

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich



Fabian Vornhagen, Martin Leihenseder, Robert Demharter,
Ismael Molina Alba, Simon Mark, Jairo Bustos, Matthias Fritsche

1. ETHERNET – VON VIER ADERNPAAREN ZU EINEM

Beginnend in den frühen 1980er Jahren als Kommunikation zwischen Computernetzwerken, ist der Ethernet Standard heute das am meisten verwendete Protokoll in der Industrie-kommunikation. Kupferkabel mit 2-Paaren für Fast Ethernet und 4-Paar-Kabeln für Gigabit Ethernet sind die Kernelemente in Unternehmens- und Industrienetzwerken. Mit der neuen Single Pair Ethernet (SPE)-Technologie, die aus der Automobilindustrie stammt, sind viele neue Anwendungsfälle möglich, um analoge Sensoranwendungen oder industrielle Bussysteme zu ersetzen (Abbildung 1).



Abbildung 1: IP20 Version des SPE Steckverbinders gemäß IEC 63171-6.

Im Jahr 2019 basieren etwa 59% aller industriellen Kommunikationsprotokolle auf Ethernet. Dennoch ist auch noch ein hoher Prozentsatz von Feldbussystemen wie Profibus oder CC Link (Control and Communication) im Einsatz. Viele Sensoren oder Aktoren innerhalb von Produktionsanlagen haben keine hohen Anforderungen an die Datenrate. Da die Entfernung zwischen diesen Geräten und den Feldswitches jedoch oft mehr als 200 m beträgt, stößt Ethernet mit einer maximalen Kabellänge von 100 m an seine Grenzen.

Neben der Kabellänge waren das (Kabel-)Gewicht, die mechanische Stabilität der Steckverbinder und die Reduzierung der Leiterplattengröße die Treiber, um neben dem RJ45-basierten Multi-Pair-Ethernet einen neuen Standard zu schaffen. Single Pair Ethernet (SPE) ist die

perfekte Antwort auf diese Marktanforderungen und ermöglicht die grenzenlose IP-basierte Kommunikation aus der Cloud zu jedem Sensor oder Aktor.

Diese Applikation Note beschreibt die Komponenten, die für Single Pair Ethernet vom Kabel bis zum PHY-Chip benötigt werden. Der Schwerpunkt wird auf das richtige EMI-Filterdesign für 10BASE-T1L und 100BASE-T1 und auf die Erfüllung der Kommunikationssicherheitsanforderungen gemäß IEC 62368-1 gelegt. Dies wird in einer Leiterplatte demonstriert, um die Wirksamkeit der Komponenten zu charakterisieren.

2. SPE-KOMPONENTEN

Die neue „physical layer“ für SPE benötigt neue Komponenten wie Kabel, Steckverbinder, Induktive Bauteile, Halbleiter und Geräte. Die internationalen Normungsorganisationen und die dahinterstehenden Unternehmen haben in den letzten Jahren viel Zeit und Geld investiert, um all diese Teile verfügbar zu machen. Die wichtigsten Normen sind bereits öffentlich verfügbar oder befinden sich in der Endphase. Auch die ersten Komponenten sind bereits einsatzbereit, so dass der Entwurf neuer Geräte mit SPE-Konnektivität möglich ist.

Die elektrischen Anforderungen für Single Pair Ethernet sind in den folgenden IEEE-Normen festgelegt:

- IEEE802.3cg (10BASE-T1) mit Bandbreite von 0,1 bis 20 MHz und Reichweite bis 1000 m.
- IEEE802.3bw (100BASE-T1) mit Bandbreite von 0,3 mit 66 MHz und Reichweite bis 40 m.
- IEEE802.3bp, (1000BASE-T1) mit Bandbreite von 1 bis 600 MHz und Reichweite bis 40 m.

2.1 Kabel

Basierend auf der benötigten Übertragungsgeschwindigkeit und der Linklänge sind zwei grundlegende Arten von SPE-Kabeln verfügbar und standardisiert.

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

Für 10 Mbit/s Netzwerke bis zu 1000 m Kabel spezifizieren diese Standards das Kabeldesign:

- IEC 61156-13 - SPE Datenkabel bis zu 20 MHz Bandbreite für feste Installation,
- IEC 61156-14 - SPE Datenkabel bis zu 20 MHz Bandbreite für flexiblere Installation.

Für 1 Gbit/s Netzwerke bis zu 40 m sind diese Standards verfügbar:

- IEC 61156-11 - SPE Datenkabel bis zu 600 MHz Bandbreite für feste Installation,
- IEC 61156-12 - SPE Datenkabel bis zu 600 MHz Bandbreite für flexiblere Installation.

Im Vergleich zu herkömmlichen Industrial-Ethernet-Kabeln der Kategorie 5e mit vier Paaren für die Übertragung von 1 Gbit/s sind Größe, Platz und Gewicht des Kabels deutlich reduziert (Tabelle 1).

Dimensionen	Industrial Ethernet Cat 5e (4 x 2 x 24 AWG)	SPE (1 x 2 x 22 AWG)	Einsparung
Außendurchmesser	7,8 mm	5,8 mm	26%
Gewicht	79 kg/km	42 kg/km	47%

Tabelle 1: Vergleich von Abmessung und Gewicht der SPE Kabel.

Alle diese Kabel sind geschirmt, um den erforderlichen Übersprechwiderstand für den 40 m langen 1GBASE-T1- und den 1.000 m langen 10BASE-T1L-Kanal zu gewährleisten (Abbildung 2).

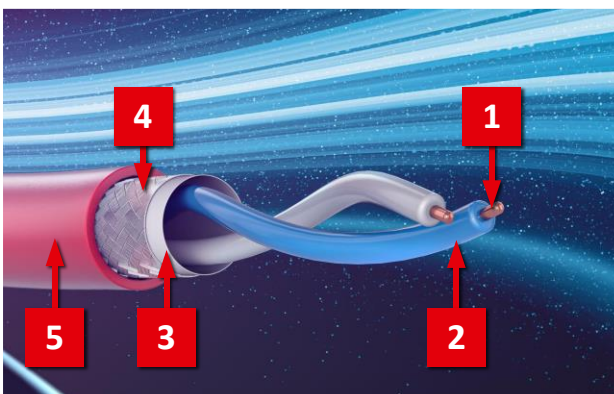


Abbildung 2: Design für ein typisches SPE Kabel (1-Kupferader, 2-Adernisolation, 3-Schirmfolie, 4-Geflechschirm, 5-Kabelmantel).

Je nach Anwendungsfall sind unterschiedliche Kabelmantelmaterialien möglich. Der Kupferquerschnitt des Kabels muss entsprechend der benötigten Link-Länge und der Power-over-Data-Line (PoDL)-Anforderung gewählt werden.

Für Link-Längen bis ca. 20 m sind typisch AWG 26 und bis ca. 150 m AWG 22-Kupferquerschnitt eine perfekte Wahl. Für längere Link-Längen bis zu 1.000 m müssen AWG 16 oder 18 Kabel verwendet werden.

Um die Übertragungsrate von 1 Gbit/s über ein einziges Paar zu realisieren, definieren die Standards strenge Anforderungen an die elektrischen Eigenschaften für ein SPE-Kabel.

Dazu gehören die S-Parameter Einfügungsdämpfung (IL), Rückflussdämpfung (RL) und Alien Crosstalk (ANEXT) über einen Frequenzbereich bis zu 600 MHz.

Die Einfügedämpfung beschreibt das logarithmische Verhältnis zwischen der in das Kabel eingespeisten Leistung und der durch die Leitung übertragenen Leistung. Die hohen Anforderungen an die IL sind notwendig, um die langen Übertragungsstrecken der SPE zu realisieren.

Die Rückflussdämpfung und die Impedanz des Kabels sind wichtig für das Reflexionsverhalten des Gesamtsystems. Reflexionen sind Interferenzen auf der Leitung. Diese Interferenzen können Sender und Empfänger stören. Um die Reflexionen zu minimieren, sollte das gesamte SPE-System die gleiche charakteristische Impedanz von 100 Ω und geringe RL Werte aufweisen.

