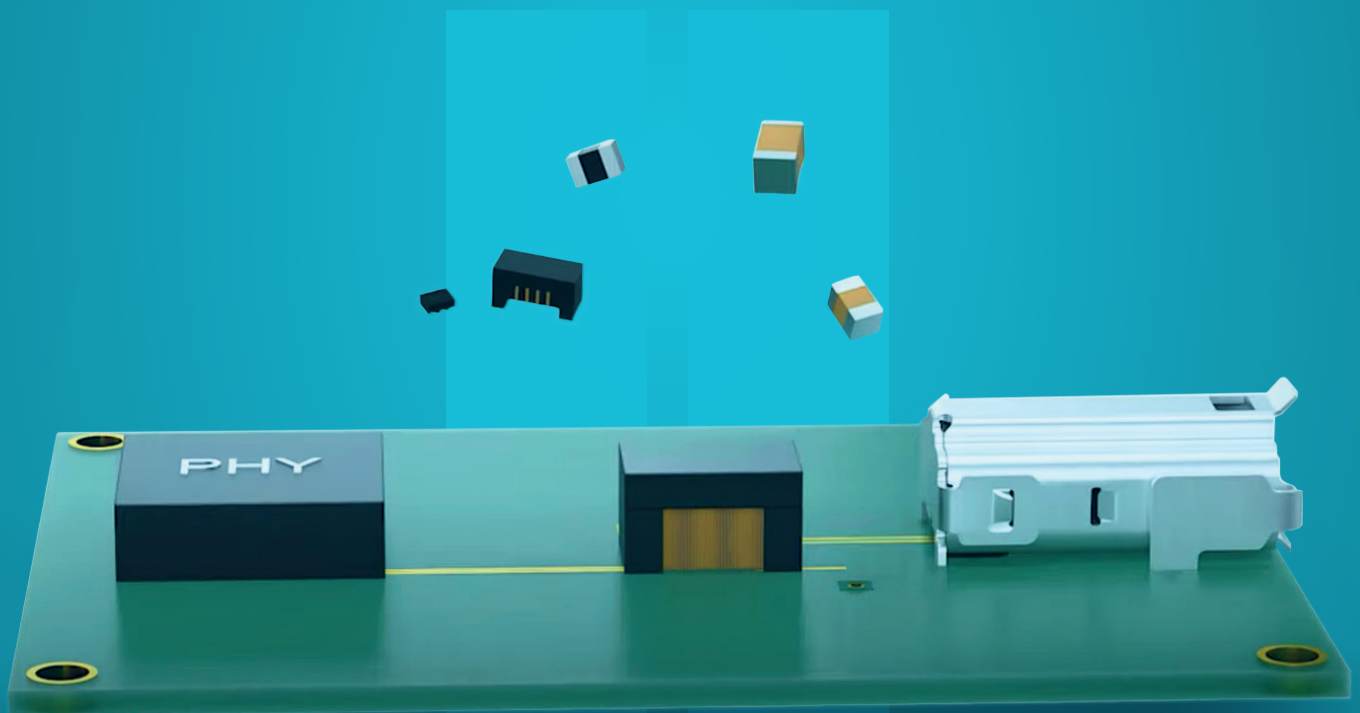


INDUSTRIAL IOT

SAUBERE SACHE

Filter-Design für Single-Pair-Ethernet-Anschlüsse

FACHBEITRAG

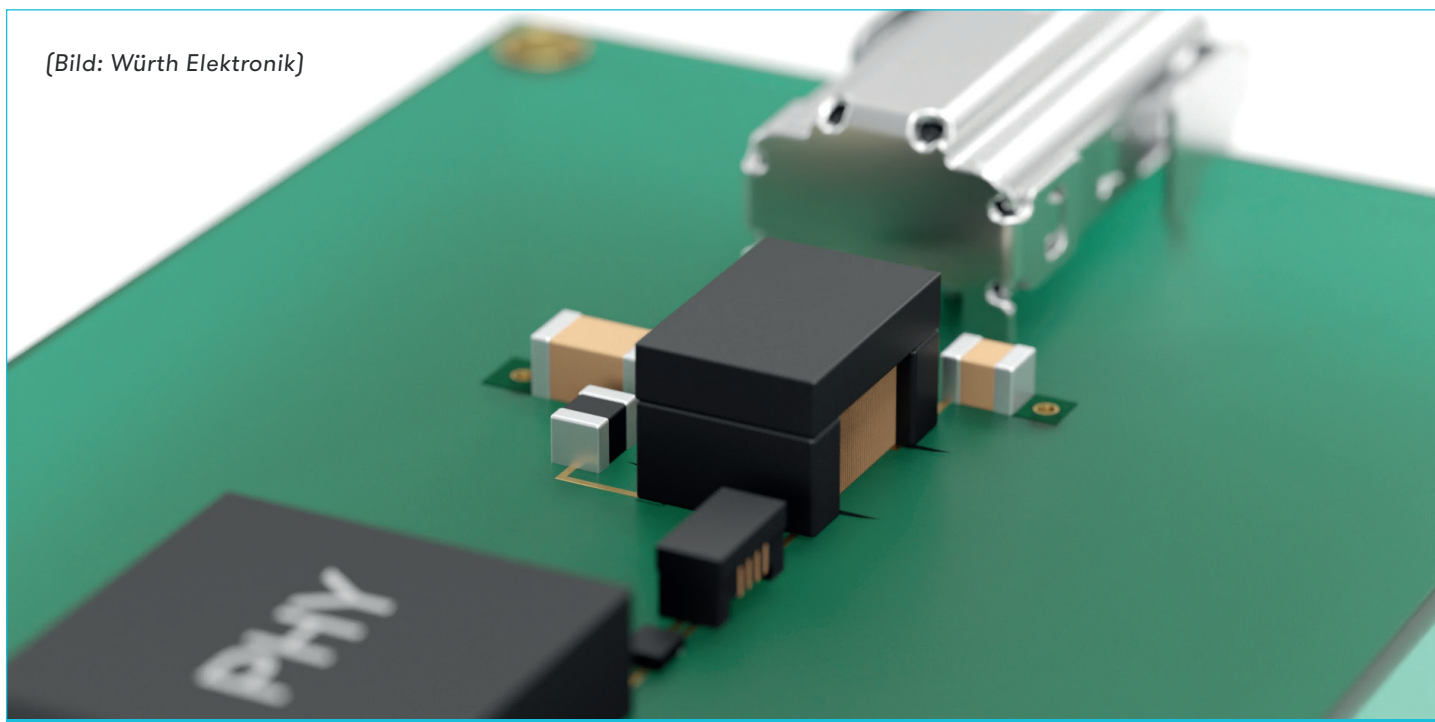


Saubere Sache

Filter-Design für Single-Pair-Ethernet-Anschlüsse

Single Pair Ethernet ist der “Shooting Star” der industriellen Verbindungstechnik. Es erfüllt gängige Ethernet-Standards, bietet aber für Industrieanwendungen längere und preiswertere Leitungen. Der Datentransport erfolgt auf nur einem Leiterpaar und eine Fernspeisung der Endgeräte wird über die Datenleitung realisiert. Dies erfordert andere Lösungen für den ESD-Schutz und die Isolation der angeschlossenen Geräte. Der folgende Beitrag soll eine praktische Hilfestellung beim Entwurf entsprechender Schaltungen sein.

[Bild: Würth Elektronik]



Single Pair Ethernet (SPE) erlaubt es, über ein zweiadriges Kupferkabel Daten mit 10Mbps, 100Mbps und 1Gbps zu transportieren sowie gleichzeitig Endgeräte per Power over Data Line (PoDL) mit Strom zu versorgen. Die Datenraten und Leitungslängen sind im Einzelnen:

- 10 MB/s (duplex) bis 1000m (10Base-T1L)
- 10 MB/s (halbduplex) bis 40m (10Base-T1S)
- 100 MB/s (duplex) bis 40m (100Base-T1)
- 1000 MB/s (duplex) bis 15m (1000Base-T1)

Alle diese Standards sind in der IEEE803.2 festgelegt. Von besonderem Interesse ist vor allem der 10BaseT1L-Standard, der eine maximale Kabellänge von 1000 Metern vorsieht, was vor allem für den Ersatz von Feldbussen interessant ist. Quasi als