatz der Koppelkondensatoren durch Trennübertrager modifiziert wurde.

Wir haben festgestellt, dass die Einführung eines Trennübertragers die Störfestigkeit des Gerätes deutlich verbessert. Die Kommunikation wurde auf einer Verbindung zwischen unmodifizierten CC+CMC-Adaptern durch Gleichtaktstörungen von nur 0,7 V RMS am Anschluss (MDI) vollständig blockiert. Im Gegensatz dazu stellten wir fest, dass wir mit dem von uns verwendeten Kit die Kommunikation bei keiner Frequenz (DC - 60 MHz) oder Interferenzpegel (bis zu 8,5 V RMS am MDI) stören konnten. Dies ist im Diagramm unten in Bezug auf die Störleistung der 50 Ohm Quelle in dBm dargestellt (Abbildung 10).

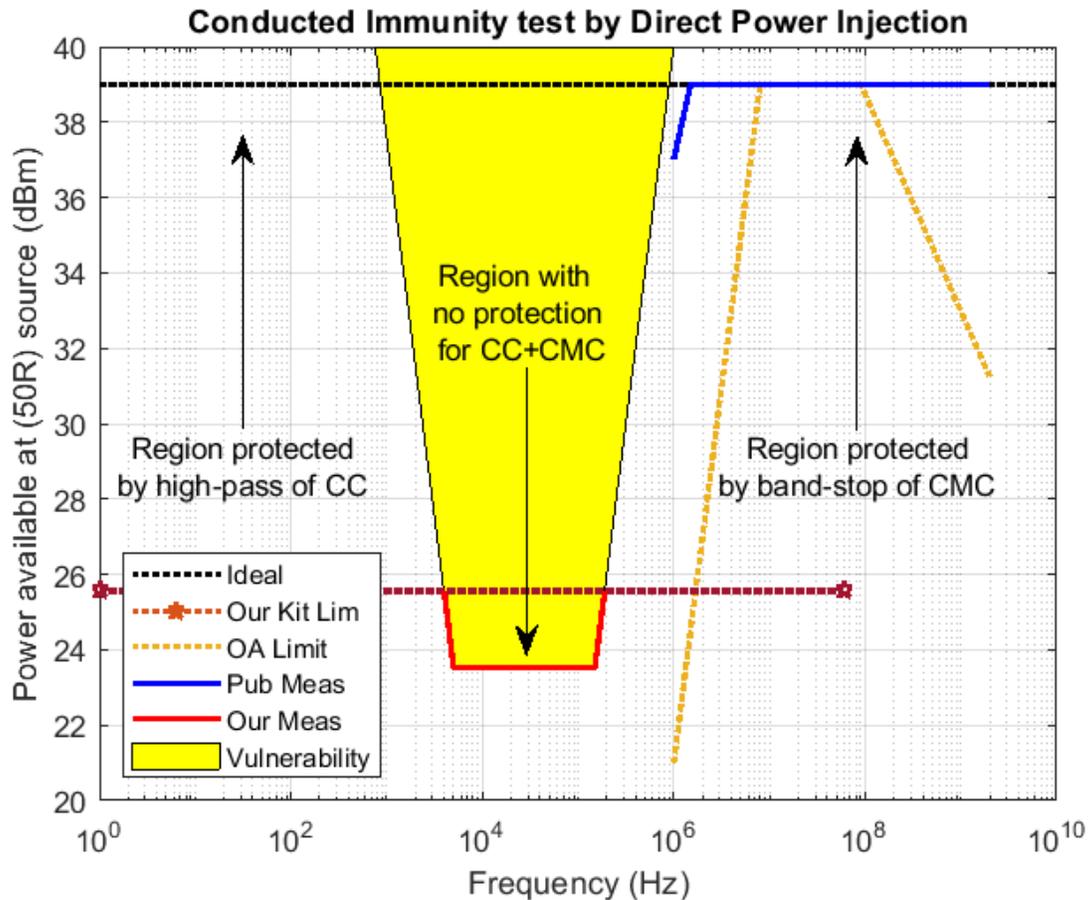


Abbildung 10: DPI-Testergebnisse

Während die CC+CMC-Leistung in den veröffentlichten Ergebnissen (blaue Linie) den Open Alliance-Empfehlungen entspricht, zeigt unsere Messung, dass es unterhalb von 1 MHz einen großen Bereich (durchgehend gelb) gibt, der anfällig für Rauschen ist. Die Wirksamkeit des Einsatzes eines Trennübertragers ist erstaunlich klar.