Bei Kabeln mit mehr als einem Paar beschreibt das Übersprechen die zwischen den Paaren über induktive und kapazitive Kopplung übertragenen Signale. Dieses Übersprechen stört die eigentlichen Übertragungssignale auf der Leitung. SPE hat den Vorteil, dass es kein Übersprechen von anderen Paaren geben kann, aber SPE muss mit Alien Crosstalk umgehen können. ANEXT ist das Übersprechen von anderen Kabeln in der näheren Umgebung. Um die Übertragung vor störenden ANEXT Industrial SPE zu schützen, sollten Kabel mit einer kombinierten Folien- und Geflechschirmung ausgeführt werden.

Der Folienschirm entwickelt eine hohe Abschirmwirkung für hochfrequente elektromagnetische Felder. Der Geflechschirm wird zur mechanischen Stabilisierung und Abschirmung niederfrequenter elektromagnetischer Felder verwendet. Die Wirkung eines Geflechts hängt von der Dicke der einzelnen Drähte und vom Grad der Bedeckung ab. SPE-Kabel für den industriellen Bereich sollten eine Bedeckung von mindestens 85% aufweisen. Das Geflecht eines Kabels definiert auch hauptsächlich die Werte für die Übertragungsimpedanz einer Kabelabschirmung.

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

Die Schirmwirkung eines Kabels wirkt in beide Richtungen, d.h. die Schirmdämpfung reduziert sowohl die Abstrahlung von Störungen des Kabelsignals als auch von Störungen anderer Geräte, die von außen auf das Kabel einwirken.

2.2 Steckverbinder

Für SPE werden völlig neue Arten von Steckverbindern benötigt. Diese Steckverbinder sind im Vergleich zu den typischen RJ45-Steckverbindern viel kleiner und bieten die gleiche Robustheit wie die oft verwendeten industriell gefertigten M12 D- und X-codierten Steckverbinder. Diese neue SPE-Schnittstelle ist in der Norm IEC 63171-6 definiert und umfasst verschiedene M8/M12-Versionen für sehr raue Industrieanwendungen und eine IP20-Schnittstelle für den Einsatz im Schaltschrank (siehe Abbildung 3). Alle diese Steckverbindertypen basieren auf dem gleichen Grundkörper und verwenden ein robustes Stift- und Buchsen-kontaktsystem. Dieses modulare Designkonzept mit identischen Dateneinsätzen in allen Versionen ermöglicht das Stecken von IP20-Steckern in IP65/67-Buchsen zum Testen oder Einrichten.

Diese SPE-Steckverbinderreihe ist für 60 V_{DC} bei 4 A @ 60°C spezifiziert und somit sind die Steckverbinder für alle PoDL-Klassen vorbereitet. Für raue Industrieumgebungen mit starken EMV-Störungen hat der Steckverbinder ein 360°-Schirmgehäuse, um eine gute Schirmanbindung vom Kabelabschirm zur Leiterplatte mit vier „Schirmstiften“ zu erreichen. Diese THR-Lötstifte bieten auch eine robuste mechanische Verbindung zwischen den Buchsen und der Leiterplatte.



Abbildung 3: Unterschiedliche SPE Steckverbindertypen gemäß IEC 63171-6.

Das Design der Steckverbinder-Steckseite ist symmetrisch und die Kontakte sind parallel mit der gleichen Kontaktlänge angeordnet. Die HF-konforme Steckverbindertechnologie ermöglicht Signalübertragungen bis zu 1 Gbit/s für 100BASE-T1 (Abbildung 4).

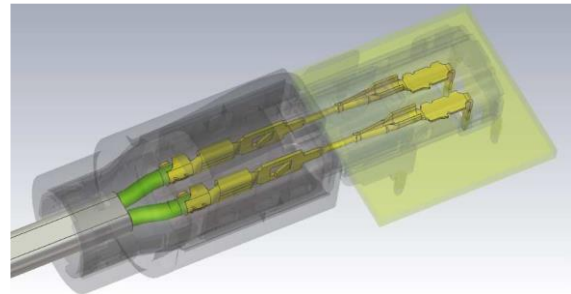


Abbildung 4: Parallel geführte und gleichlange Kontaktwege zur Vermeidung von Laufzeitunterschieden.

3. FILTER TOPOLOGIEN

Das MDI (Medium Dependent Interface) bildet die Verbindung zwischen Kabel und dem physischen Medium, dem PHY Chip, welcher aus Datensignalen Bits generiert und diese zur weiteren Verarbeitung weiterreicht.

Die passiven Bauelemente des MDI haben dabei verschiedene Aufgaben, wie die korrekte Weiterleitung von Datensignalen, Signal-Entstörung, galvanische Trennung oder auch Transport von elektrischer Energie im Falle von Power over Data Line (PoDL).

Um eine fehlerfreie Datenkommunikation zu gewährleisten, wurden in verschiedenen Normen der IEEE 802.3 Grenzwerte für Rückflussdämpfung und Mode Conversion Loss definiert.

Abbildung 5 illustriert die MDI Grenzwerte für 10BASE-T1 nach IEEE 802.3cg und 100BASE-T1 nach IEEE 802.3bv.

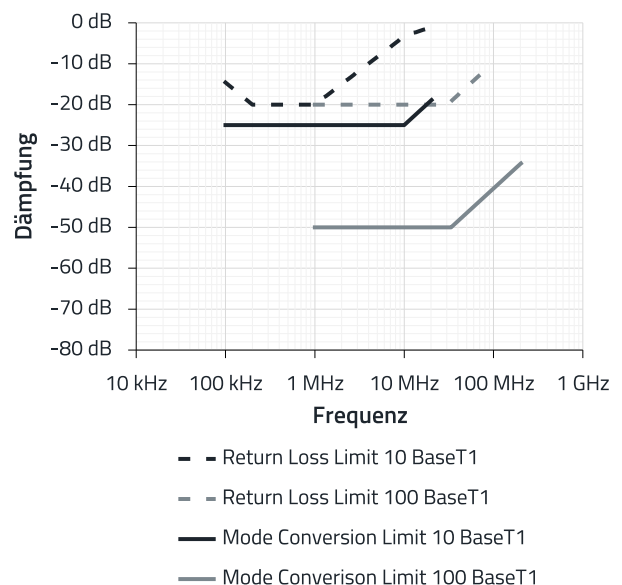


Abbildung 5: Grenzwerte für Rückflussdämpfung und Mode Conversion Loss für die MDI10BASE-T1 (schwarz) und 100BASE-T1 (grau).

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

3.1 Stand der Technik

Aus dem Automobilbereich kommend, gibt es bereits fertige Schaltbilder für Single Pair Ethernet für 100BASE-T1 (siehe Abbildung 6) mit einer Gleichtaktdrossel (engl. Common Mode Choke), zwei in Serie geschalteten Kondensatoren und einem Terminierungsnetzwerk für Common Mode Störungen aus dem Kabel.

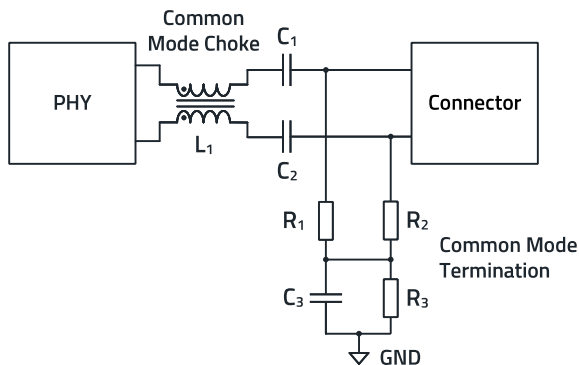


Abbildung 6: Single Pair Ethernet Schaltbild für Automotive Ethernet 100BASE-T1.