Zugabe (manche sprechen vom Sahnehäubchen) gibt es Power over Data Line - das Pendant zu Power over Ethernet. Mit dem Unterschied, dass der Transport der Fernspeise-Spannung über das gleiche Adernpaar zusammen mit den Daten erfolgt. Bisher ist dieser Standard in 10 Leistungsklassen bis maximal 50W spezifiziert, später sollen höhere Leistungen dazukommen. Anschlussbuchsen für SPE sind für 4A ausgelegt (aktueller Maximal-Strom 1,6A).

Schaltungsentwicklung

Bild 1 zeigt ein Referenz-Design für Single Pair Ethernet 100Base-T1 aus dem Bereich Automotive. Automotive deshalb, weil SPE in der Automobilindustrie schon seit geraumer Zeit eingesetzt wird. Auf der rechten Seite befindet sich ein Steckverbinder zum Endgerät, auf der linken Seite ist der PHY und dazwischen befindet sich die Schaltung mit einer Gleichtaktdrossel, die relativ breitbandig entstören muss, weil die Kondensatoren in den tiefen Frequenzen keine gute Entstöreigenschaft haben. Der Abschluss nach Masse (Ground Termination) besteht aus zwei parallelen Widerständen und einer Verbindung über einen Kondensator nach Masse sowie einem 100-k Ω -Widerstand, um statische Elektrizität abzuleiten. Das zentrale Element in dieser Schaltung sind hier die zwei 100-nF-Kondensatoren mit 50-V-Isolation. Für Industrieanwendungen gilt aber die Geräte-Sicherheitsnorm IEC 62368-1 (alt IEC 60950-1), die besagt, dass die Bauteile einer Prüfspannung von 1500VAC beziehungsweise 2250VDC für 60s widerstehen müssen.