## Simulation der Anfälligkeit auf Transienten

Wir haben die Leistung eines CC+CMC-Frontends in einer typischen EMV-Empfehlung für die Immunität gegenüber transienten Störungen simuliert. Wir haben unsere Simulation auf IEC 61000-4-4 Teil 4-4: Prüf- und Messtechniken – Prüfung der Störfestigkeit gegen elektrische schnelle Transienten/Bursts gestützt.

IEC 61000-4-4 beschreibt die Anwendung eines Bursts von 75 Impulsen mit großer Amplitude (240V – 3,8kV), jeder mit einer Anstiegszeit von nominell 5ns und einer Breite von nominell 50ns, wiederholt (alle 300ms) kapazitiv gekoppelt (ca. 100pF) an eine Kabelkonfektion über eine kapazitive Klemme oder direkt an den Schirm oder gemeinsam mit jedem Zweig eines verdrehten Paares durch diskrete Kondensatoren von einer 50 Ohm Quelle. Wir simulierten die Kopplung direkt an jeden Zweig eines verdrehten Paares durch diskrete 100pF Kondensatoren von einer 50 Ohm Quelle und beobachteten die Reaktion auf einen einzelnen Impuls.

Wir haben festgestellt, dass bei einem ungeschirmten Twisted Pair, wie in unserer Simulation, weder ein CMC allein noch ein Übertrager allein die Schaltung ausreichend vor Störungen dieser Art schützen können. In jedem Fall überschreiten Ausschläge des Störsignals an den PHY-Pins den Begrenzungspegel und würden als Ergebnis die Kommunikation zumindest vorübergehend blockieren. Allerdings unterscheidet sich die Störung die zum Silizium durchbricht (z.B. Pins des PHY oder externe Schutzdioden) für einen CC+CMC (Abbildung 12) erheblich von der eines Trennübertragers allein (Abbildung 13). Im Fall eines CC+CMC-Front-Ends kann im Verlauf eines transienten Bursts eine beträchtliche Ladung in die Versorgungsschienen entladen werden und es ist nicht unvorstellbar, dass ein einfacher PHY-Reset das Problem lösen kann und nicht ein Aus- und Wiedereinschalten erforderlich wäre, um das System zurückzusetzen.

Im Gegensatz dazu ist es unwahrscheinlich, dass ein vermeintlicher Umweg mit einem Übertrager bei einem Transienten etwas Schlimmeres als einige Paketfehler verursachen würde. Das Spektrum der Reststörungen bei einem CC+CMC-Frontend zentriert sich auf einer viel niedrigeren Frequenz als bei einem Frontend, das einen Trennübertrager enthält. Infolgedessen kann die Reststörung eines CC+CMC-Frontends durch Abschirmung des Twisted-Pair nicht wesentlich verbessert werden. Im Gegensatz dazu würde eine Abschirmung bei der Verwendung eines Trennübertragers die Reststörungen wirksam beseitigen.