Die Gleichtaktdrossel sorgt für die Filterung von störenden Common Mode Signalen und hilft auch die Mode Conversion Loss und die Rückflussdämpfung in bestimmten Frequenzbereichen zu verbessern. Aufgrund der niedrigen unteren Grenzfrequenz bei 100BASE-T1 von 1 MHz, muss die Impedanz der Drossel bei niedrigen Frequenzen hoch sein und gleichzeitig auch höhere Frequenzen bis 200 MHz abdecken. Die Anzahl der Wicklungen ist dementsprechend mehr und der Kern ist größer.

Das Anpassungsnetzwerk gegen Masse (GND) besteht typischerweise aus drei Widerständen und einem

Kondensator. Die beiden 1 kΩ - Widerstände (R₁, R₂ in Abbildung 6) schließen das Adernpaar symmetrisch zur Masse ab und reduzieren so störende Gleichtaktsignale.

Der 100 nF-Kondensator (C₃) mit dem 100 kΩ-Ableitwiderstand (R₃) sorgt für die Entkopplung von Gleichströmen.

Die Kapazität der Koppel-Kondensatoren ist typischerweise 100 nF und die Isolationsspannung 50 V. Sie sind vergleichsweise klein und kostengünstig, weshalb sie bevorzugt im Automobilbereich mit Niederspannungsumgebung und maximal 15 m Leitungslänge zum Einsatz kommen.

3.2 Anforderungen an die Isolation

Außerhalb des Automobils gilt in der IEEE 802.3 für Signalsysteme die Isolationsanforderung nach IEC 62368-1, welche 1500 V_{AC} für 60 Sekunden entspricht. Auch eine DC Spannung von 2250 V_{DC} für 60 Sekunden, bzw. bestimmte Test-Spannungsimpulse sind erlaubt. Diese hohen Isolationsspannungen können von den 50 V Kondensatoren nicht eingehalten werden, weshalb alternative Lösungen gesucht werden müssen. Im folgenden Kapitel wird deshalb eine Lösung mit Übertrager beschrieben. Ausführliche Messungen und ein Vergleich mit Kondensatoren mit 2000 V Isolationsspannung folgen im Kapitel 3.7.

Der Frequenzbereich für SPE 100BASE-T1 liegt mit 1 – 66 MHz im Bereich von Gigabit Multipair Ethernet (1 - 62,5 MHz). Es liegt daher nahe, für SPE eine Schaltung zu entwerfen, die sich an das Schaltbild von Gigabit Ethernet anlehnt (Abbildung 7).

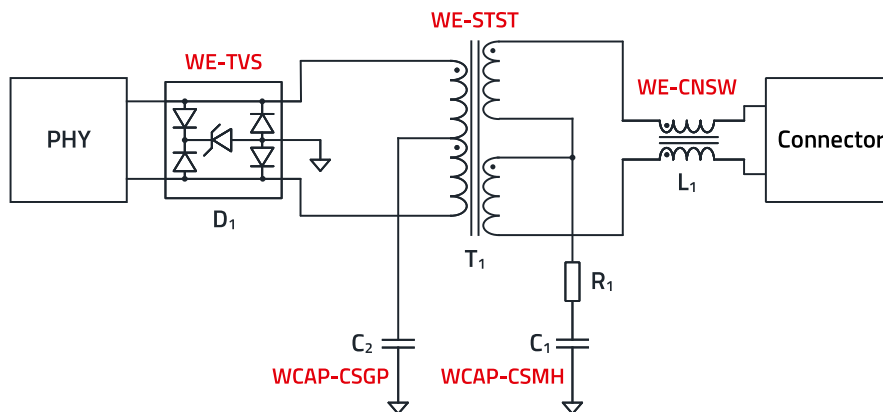


Abbildung 7: SPE Schaltbild mit Übertrager-Lösung.

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

Das zentrale Element der Schaltung ist ein Signalübertrager, der für die galvanische Trennung sorgt und im Idealfall die Datensignale nicht beeinflusst. Der Übertrager ist an seinen Mittelpins jeweils mit Kondensatoren zu GND terminiert. Zur Common Mode Entstörung wird eine Gleichtaktdrossel eingesetzt, die zwischen Übertrager und Buchse platziert werden sollte. Um auch einen Schutz des Phy vor ESD Impulsen zu gewährleisten, ist zwischen Übertrager und PHY ein **TVS Dioden**-Array platziert. Ein primärer Transientenschutz sollte zusätzlich zwischen Steckverbinder und Übertrager vorgesehen werden. Um bei Hipot-Tests zwischen Signalpins und GND keinen Kurzschluss zu verursachen, muss dieser Schutz jedoch während des Tests von GND getrennt werden. In Abbildung 7 ist der Aufbau ohne primären Schutz noch einmal verdeutlicht.

Im folgenden Kapitel wird näher auf die einzelnen Bestandteile der Schaltung eingegangen.

3.3 Galvanische Trennung mit Übertrager

Zur galvanischen Trennung bei Single Pair Ethernet wird der Signalübertrager **74930000** der Serie WE STST ausgewählt. Seine im Vergleich zu konventionell hergestellten LAN-Übertragern kompakte Bauform, zusammen mit einer hohen Induktivität von 350 μ H, bietet gute Signaleigenschaften auch in tieferen Frequenzen. Der Übertrager ist SMT bestückbar und wird zu 100% automatisiert hergestellt (Abbildung 8).

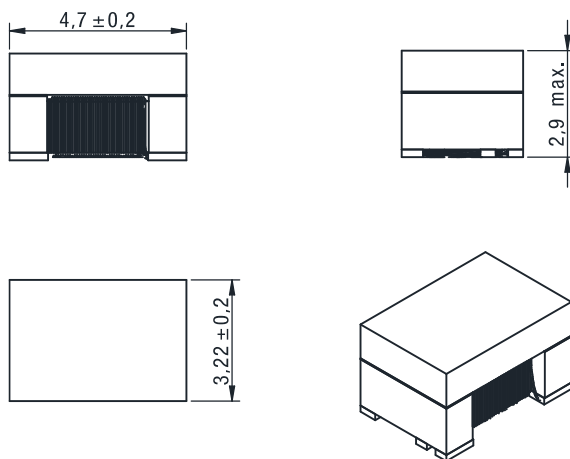


Abbildung 8: Mechanische Abmessungen WE-STST in der Bauform 4532.

Der Übertrager besteht aus einem Kern aus MgZn, der bifilar von zwei Seiten bewickelt wird, d.h. Wicklungen von Primär und Sekundärseite liegen zur Signalkopplung übereinander. Die Isolation wird durch die Kunststoffummantelung der Drähte,

jeweils primär- und sekundärseitig gewährleistet. Durch die direkte Kopplung und das Übersetzungsverhältnis von 1:1 werden differenzielle Signale mit nur sehr geringer Dämpfung übertragen, DC-Signale werden durch die galvanische Isolierung blockiert.

Für Single Pair Ethernet muss der Signalübertrager Daten im Frequenzbereich 0,1 MHz bis 20 MHz für 10BASE-T1 bzw. 1 MHz – 66 MHz für 100BASE-T1 übertragen. Wie spätere Messungen zeigen, kann für 10BASE-T1 und 100BASE T1 der gleiche Übertrager verwendet werden. Neben der Rückflussdämpfung (Return Loss, RL) ist ein weiterer Parameter für die Signalintegrität die Einfügungsdämpfung (Insertion Loss, IL). Über den gesamten Signalfrequenzbereich sollte die Einfüge Dämpfung -3 dB nicht unterschreiten. Insertion Loss- und Return Loss-Kurven für die WE-STST-Serie sind in Abbildung 9 zu sehen.

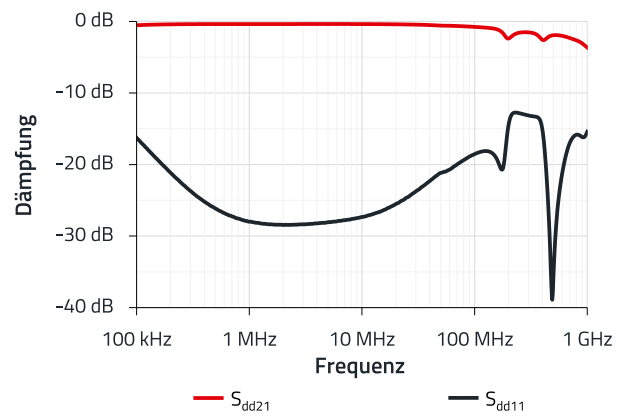


Abbildung 9: Einfügedämpfung (rot) und Rückflussdämpfung (schwarz) von WE-STST 74930000.