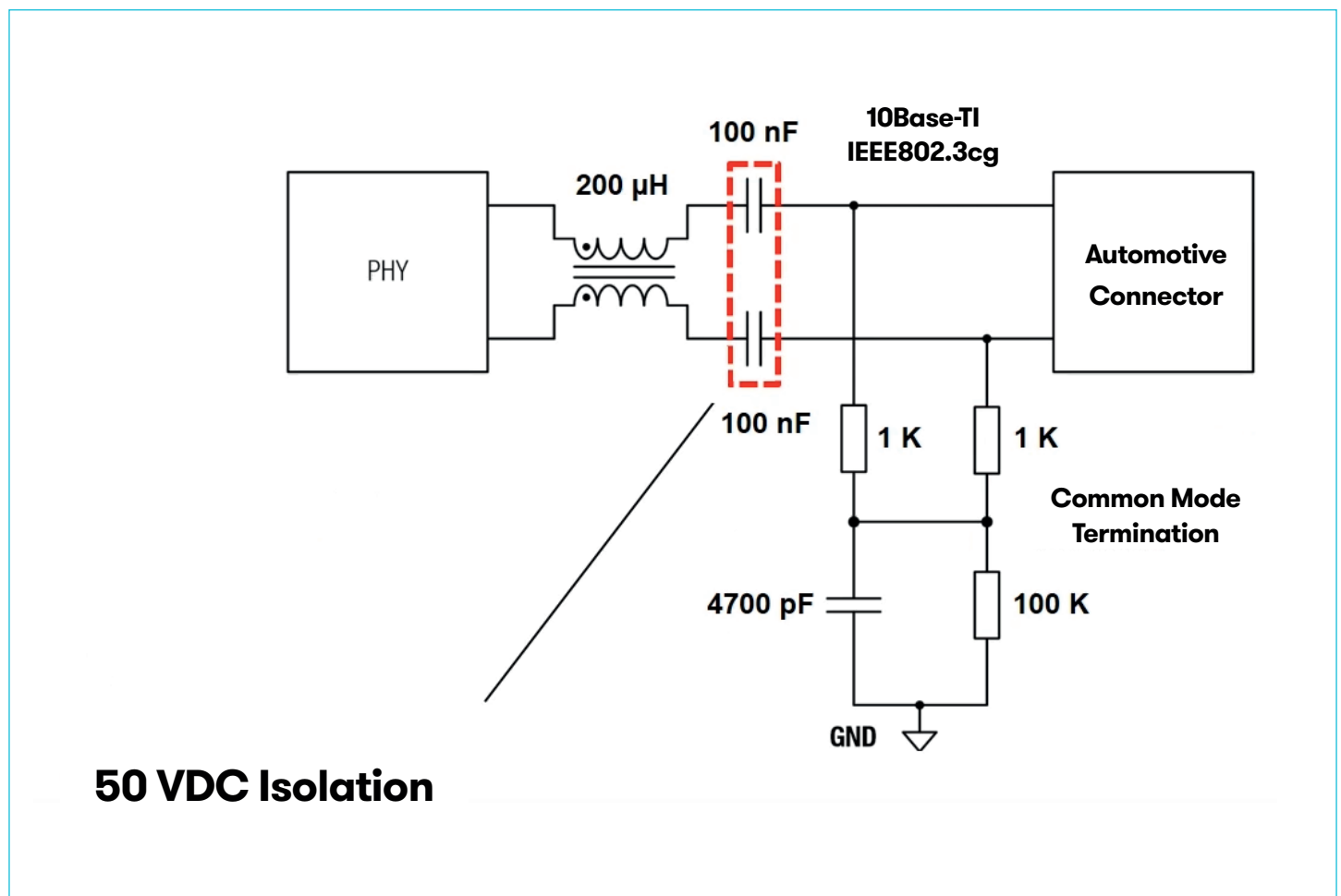


Bild 1. Referenz-Design für Single Pair Ethernet 100Base-T1 aus dem Bereich Automotive. Die Schaltung ist mit 50-VDC-Isolation für Industrieanwendungen nicht geeignet. (Bild: Würth Elektronik)

Was kommt zwischen Stecker und PHY?

Um diese Frage zu beantworten, wurde im Würth-Labor ziemlich viel simuliert und gemessen. Zunächst wurde die Automotive-Schaltung mit den 50-V-Kondensatoren aufgebaut (Bild 1), dann das Gleiche noch einmal mit 2000-V-Kondensatoren. Als dritter Aufbau wurde eine Variante mit Übertrager erstellt (Bild 2). Warum Übertrager? Die Datenübertragung bei 100BaseT1 erfolgt mit einer Grenzfrequenz von 66MHz, was ähnlich der Grenzfrequenz zu 1000Base-T bei Standard Ethernet ist. Es liegt also nahe, auch bei SPE Übertrager einzusetzen. Zusätzlich enthält die Übertrager-Lösung eine Common Mode Choke und ein TVS-Dioden-Array zur Entstörung von ESD-Impulsen.