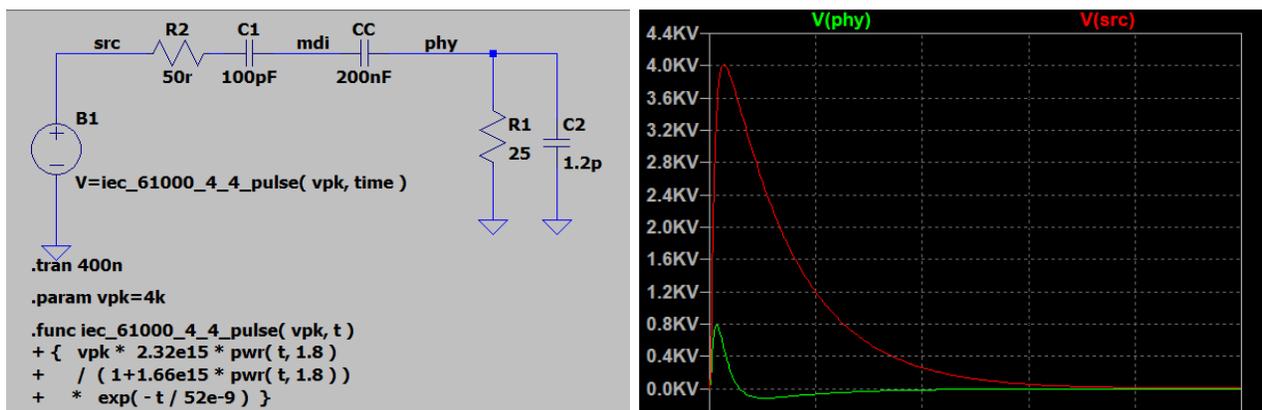


Abbildung 11: Ein Transient, der auf ein Gerät ohne CMC angewendet wird, verursacht offensichtlich ein Problem. Wir simulieren mit einem einzigen maximalen Amplituden-Störimpuls aus der von IEC 61000-4-4 vorgeschriebenen Wellenform. Wird er an ein Gerät ohne CMC angelegt, würde die Interferenz an den PHY-Pins 0,8 kV erreichen, wenn diese nicht vorher unterdrückt werden würde.

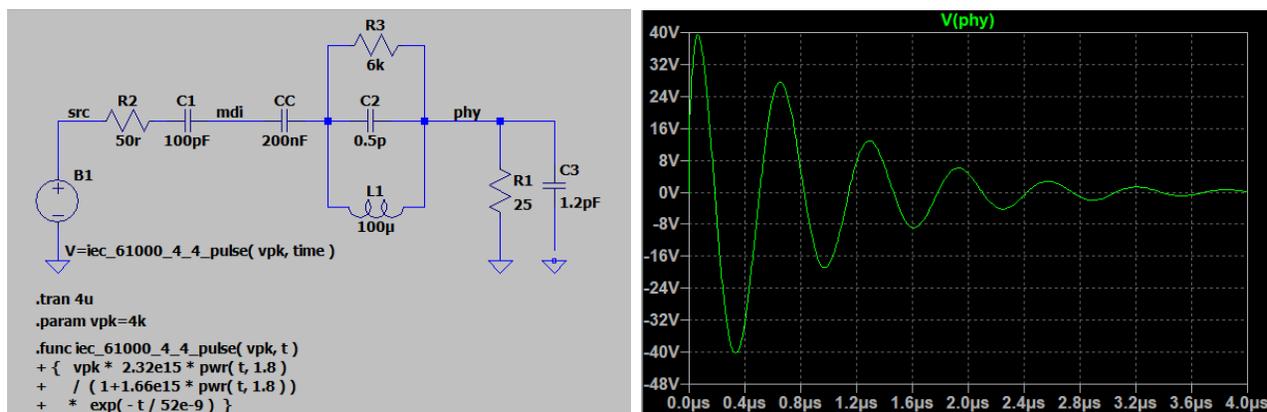


Abbildung 12: Transiente Störungen, die auf ein Gerät mit CC+CMC angewendet werden, sind immer noch problematisch. Wenn sie nicht begrenzt werden, könnte es zu einer Überspannung von 40 V am Silizium kommen. Bei Kopplung mit einem Front-End mit einem 100µH CMC, aber ohne Trennübertrager, bilden die 100pF Quellenkapazität und die CMC Induktivität einen Reihenresonanzkreis mit  $1/(2\pi\sqrt{LC})=1,6$  MHz. Das Antwortverhalten mag zu langsam sein, um hinreichend über eine dünne Abschirmung gedämpft zu werden.

Bei einem CC+CMC-Front-End gibt es wenig bis gar keine Dämpfung bei jeglicher Frequenz der Serienresonanz zwischen einer Kopplungsstruktur außerhalb des Geräts und dem CMC innerhalb des Geräts. Ein Gleichtaktimpuls, der diese Eigenresonanz anregt, würde zu einer Unterbrechung der Kommunikation führen – entweder durch Verursachung von Paketfehlern oder durch anderweitige Unterbrechung der ordnungsgemäßen Funktion des Geräts (z.B. durch einen herbeigeführten Hardware Reset).