Nähere Informationen zur **WE-STST** sind hier zu finden: [SN016b](#).

3.4 Übertrager GND Anbindung

Das Gleichtaktunterdrückungsverhältnis (CMRR) ist ein Parameter, der angibt, wie gut Gleichtaktsignale gedämpft werden. Auch wenn IEEE 802.3cg und IEEE 802.3bw hierzu keine Anforderungen stellen, ist eine hohe CMRR über den gesamten Frequenzbereich wichtig, da zu hohe Gleichtaktsignale die Hauptursache für Datenausfälle sind. Das CMRR des Übertragers hängt stark von der Wicklungskapazität zwischen den primären und sekundären Drahtlagen des Übertragers ab. Die CMRR kann deutlich verbessert werden, indem die Mittelanzapfung des Transformators mit Masse verbunden wird.

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

Auf diese Weise bietet der GND-Anschluss der Mittelanzapfung einen hervorragenden niederimpedanten Pfad für Gleichtaktsignale (siehe Abbildung 10).

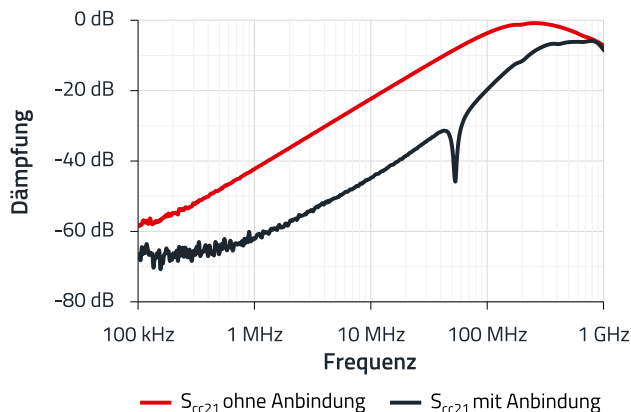


Abbildung 10: Common Mode Dämpfung der WE-STST 74930000 mit (schwarz) und ohne (grau) GND Anschluss des Übertragers.

Auf der Kabelseite besteht der GND-Anschluss aus einem Abschlusswiderstand, der über einen 1 nF-Kondensator angeschlossen ist. Der Widerstand schließt den SPE-Signalfeld mit 100 Ω ab, während der Kondensator wechsellspannungsmäßig einen niederimpedanten Pfad zu GND bietet und zusätzlich eine galvanische Trennung von 2 kV gewährleistet.

Der Kondensator C_2 am Mittelabgriff des Übertragers aus Abbildung 7 hat zwei Aufgaben. Zum einen verhindert er einen Kurzschluss der Offsetspannung zu GND, welche der PHY erzeugt und über der das Datensignal überlagert ist. Zum anderen gewährt er einen HF-Anschluss an Masse, damit Gleichtakt-Störungen abgeleitet werden. Die Symmetrierung der Signale um 0 V geschieht über den Übertrager, da er nur den Wechsellspannungsanteil des Signals überträgt.

Außer von den geteilten primären und sekundären Wicklungen mit Mittelanzapfung hängt, wie schon oben erläutert das Common Mode Verhalten auch von den parasitären Effekten zwischen dessen Wicklungen ab. Durch aufeinanderliegende Wicklungen und somit eine enge induktive Kopplung zwischen ihnen wird versucht die so genannte Streuinduktivität möglichst niedrig zu halten. Dies erhöht jedoch die parasitäre

Kapazität zwischen den Wicklungen. Durch die Wahl des Isolationsmaterials, der Anordnung der Wicklungen und anderen konstruktiven Maßnahmen können die parasitären Effekte auf ein Minimum reduziert werden, so dass der Transformator bis in den Frequenzbereich von über 60 MHz eingesetzt werden kann.

3.5 Singalfilterung mit Gleichtaktdrossel

Das Ziel der Gleichtaktdrossel ist es, das Differenzsignal auszubalancieren, d.h. die Signalleistung in beiden Leitungen sollte gleich, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen sein. Um dieses Ziel zu erreichen, sollten die Gleichtaktanteile des Signals entfernt werden, ohne die Integrität des Differenzsignals zu beeinträchtigen. Deshalb ist die Verwendung einer Gleichtaktdrossel mit großer Gleichtaktimpedanz und kleiner Gegentaktimpedanz innerhalb der Signalbandbreite notwendig.

Auf der Grundlage der Diagrammergebnisse und in Kenntnis der für jedes der Ethernet-Protokolle einzuhaltenden Grenzwerte, wird die WE-CNSW 74423222 für 100BASE-T1 gewählt. Die Drossel wird in einem 1206-Gehäuse geliefert und hat eine Impedanz von fast 45 Ω bei 1 MHz und 2200 Ω bei 100 MHz. Die Wahl der Gleichtaktdrossel hat ebenfalls einen Einfluss auf die Mode Conversion. Mode Conversion bedeutet, dass, ggf. nichtlinear über der Frequenz, ein Teil des Differenzsignals in ein störendes Gleichtaktsignal umgewandelt wird.

Je höher die Windungszahl einer Drossel mit der gleichen Wicklungstechnologie, desto höher (schlechter für die Signalintegrität) ist die Mode Conversion zwischen Differential- und Gleichtakt (Abbildung 11).

Die elektrischen Eigenschaften der stromkompensierten Drossel mit der Artikelnummer 74423222 sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Eigenschaften	Testbedingung	Wert	Toleranz
Z	100 MHz	2200 Ω	$\pm 25\%$
U_R		20 V	Typ.
I_R	$\Delta T = 20$ K	200 mA	Max.
R_{DC}	$T = 20^\circ C$	1200 m Ω	Max.

Tabelle 2: Elektrische Eigenschaften der stromkompensierten Drossel WE-CNSW 74423222.

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

In Abbildung 11 ist die Common und Differential Mode Impedanz WE-CNSW 744232222 gezeigt.

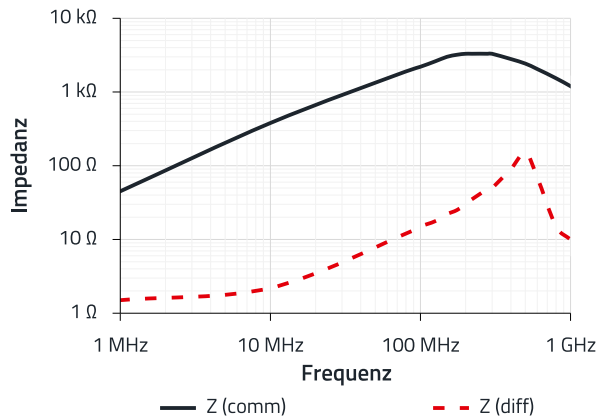


Abbildung 11: Common Mode Impedanz und Differential Mode Impedanz WE-CNSW [744232222](#).

3.6 Schutz der Schnittstelle vor ESD

TVS-Dioden können transiente Überspannungen auf ein Niveau senken, das für ICs unkritisch ist und das nicht dazu führt, dass diese transienten Störsignale in andere Leiterbahnen einkoppeln. Neben der Klemmwirkung sollten jedoch die TVS-Dioden das Datensignal nicht beeinflussen.

Um sicherzustellen, dass das SPE-Datensignal nicht durch die parasitäre Kapazität der TVS-Dioden gestört wird, sollte der Kapazitätswert der [TVS-Diode](#) 2 pF nicht überschreiten.

Für SPE-Systeme kann aus der Serie WE-TV Super Speed der Artikel [824012823](#) eingesetzt werden, das TVS-Dioden-Array belastet die Signalleitungen mit jeweils lediglich 0,27 pF. Die Leitungen werden mit den beiden Pins für den Signaleingang (I/O 1 und I/O 2) verbunden, die Signalamplitude sollte 3,3 V_{PEAK} nicht überschreiten (Abbildung 12).