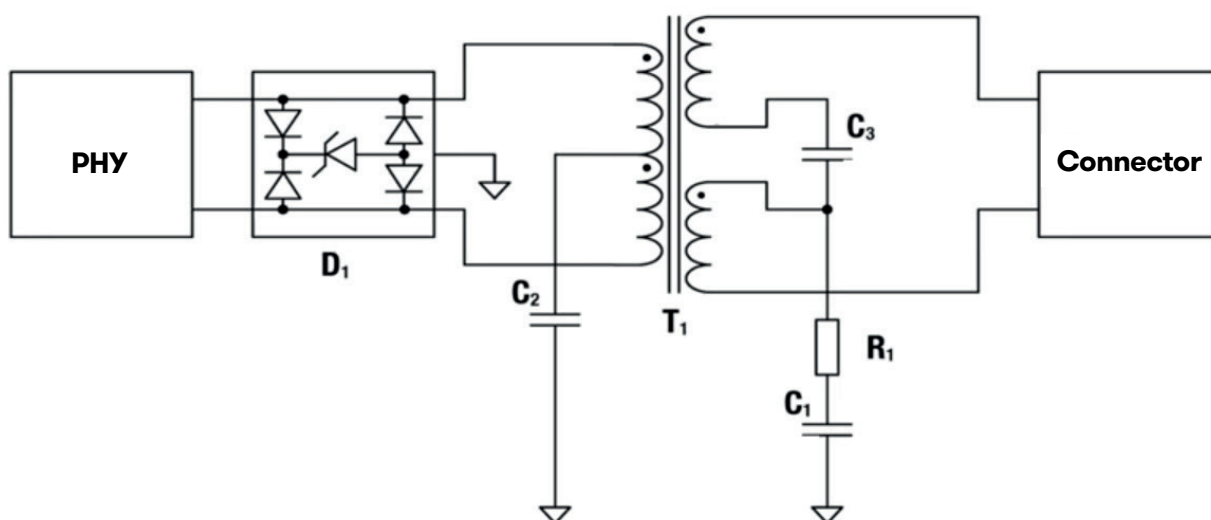


Bild 2. Eingangsschaltung mit Übertrager-Design. (Bild: Würth Elektronik)

Gehen wir als erstes auf die Eigenschaften der Schaltungen für den Einsatz bei 10BASE-T1L - also die 1000-m-Variante des Standards - ein. Bild 3 zeigt die Anforderungen für die Übertragungseigenschaften aus der IEEE 802.3cg. Die blaue Linie ist die Rückflussdämpfung auch Return Loss genannt und die grüne Linie ist der Mode Conversion Loss. Es handelt sich um differenzielle Signale, die sich in den Schaltungen in Gleichtakt-Signale umwandeln.