Wird als Ersatz ein Trennübertrager anstelle eines CC+CMC im Frontend eingesetzt, wird diese Resonanz verhindert. Trotzdem wird es immer noch einen bedeutenden Ausschlag geben, wenn auch von sehr kurzer Dauer. Eine richtig funktionierende Abschirmung würde diesen Hochgeschwindigkeitsimpuls sehr gut dämpfen.

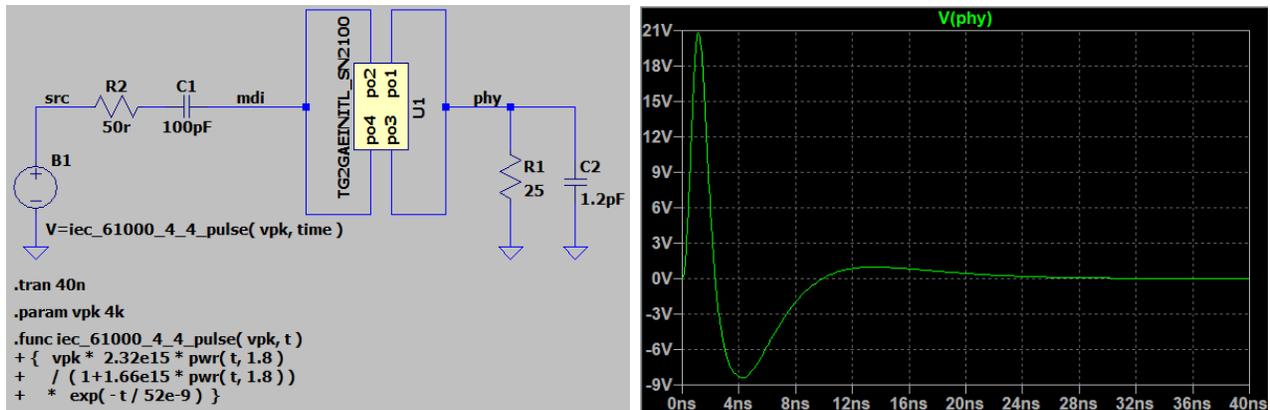


Abbildung 13: Ein Trennübertrager allein reicht nicht aus, um den wiederholten Verlust von Paketen während einer Transiente zu verhindern. Das Vorhandensein einer funktionierenden Abschirmung würde diesen schnellen Ausschlag jedoch sehr gut dämpfen.

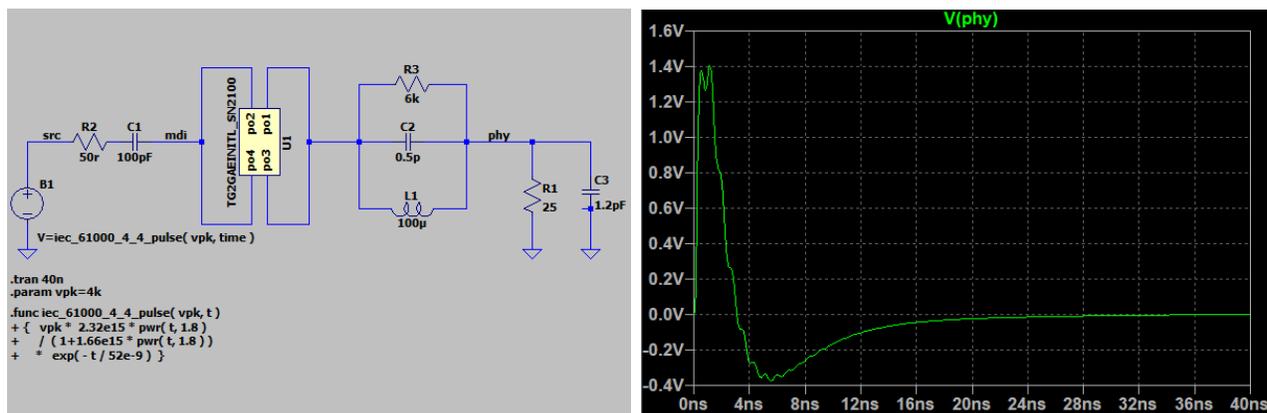


Abbildung 14: Der Einsatz eines Trennübertragers zwischen dem MDI und dem CMC (was zu einer Übertrager+CMC Konfiguration führt) verhindert, dass die externe Kopplungsstruktur mit dem CMC in Resonanz tritt und ist wirksam für eine weitere Dämpfung der Interferenz.