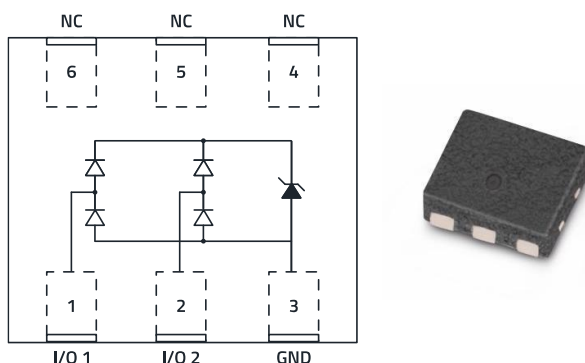


Abbildung 12: TVS Diode mit Schaltung (links) und Produktbild (rechts).

Bei 10 GHz (also weit höher als die geforderten 66 MHz) beträgt der IL-Wert des Arrays -1,57 dB. Die TVS-Diode ist für das Datensignal also nahezu „unsichtbar“.

Abbildung 13 zeigt das Klemmverhalten während eines ESD-Events.

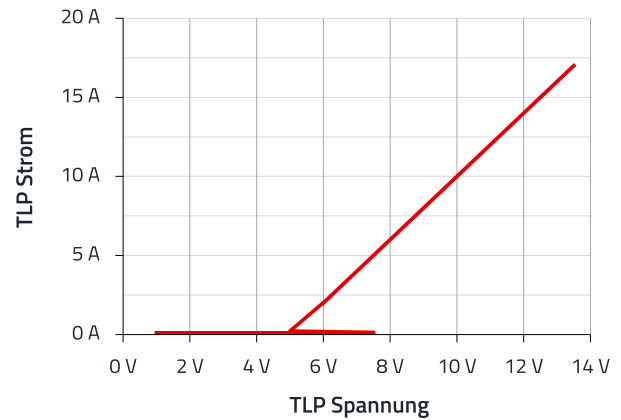


Abbildung 13: Transmission-Line-Puls (TLP) Messung.

Die Transmission Line Pulse (TLP)-Methode ist ein Prüfverfahren zur Simulation von Lasten mit kurzen Pulsbreiten und schnellen Anstiegszeiten, wie sie typischerweise bei ESD-Ereignissen auftreten. In unserem Fall bedeutet dies das Schalten von 0 A auf 13,5 A mit 100 ns-Impulsen. Ein 4 kV ESD-Impuls nach IEC 61000-4-2 erzeugt nach 30 ns einen Strom von 8 A. Wird dieser Impuls mit dem o.g. TVS Dioden-Array geklemmt, ergibt sich nach Datenblatt eine Klemmspannung von 6 V an der Diode. Der IC hat am Signalpin also nur eine Spannung von 6 V statt 4 kV.

Im Allgemeinen sollte die TVS-Diode so nahe wie möglich am Schnittstellenstecker platziert werden, denn so wird der hochfrequente ESD-Impuls unmittelbar an der Geräteschnittstelle begrenzt und kann so nicht in andere Signalleitungen eingekoppelt werden. Bei einem Hipot-Test kann die TVS-Diode jedoch fälschlich auslösen und in den leitenden (niederimpedanten) Zustand übergehen. Um Kurzschlüsse oder eine Beschädigung der Diode durch den hohen Teststrom zu vermeiden, wird die Diode entweder zwischen Übertrager und PHY platziert oder (falls sie zwischen Buchse und Übertrager platziert ist) während des Tests galvanisch von GND getrennt.

3.7 Vergleich SPE automotive vs. SPE industrial

Zur Bewertung der Performance der Übertragerschaltung wird sie im Folgenden Abschnitt mit zwei weiteren Schaltungen verglichen. Variante 2 verwendet zur galvanischen Trennung 100 nF-Kondensatoren mit einer Spannungsfestigkeit von 50 V, wie sie typischerweise im Automotive-Ethernet Bereich Anwendung finden. In Variante 3 werden ebenfalls Kondensatoren mit 100 nF eingesetzt, die jedoch eine Spannungsfestigkeit von 2 kV

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

haben. Die hohen Anforderungen an die Rückflussdämpfung bei 10BASE-T1 sowie an den Mode Conversion Loss bei 100BASE-T1 führen zu unterschiedlichen Designansätzen für die jeweilige Variante. Der zentrale Unterschied zwischen dem 10BASE-T1 und dem 100BASE-T1 Design liegt in der Verwendung von Gleichtaktrosseln (CMC) zur Common Mode Filterung: Während sie bei 100BASE-T1 typischerweise eingesetzt werden, wird bei 10BASE-T1 häufig darauf verzichtet. Bei 100BASE-T1 ist der Einsatz einer CMC in der Regel notwendig – auch wegen der strengeren Spezifikationen und höheren Frequenzen.

Wird die 10BASE-T1 Schaltung mit zwei parallelen Kondensatoren verwendet, wird sie wie in Kapitel 3.1 beschrieben aufgebaut.

Obwohl 10BASE-T1 eine Datenrate von lediglich 10 Mbit/s verwendet, beträgt die Symbolrate aufgrund der PAM-3-Modulation 7,5 MBaud. Daraus ergibt sich eine notwendige Bandbreite von bis zu 20 MHz. Die Auswahl einer geeigneten Gleichtaktrossel richtet sich daher nicht nach der niedrigen Datenrate, sondern nach den hochfrequenten Signalanteilen und möglichen Störungen im Bereich bis 20 MHz. Eine Drossel mit zu niedriger Resonanzfrequenz wäre in diesem Fall ungeeignet, da sie im relevanten Frequenzbereich nicht ausreichend unterdrückt oder sogar das Nutzsignal verfälscht.

Die Gleichtaktrossel [744272222](#) aus der Serie WE-SL5 wird ausgewählt, dass sie nicht nur eine effektive Common Mode Unterdrückung bietet, sondern auch einen positiven Einfluss auf den Return Loss und den Mode Conversion Loss hat. Aufgrund der niedrigen Grenzfrequenz fallen sowohl die Abmessungen (10 mm x 8.7 mm) als auch der Induktivitätswert ($2 \cdot 2200 \mu\text{H}$) der Gleichtaktrossel

dementsprechend groß aus. Abbildung 14 zeigt den Impedanzverlauf über die Frequenz der 744272222.

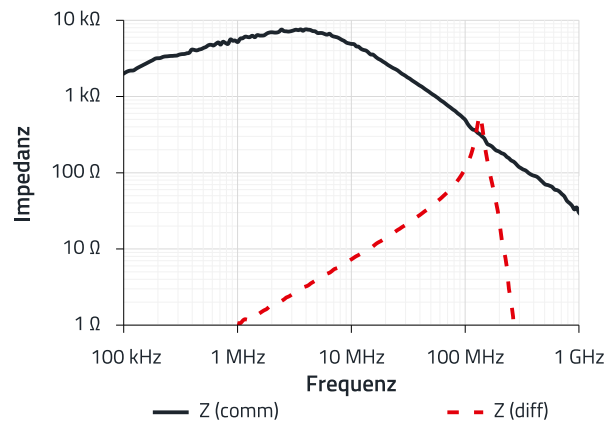


Abbildung 14: Common Mode und Differential Mode Impedanz der WE-SL5 [744272222](#).

Das alternative Übertragerdesign ist in Abbildung 15 dargestellt. Im Unterschied zu den in Kapiteln 3.1 und den folgenden beschriebenen Varianten wird für dieses 10 Mbit/s Design keine Gleichtaktrossel benötigt. Der Grund dafür ist vor allem die wirksame Störunterdrückung des Übertragers im niedrigen Frequenzbereich. Ein weiterer Unterschied ist ein zusätzlicher Kondensator C_3 an den beiden Mittelpins. Dieser verbessert die Einfüge- und die Rückflussdämpfung deutlich bis in den Frequenzbereich von etwa 35 kHz, was zu einem signifikant verbessertem Signalverhalten führt.