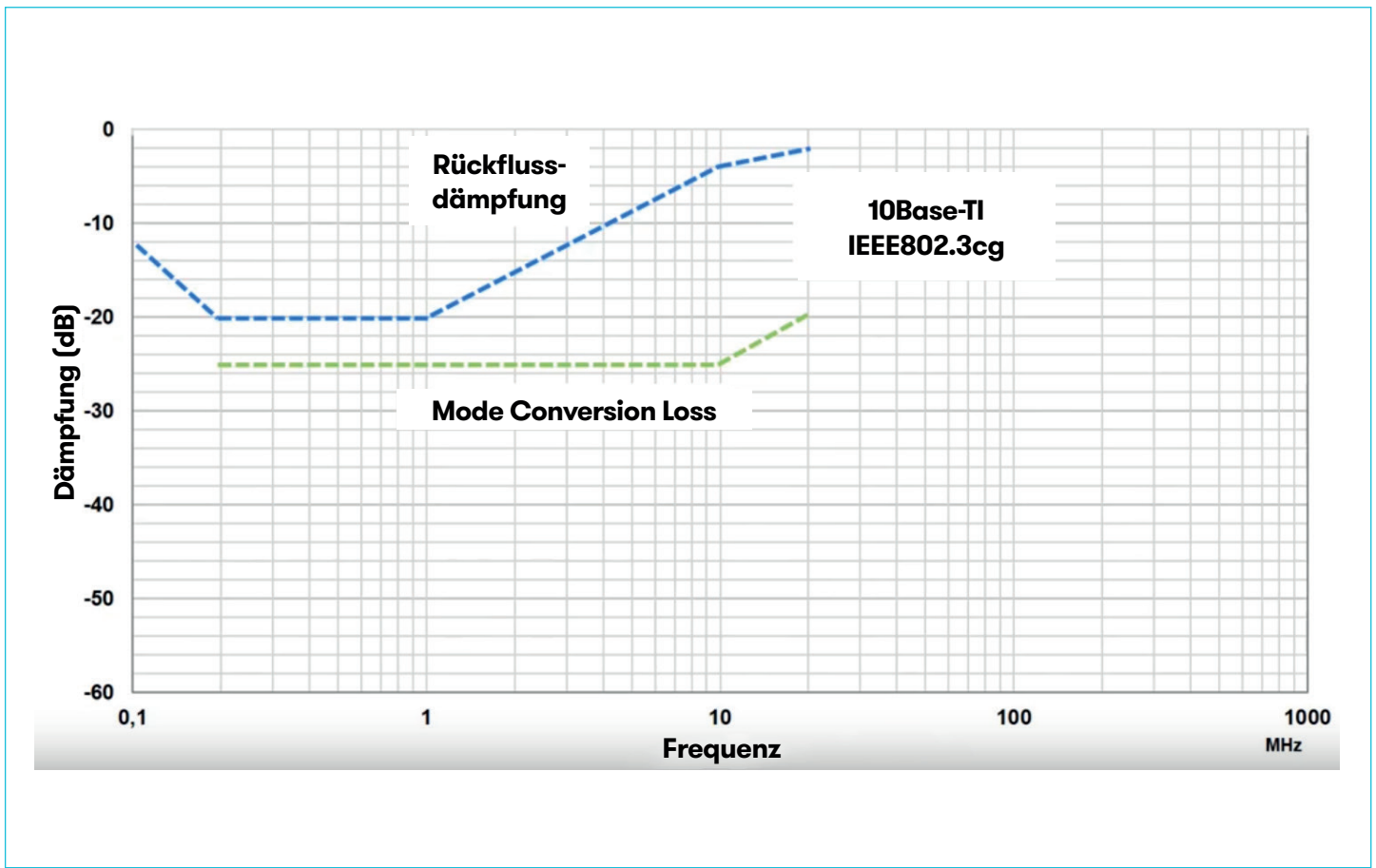
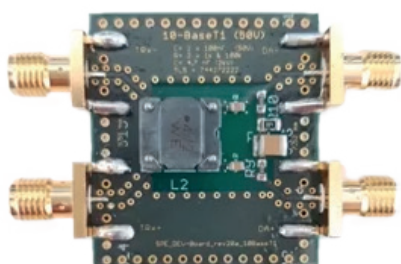


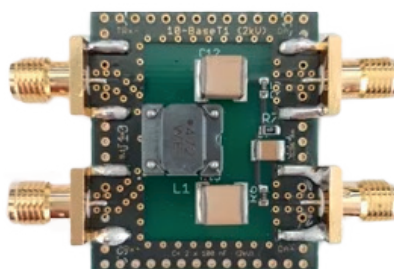
Bild 3. Anforderungen für die Übertragungseigenschaften aus der IEEE 802.3cg für 10BASE-T1L-Übertragungen. (Bild: Würth Elektronik)

Die Herausforderung bei 10Base-T1 liegt bei den tiefen Frequenzen zwischen 100kHz und 1MHz. Das bedeutet, man benötigt eine sehr hohe Impedanz. Dafür muss ein Common Mode Choke mit sehr vielen Wicklungen und sehr viel Kernmaterial eingesetzt werden. Bild 4 zeigt links die resultierenden Aufbauten der beiden Schaltungen mit Kondensator-Trennung (jeweils für 50V und in der Mitte für 2000V). Die eingesetzte Gleichtaktdrossel hat eine Induktivität von 2200µH pro Kanal.

50 V Kondensatoren



2000 V Kondensatoren



Signalübertrager



Bild 4. Die resultierenden Aufbauten der drei Schaltungen. (Bild: Würth Elektronik)

Rechts im Bild 4 ist die Übertragerlösung abgebildet. Im Vergleich zu den beiden anderen Aufbauten ist sie relativ klein. Das liegt daran, dass in dieser Schaltung auf die Gleichakttdrossel verzichtet werden kann, weil der Übertrager auch tieffrequente Gleichakttsignale Richtung Masse ableitet. Das geschieht über den Mittelpin des Übertragers, über den die Common-Mode-Signale abgeleitet werden. Der Kondensator C3 zwischen den Primärwicklungen des Übertragers sorgt dafür, dass auch für Frequenzen bis 35kHz gute Signaleigenschaften erzielt werden.

Messergebnisse

Bild 5 zeigt die Messergebnisse der drei Schaltungen für die Rückflusdämpfung. Die rote Kurve entspricht die der Übertrager-Lösung und die graue und schwarze Kurve sind die der jeweiligen Kondensator-Lösung. Außerdem ist die Grenzkurve der IEEE802.3cg eingezeichnet. Wie man sieht, hat die Übertrager-Lösung einen gewissen Abstand zur Grenzkurve im Bereich 100kHz und 200kHz. Die Kondensatorschaltungen (grau und schwarz) dagegen kommen der Grenzkurve gefährlich nahe.