Bei einem Übertrager+CMC sind die verbleibenden Störungen am PHY sicherlich klein genug, um durch eine Abschirmung des Twisted Pair effektiv eliminiert werden zu können. Das CMC Design wurde jedoch nicht für die Verwendung in Kombination mit einem Trennübertrager optimiert und gibt weitere Möglichkeiten die Gesamtleistung noch weiter zu verbessern.

Eine einfache Optimierung des CMC-Modells (Reduzierung von L und C um den Faktor 3) liefert einen Hinweis darauf, was möglich sein sollte, indem einfach die CMC-Designparameter modifiziert werden.

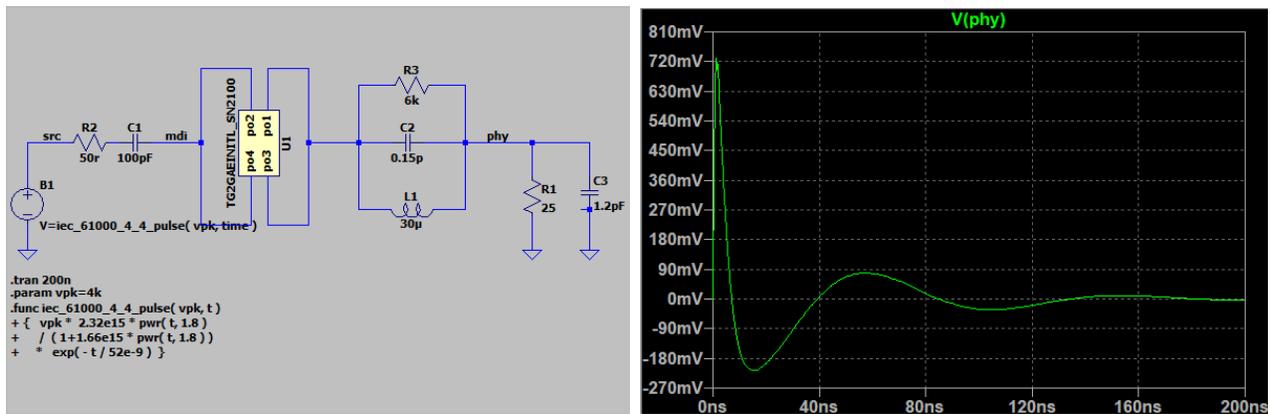


Abbildung 15: Eine kleine Änderung am CMC-Design würde ausreichen, um Paketverluste zu verhindern, selbst wenn keine Abschirmung vorhanden ist oder ausfallen sollte.

## Anhang B – Relevante EMV-Normen

Unsere Demonstration zeigt, dass SPE-Systeme, die keine Trennübertrager verwenden, zwar einige EMV-Empfehlungen erfüllen, jedoch bei anderen auf Probleme stoßen würden.