Da es nicht bei allen Übertragern möglich ist, den Mittelanschluss zu teilen, lässt sich der Kondensator C_3 zwischen den Mittelpins nicht immer realisieren. In diesem Fall kann alternativ eine galvanische Trennung durch den Einsatz von zwei Kondensatoren an den äußeren Anschlüssen der Wicklungen erreicht werden.

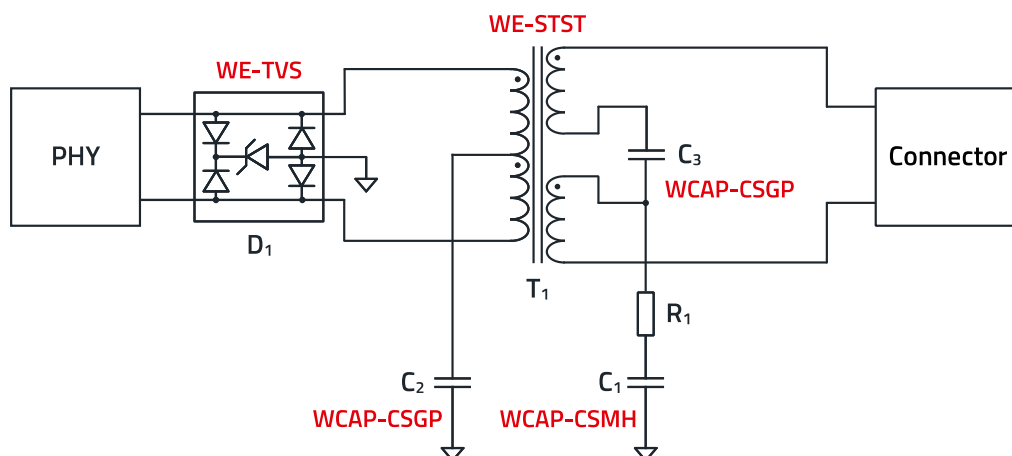


Abbildung 15: 10BASE-T1 Schaltung mit Übertrager.

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

Dieser Aufbau vergrößert die Schaltung minimal, hat jedoch den Vorteil, dass bei einer Power over Dataline (PoDL) Applikation, die Spannung an beiden Kondensatoren nur zur Hälfte abfällt und dadurch die Gefahr einer DC-Bias-Spannungssättigung der MLCC-Kondensatoren verringert wird. Werden nur Daten übertragen, sind trotzdem Kondensatoren mit einer Isolierspannung von 100 V notwendig, da die Norm in Kapitel 146.8.5 eine DC Isolation von 60 V für eine unbestimmte Zeit fordert (Abbildung 16).

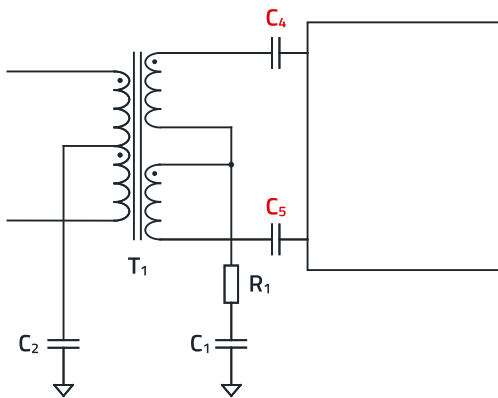


Abbildung 16: Die Kondensatoren C_4 und C_5 an den äußeren Übertragerpins dienen als Alternative zum Kondensator C_3 in der Schaltung aus Abbildung 15.

Neben der Isolierspannung der Kondensatoren ist in den beiden Schaltbildern auch deren Kapazität von entscheidender Bedeutung. Simulationen und Messungen zeigen, dass mindestens 100 nF erforderlich sind, um die Grenzwerte der IEEE802.3cg zu erfüllen. Im Abschnitt „146.5.4.2 Transmitter Output Droop“ wird jedoch ein maximaler Spannungsabfall von 10% zwischen 133,3 ns und 800 ns für ein Testsignal des PHY-Chips gefordert. Für SPoE (Single Pair Power over Ethernet, auch PoDL genannt) erlaubt die Norm einen deutlich höheren Spannungsabfall von bis zu 25%. Das zugrunde liegende Messverfahren unterscheidet sich jedoch von dem zuvor beschriebenen Fall: Der Droop wird hier zwischen dem Spannungswert 400 ns nach dem Nulldurchgang und dem Spannungswert 1066,7 ns nach dem Nulldurchgang bestimmt. Um diese Anforderung zu erfüllen, gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder wird die Induktivität des Übertragers vergrößert, was jedoch zu einer größeren Bauform führt, oder es werden Kondensatoren mit einer größeren Kapazität verwendet. Letztere Variante ist platzsparender, kostengünstiger und einfacher umzusetzen. Daher werden in diesem Fall Kondensatoren mit einer Kapazität von 470 nF verwendet, um den besten Kompromiss zwischen den Anforderungen an den Droop- und die Rückflussdämpfung zu erzielen.

Wie Abbildung 17 und die folgende Gleichung (1) zeigen, erreicht dieser Schaltungsaufbau einen maximalen Spannungsabfall von nur 8,3% und ist daher im Rahmen der Norm.

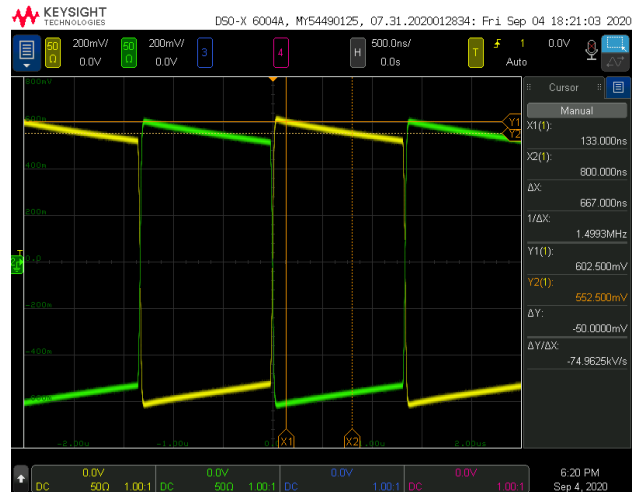


Abbildung 17: Messung mit dem Oszilloskop: Der Spannungsabfall auf dem Signal-Plateau beschreibt den Voltage Droop.

$$U_{\Delta\%} = \frac{100\%}{U_{133\text{ ns}}} \cdot (U_{133\text{ ns}} - U_{800\text{ ns}})$$

$$U_{\Delta\%} = \frac{100\%}{602,5\text{ mV}} \cdot (602,5\text{ mV} - 552\text{ mV}) \quad (1)$$

$$U_{\Delta\%} = 8,3\%$$

Abbildung 18 illustriert die Größenunterschiede der drei Schaltungsvarianten.

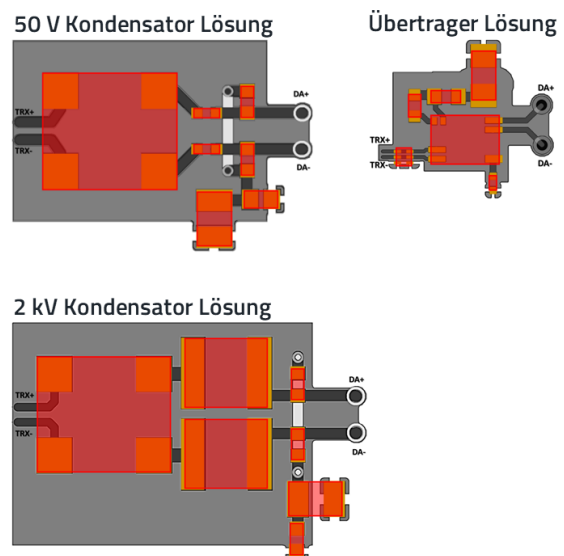


Abbildung 18: Footprints der verschiedenen SPE Varianten der galvanischen Trennung. Links oben mit 50 V Kondensatoren, rechts oben das Übertragerdesign, unten mit 2 kV Kondensatoren.