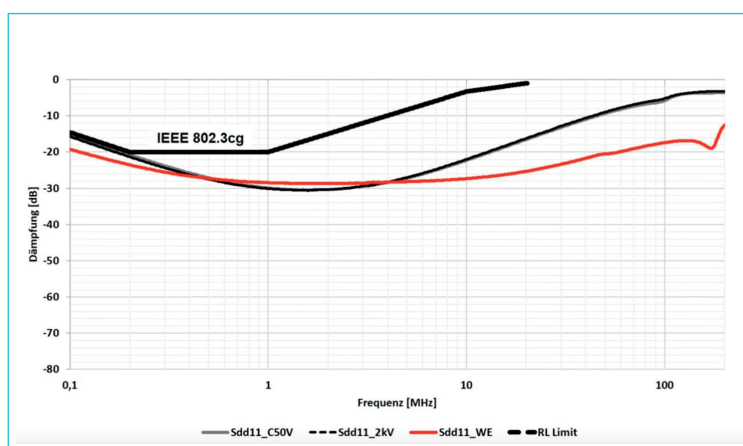


Bild 5. Die Messergebnisse der drei Schaltungen für die Rückflusdämpfung. (Bild: Würth Elektronik)

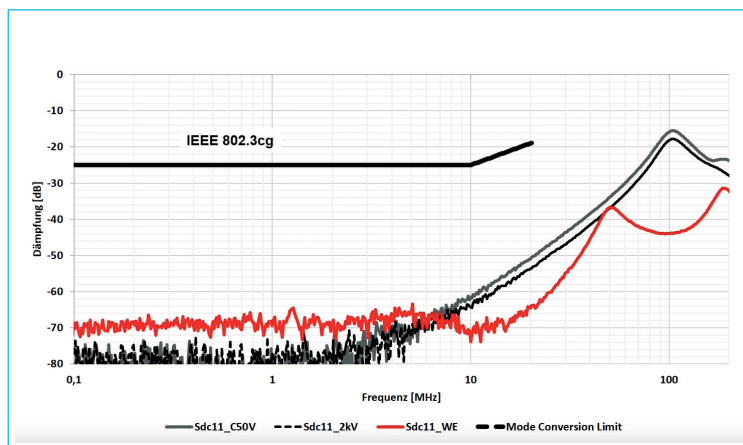


Bild 6. Die Messkurven für den Mode Conversion Loss. (Bild: Würth Elektronik)

Die Messkurven für den Mode Conversion Loss (Bild 6) sehen "freundlicher" aus. Hier kann man einen kleinen Vorteil der Kondensator-Lösungen erkennen. Gleichwohl ist der Abstand etwa 30dB zwischen Soll- und Ist-Kurve.

Schaltungen und Messungen für 100-Mbps-SPE

Für 100BASE-T1 zeigt Bild 7 die Grenzen für Rückflusdämpfung und Mode Conversion Loss laut IEEE 802.3bw. Hier besteht die Herausforderung im Mode Conversion Loss von -50dB bis 30MHz - aber bis 200MHz benötigt das System gute Signale.