IEEE 802.3	<b>IEEE-STANDARD FÜR ETHERNET</b>
	12.5.3.2.5 Gleichtaktunterdrückung – 1BASE5, +/- 20 V pk Rechteckwelle: 40+ kHz
	14.3.1.3.5 Gleichtaktunterdrückung – 10BASE-T, 25 V pp Rechteckwelle @ < 500 kHz
	32.6.1.3.6 Gleichtaktunterdrückung – 100BASE-T2, 25 V pp Rechteckwelle bei < 500 kHz
	40.6.1.3.3 Gleichtaktunterdrückung – 1000BASE-T, 1 V rms @ 1 – 250 MHz CC
	55.5.4.3 Gleichtaktunterdrückung – 10GBASE-T, +6 dBm 80 – 1000 MHz CC
	113.5.4.3 Unterdrückung externer EM-Felder – 25/40GBASE-T 80 – 2000 MHz CC
	126.5.4.3 Unterdrückung externer EM-Felder – 2,5/5GBASE-T 80 – 2000 MHz CC
ISO 7637-3	Straßenfahrzeuge – Elektrische Störungen durch Leitung und Kopplung – Teil 3: Elektrische transiente Übertragung durch kapazitive und induktive Kopplung über andere Leitungen als Versorgungsleitungen
ISO 11442-4	Straßenfahrzeuge – Komponentenprüfverfahren für elektrische Störungen durch schmalbandig abgestrahlte elektromagnetische Energie – Teil 4: Verfahren zur Erregung von Kabelbäumen
IEC 61000-4-4	Teil 4-4: Prüf- und Messtechniken – Prüfung der Immunität gegen schnelle elektrische Transienten/Bursts
IEC 61000-4-6	Teil 4-6: Prüf- und Messverfahren – Störfestigkeit gegen leitungsgeführte Störungen, induziert durch hochfrequente Felder
IEC 61000-4-12	Teil 4-12: Prüf- und Messtechniken – Prüfung der Störfestigkeit gegen Ringwellen
IEC 61000-4-16	Teil 4-16: Prüf- und Messtechnik – Prüfung der Störfestigkeit gegen leitungsgebundene Gleichtaktstörungen im Frequenzbereich 0 Hz bis 150 kHz
IEC 62132-4	Integrierte Schaltungen - Messung der elektromagnetischen Störfestigkeit 150 kHz bis 1 GHz - Teil 4: Direktes HF-Leistungsinjektionsverfahren
IEC 62215-3	Integrierte Schaltungen - Messung der Stoßfestigkeit - Teil 3: Verfahren zur nicht synchronen transienten Einspeisung
MIL-STD-461G	<b>ANFORDERUNGEN AN DIE KONTROLLE DER EIGENSCHAFTEN ELEKTROMAGNETISCHER STÖRUNGEN VON TEILSYSTEMEN UND GERÄTEN</b>
	CS114, leitungsgeführte Anfälligkeit, Bulk-Kabelinjektion
	CS115, leitungsgebundene Suszeptibilität, Massekabeleinspeisung, Impulserregung
	CS116, leitungsgebundene Störfestigkeit, gedämpfte sinusförmige Transienten, Kabel und Stromleitungen

RTCA DO-160G	<b>UMWELTBEDINGUNGEN UND PRÜFVERFAHREN FÜR FLUGGERÄTE</b>
	19.3.3, In Verbindungskabel eingeführte Audiofrequenz-Magnetfelder
	19.3.4, In Verbindungskabel eingeführte elektrische Tonfrequenzfelder
	19.3.5, In Verbindungskabeln induzierte Spikes
	20.4, Hochfrequenzempfindlichkeit – Leitungsgeführter Empfindlichkeitstest (CS)
JLR-EMC-CS	<b>JAGUAR LAND ROVER – ENGINEERING STANDARD – ELEKTROMAGNETISCHE KOMPATIBILITÄTSSPEZIFIKATION FÜR ELEKTRISCHE/ELEKTRONISCHE KOMPONENTEN UND TEILSYSTEME</b>
	10.0, RI 112, RI 114, RI 115 – Hochfrequenzimmunität 100 kHz – 3,1 GHz
	12.0, RI 140 – Magnetfeldimmunität, 20 Hz – 150 kHz
	13.0, RI 130 – Gekoppelte Immunität – Transiente Störungen
	14.0, RI 150 – Gekoppelte Immunität – Dauerstörungen
	17.0, CI 250 – Immunität gegen Erdspannungs-Offset

*Tabelle 1: Auflistung einiger relevanter EMV-Empfehlungen. CC+CMC-Systeme würden typischerweise bei einer beträchtlichen Anzahl von diesen ausfallen, wohingegen Transformator+CMC-Systeme eine deutlich verbesserte Leistung bieten würden.*



HALO Electronics ist ein führender Anbieter von elektromagnetischen Komponenten  
<https://www.haloelectronics.com>



UWBX ist ein Technologieunternehmen, das sich auf die Entwicklung von IP für elektromagnetische Geräte spezialisiert hat  
<https://uwbx.co.uk>