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

Die Gleichakttdrossel benötigt bei den beiden 10 MBit Designs mit Kondensator den meisten Platz. Relativ groß sind auch die 100 nF Kondensatoren mit einer Spannungsfestigkeit von 2 kV.

3.8 10BASE-T1 Messung

Wie die Return-Loss-Messung in Abbildung 19 zeigt, liegen die Werte der Kondensatorlösungen (im Bild grau gestrichelt und schwarz gepunktet dargestellt) nahezu exakt übereinander. Die Return-Loss-Messwerte der beiden Kondensator-Lösungen kommen der IEEE Grenzlinie zwischen 100 kHz und 200 kHz sehr nahe.

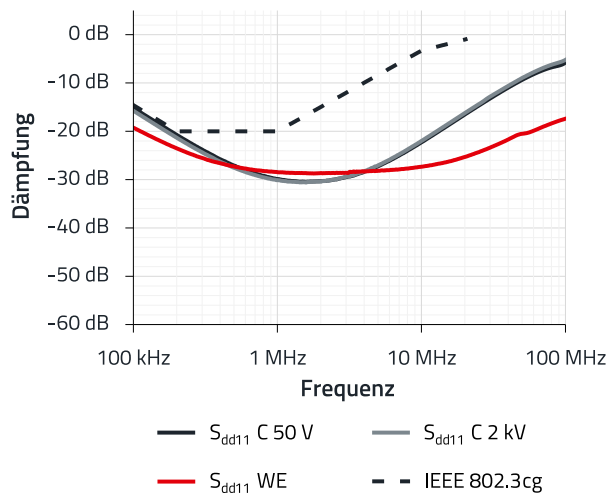


Abbildung 19: 10BASE-T1 Rückflussdämpfung mit 50 V Kondensatoren (grau), 2 kV Kondensatoren (schwarz) und Übertragern (rot).

Deutlich bessere Werte erreicht das Übertragerdesign (rote Kurve), das auch im Frequenzbereich über 5 MHz bessere Ergebnisse als die Kondensatorlösung erzielt.

Für den Mode Conversion Loss zeigen alle drei Messungen sehr gute Werte. Dies ist daran ersichtlich, dass der Abstand zwischen Soll- und Ist-Werten stets zwischen 30 und 40 dB ist. Die Kondensatorlösungen sind im Frequenzbereich zwischen 0,1 und 6 MHz noch etwas besser, während die Übertragerlösung im Bereich zwischen 6 und 20 MHz bessere Ergebnisse erzielt (Abbildung 20).

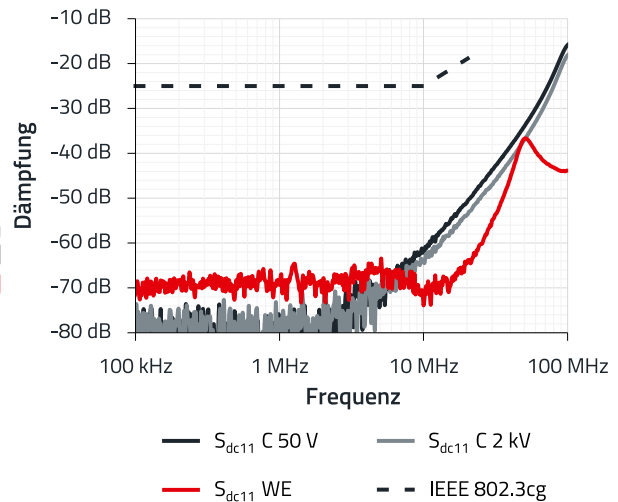


Abbildung 20: 10BASE-T1 Mode Conversion Loss Messergebnisse.

3.9 100BASE-T1 Aufbau

Das 50 V Kondensator Design entspricht dem 10BASE T1-Design aus Kapitel 3.1. Die Gleichakttdrossel kann im Vergleich zum 10BASE-T1 Design wesentlich kleiner dimensioniert werden, da eine Entstörung im tiefen Frequenzbereich zwischen 0,1 und 1 MHz nicht vorgeschrieben ist. Durch die Größenreduzierung der Gleichakttdrossel ist so die 50 V Lösung die kompakteste aller drei Designs. Selbst wenn die kleinere Drossel das Design deutlich verkleinert, bleibt das Footprint des 2 kV Kondensator-Designs das flächenmäßig größte aller Designs (siehe Abbildung 21).

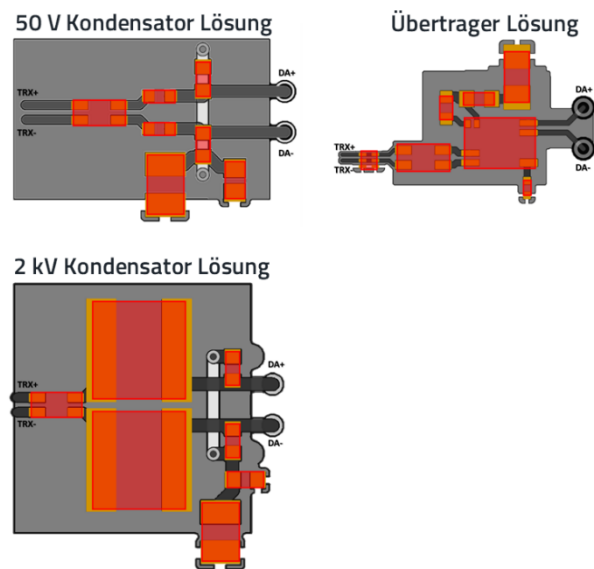


Abbildung 21: Größenvergleich verschiedener Footprints auf der Leiterplatte bei Single Pair Ethernet 100BASE-T1.

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

Bis auf die großen Kondensatoren gibt es jedoch keine Unterschiede zum 50 V Automotive Ethernet Design. Anders als bei 10BASE-T1 ist beim Übertrager-Design eine Gleichaktrossel zur Entstörung in Frequenzen bis 200 MHz nötig. Das Schaltbild entspricht dem in Kapitel 3.2. Die Gleichaktrossel reduziert im höheren Frequenzbereich sowohl die Mode Conversion als auch Gleichaktssignale. Auf die Ergebnisse wird im nächsten Kapitel „100BASE-T1 Messung“ näher eingegangen.

3.10 100BASE-T1 Messung

Bei der Messung der Rückflussdämpfung liegen die Werte im Frequenzbereich zwischen 1 und 20 MHz bei der Übertragerlösung näher an der Soll-Kurve als bei den beiden anderen Designs. Jedoch erzielt die Lösung mit den 2 kV-Kondensatoren die besten Resultate. Insgesamt liegen die Werte aller Messkurven mit einem ausreichenden Sicherheitsabstand von mindestens 3 dB zur Return Loss Grenze (Abbildung 22).

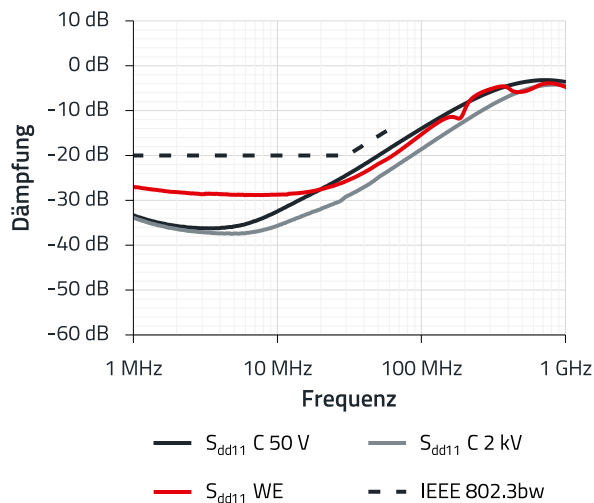


Abbildung 22: 100BASE-T1 Rückflussdämpfung.