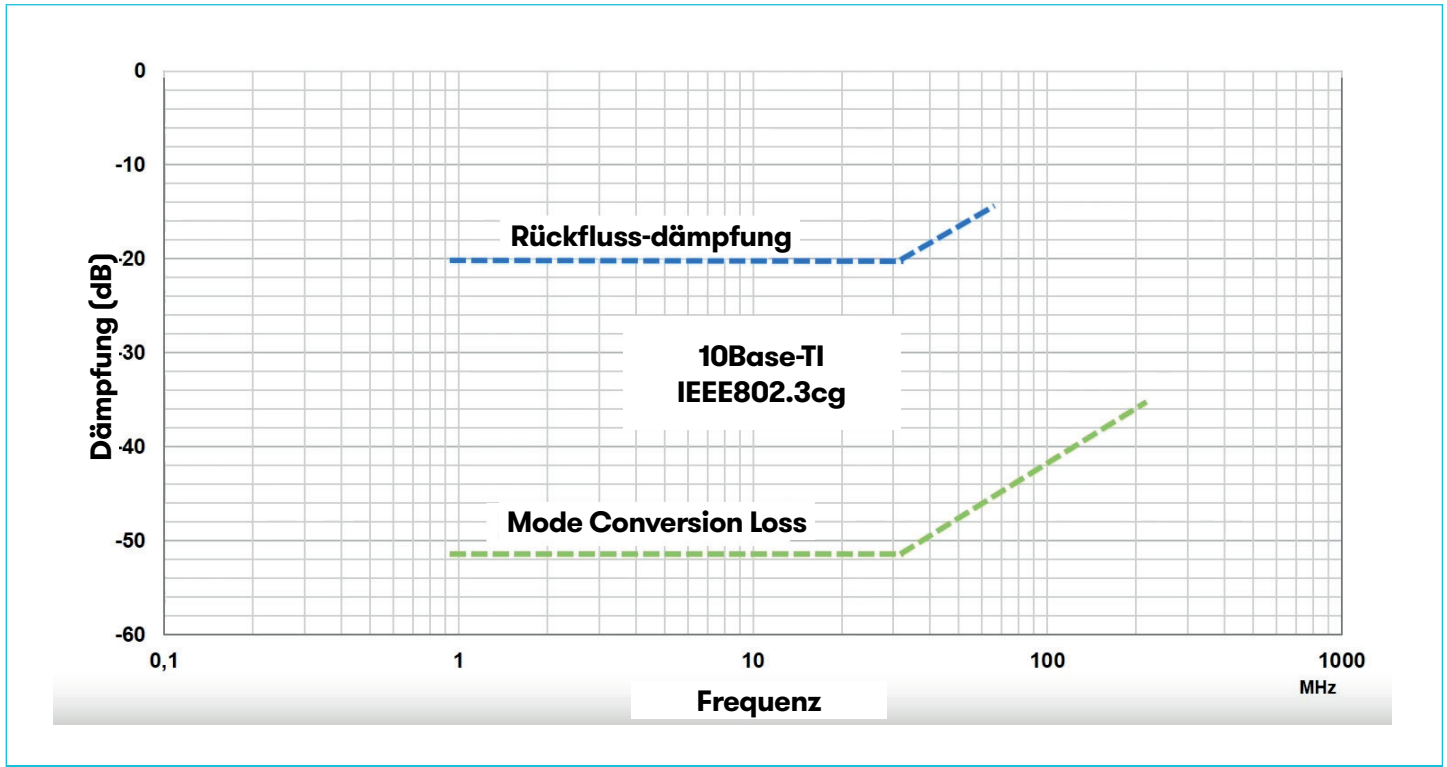


Bild 7. Grenzen für Rückflusdämpfung und Mode Conversion Loss laut IEEE 802.3bw für 100BASE-T1. (Bild: Würth Elektronik)

Der Schaltungsaufbau ändert sich dementsprechend. Hier kann die 50-V-Kondensator-Variante ihre Vorteile ausspielen: sehr kleine Kondensatoren und eine mäßig große Gleichtaktdrossel. Die eingesetzte Common Mode Choke hat 200 μ H. Immer noch sehr groß ist die 2-kV-Kondensator-Variante. Das Übertrager-Design ist wegen der höheren Frequenzen mit einer kleinen Gleichtaktdrossel ausgestattet.

Die Messergebnisse für die Rückflusdämpfung (Bild 8) zeigen, dass die Kondensator-Schaltungen bis zu einer Frequenz von 20MHz Vorteile gegenüber der Übertrager-Variante haben. Wobei aber auch diese Lösung einen guten Abstand zur Zielkurve hat.

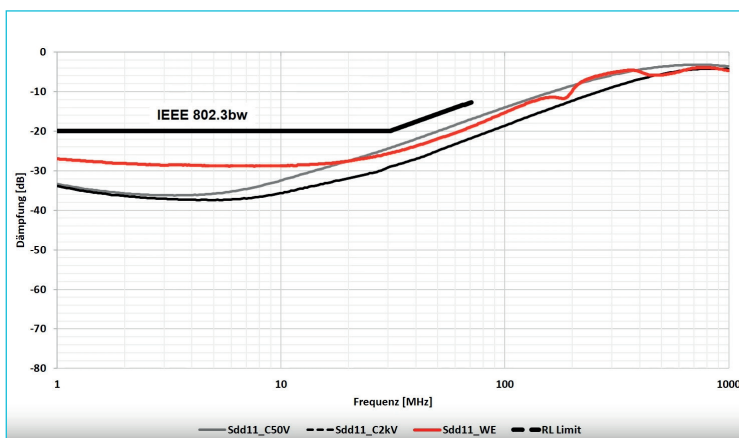


Bild 8. Die Messergebnisse für die Rückflusdämpfung im 100BASE-T1-System. (Bild: Würth Elektronik)

Beim Mode Conversion Loss (Bild 9) kommt die graue Kurve der 50-V-Kondensator-Lösung der Sollkurve gefährlich nahe. Die rote Kurve, also die Übertrager-Variante, hat wieder einen guten Abstand zu den Sollwerten.

Des PoDLs Kern

Um das Störverhalten der Übertrager-Lösungen mit Stromversorgung über die Datenleitung darzustellen, wurden Simulationen auf Basis der Werte ausgemessener Bauteile durchgeführt. Die Übertrager-Schaltung für 10BASE-T1L plus PoDL (Bild 9) wurde um ein Stromversorgungsteil mit einer differenziellen Choke erweitert. Die Choke ist relativ groß, weil hier eine hohe Induktivität erforderlich ist und wegen der relativ hohen Ströme (1,5A) auch große Drahtdurchmesser notwendig sind.