Beim Mode Conversion Loss liegen die Messwerte des Designs mit den 50 V Kondensatoren ab 25 MHz sehr nahe am Limit der IEEE Norm und überschreiten diese teilweise. Das Übertrager-Design sowie die Variante mit den 2 kV

Kondensatoren erweisen sich hier als bessere Alternativen. Da ihre Messkurven in diesem Frequenzbereich einen deutlich größeren Abstand zur Sollkurve von etwa 3 dB aufweisen (Abbildung 23).

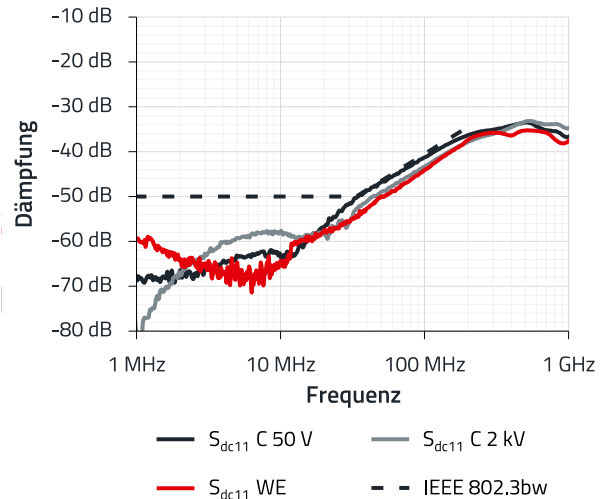


Abbildung 23: 100BASE-T1 Mode Conversion Loss Messergebnisse.

4. ZUSAMMENFASSUNG/FAZIT

Bei beiden Kondensatordesigns kann aufgrund der zu erwartenden Bauteiltoleranzen nicht sichergestellt werden, dass der Return Loss der Schaltung den Anforderungen der IEEE 802.3cg für 10BASE-T1 zuverlässig entspricht. Zudem ist der Platzbedarf sowohl bei der Gleichaktrossel als auch bei der 2-kV-Kondensator-Lösung deutlich größer als bei Übertragerlösung.

Im Fall der 100BASE-T1-Designs erweist sich die 50-V-Kondensatorlösung zudem als nur bedingt geeignet, um die Mode Conversion Loss-Anforderungen im Frequenzbereich über 30 MHz zu erfüllen. Selbst wenn die zwingende galvanische Trennung nach IEC 62368-1 außer Acht gelassen wird, stellt die Übertragerlösung die kompakteste Variante dar und bietet zugleich die beste Signalstabilität für Single Pair Ethernet, sowohl für 10BASE-T1, als auch für 100BASE-T1.

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

A. Anhang

A.1 Stückliste/BOM

Beschreibung	Größe	Elektrische Eigenschaften	Hersteller	Artikelnummer
SPE Kabel IP20		4 A/60 V _{DC} /600 MHz	Harting	33280101001
SPE Buchse		4 A/60 V _{DC} /600 MHz	Harting	09452812800
TVS Diode	DFN1210	3,3 V _{DC} ; 0,18 pF	Würth Elektronik	824012823
Common Mode Choke	1206	Z = 2200 Ω @ 100 MHz	Würth Elektronik	744232222
Signal Übertrager	1812	2250 V(DC); 350 μH	Würth Elektronik	74930000
Kondensator 1	1206	1 nF, 2000 V _{DC}	Würth Elektronik	885342208024
Kondensator 2	0402	100 nF; 50 V _{DC}	Würth Elektronik	885012205086
Kondensator 3	0603	470 nF; 25 V _{DC}	Würth Elektronik	885012206075
Widerstand	0603	100 Ω		---

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

WICHTIGER HINWEIS

Der Anwendungshinweis basiert auf unserem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand, dient als allgemeine Information und ist keine Zusicherung der Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG zur Eignung des Produktes für Kundenanwendungen. Der Anwendungshinweis kann ohne Bekanntgabe verändert werden. Dieses Dokument und Teile hiervon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und seine Partner- und Tochtergesellschaften (nachfolgend gemeinsam als „WE“ genannt) sind für eine anwendungsbezogene Unterstützung jeglicher Art nicht haftbar. Kunden sind berechtigt, die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für eigene Anwendungen und Entwürfe zu nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und die Verwendung von WE-Produkten in einem bestimmten Entwurf trägt in jedem Fall ausschließlich der Kunde. Aufgrund dieser Tatsache ist es Aufgabe des Kunden, erforderlichenfalls Untersuchungen anzustellen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produktmerkmalen für die jeweilige Kundenanwendung zulässig und geeignet ist oder nicht.

Die technischen Daten sind im aktuellen Datenblatt zum Produkt angegeben. Aus diesem Grund muss der Kunde die Datenblätter verwenden und wird ausdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, dass er dafür Sorge zu tragen hat, die Datenblätter auf Aktualität zu prüfen. Die aktuellen Datenblätter können von www.we-online.com heruntergeladen werden. Der Kunde muss produktspezifische Anmerkungen und Warnhinweise strikt beachten. WE behält sich das Recht vor, an seinen Produkten und Dienstleistungen Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und sonstige Änderungen vorzunehmen. Lizenzen oder sonstige Rechte, gleich welcher Art, insbesondere an Patenten, Gebrauchsmustern, Marken, Urheber- oder sonstigen gewerblichen Schutzrechten werden

hierdurch weder eingeräumt noch ergibt sich hieraus eine entsprechende Pflicht, derartige Rechte einzuräumen. Durch Veröffentlichung von Informationen zu Produkten oder Dienstleistungen Dritter gewährt WE weder eine Lizenz zur Verwendung solcher Produkte oder Dienstleistungen noch eine Garantie oder Billigung derselben.

Die Verwendung von WE-Produkten in sicherheitskritischen oder solchen Anwendungen, bei denen aufgrund eines Produktausfalls sich schwere Personenschäden oder Todesfällen ergeben können, sind unzulässig. Des Weiteren sind WE-Produkte für den Einsatz in Bereichen wie Militärtechnik, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, Marine, Verkehrswesen (Steuerung von Kfz, Zügen oder Schiffen), Verkehrssignalanlagen, Katastrophenschutz, Medizintechnik, öffentlichen Informationsnetzwerken usw. weder ausgelegt noch vorgesehen. Der Kunde muss WE über die Absicht eines solchen Einsatzes vor Beginn der Planungsphase (Design-In-Phase) informieren. Bei Kundenanwendungen, die ein Höchstmaß an Sicherheit erfordern und die bei Fehlfunktionen oder Ausfall eines elektronischen Bauteils Leib und Leben gefährden können, muss der Kunde sicherstellen, dass er über das erforderliche Fachwissen zu sicherheitstechnischen und rechtlichen Auswirkungen seiner Anwendungen verfügt. Der Kunde bestätigt und erklärt sich damit einverstanden, dass er ungeachtet aller anwendungsbezogenen Informationen und Unterstützung, die ihm durch WE gewährt wird, die Gesamtverantwortung für alle rechtlichen, gesetzlichen und sicherheitsbezogenen Anforderungen im Zusammenhang mit seinen Produkten und der Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen Anwendungen trägt.

Der Kunde hält WE schad- und klaglos bei allen Schadensansprüchen, die durch derartige sicherheitskritische Kundenanwendungen entstanden sind.

NÜTZLICHE LINKS



Application Notes

www.we-online.com/appnotes



REDEXPERT Design Plattform

www.we-online.com/redexpert



Toolbox

www.we-online.com/toolbox



Produkt Katalog

www.we-online.com/products

KONTAKT INFORMATION



appnotes@we-online.com

Tel. +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenburg Germany

www.we-online.com

APPLICATION NOTE

ANP085 | Single Pair Ethernet für Anwendungen im Industriebereich

REVISIONSHISTORIE

Dokument Version	Veröffentlichungsdatum	Änderungen
AN085a	2021/03/21	Ursprüngliche Version der Application Note
AN085b	2022/22/09	Allgemeine Textüberarbeitung
AN085c	2026/03/27	Allgemeine Textüberarbeitung. 3.2 Abbildung08 geändert

Hinweis: Die aktuelle Version des Dokuments und das Veröffentlichungsdatum sind in der Fußzeile jeder Seite dieses Dokuments angegeben.