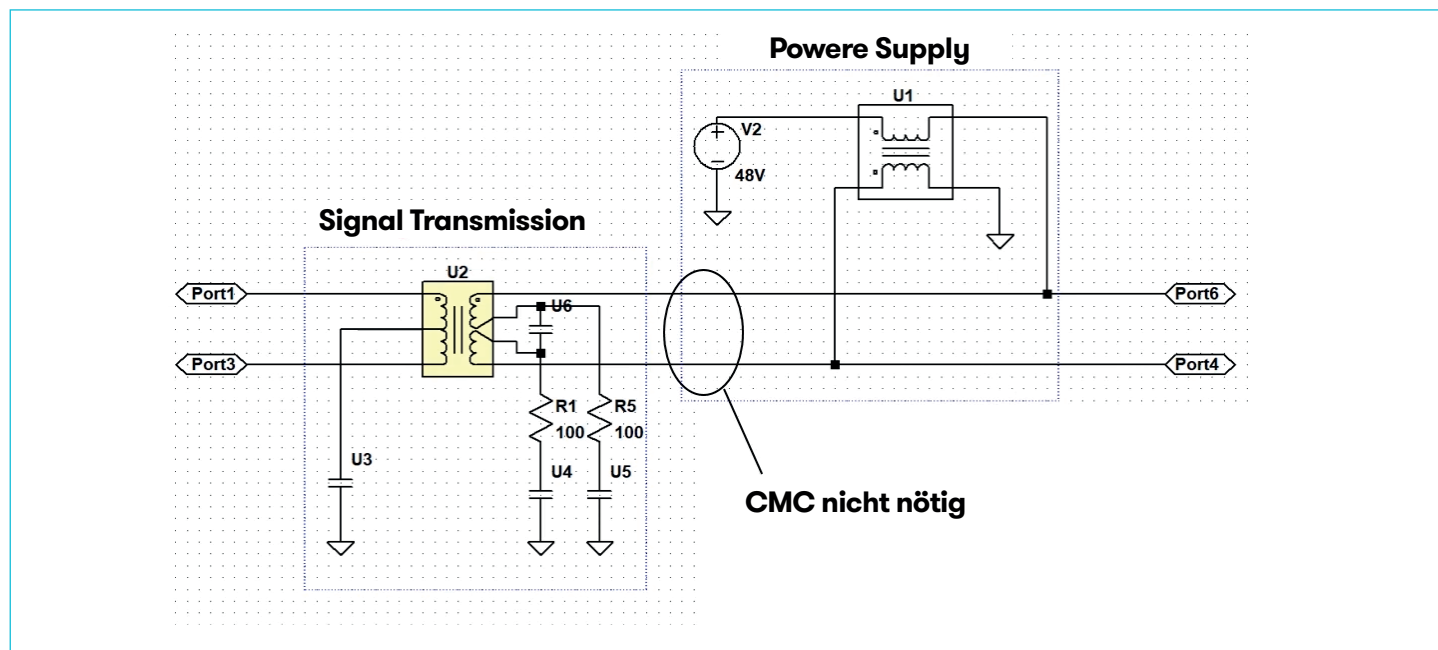


Bild 9. Übertrager-Schaltung für 10BASE-T1L plus PoDL. (Bild: Würth Elektronik)

Bild 10 zeigt die Ergebnisse der Simulation von Rückflusdämpfung und Mode Conversion Loss für 10BASE-T1 plus PoDL. Durch die Simulationen, die auf Messungen der Bauteile basieren, kommt es zu Schwankungen bei den tiefen Frequenzen. Die schwarzen Kurven (oben im Bild sieht man das Limit) für den Return Loss haben einen sehr guten Abstand zueinander. Das gleiche gilt für den Mode Conversion Loss (rote Linie).

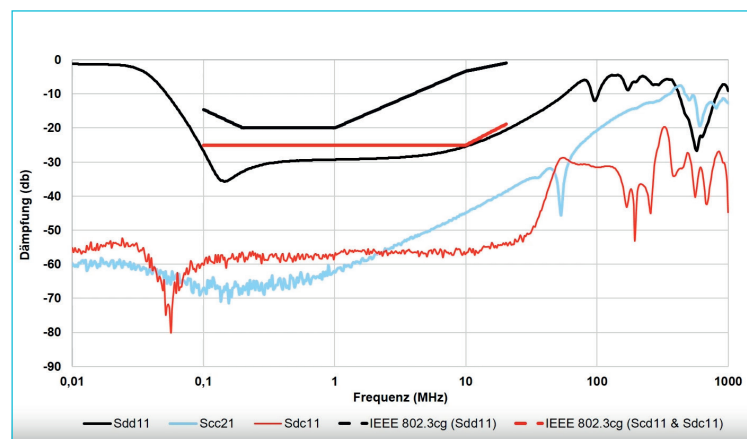


Bild 10. Rückflusdämpfung und Mode Conversion Loss für 10Base-T1 plus PoDL. (Bild: Würth Elektronik)

Die Schaltung für 100Base-T1 und Power over Data Line zeigt Bild 11. Auch hier sehen die Messungen (Bild 12) für den Return Loss ganz gut aus. Die Messkurven liegen weit entfernt von der Sollkurve. Beim Mode Conversion Loss könnte es bei den tiefen Frequenzen etwas kritisch werden. Hier muss man das Ergebnis mit "echten" Messungen noch einmal nachprüfen.

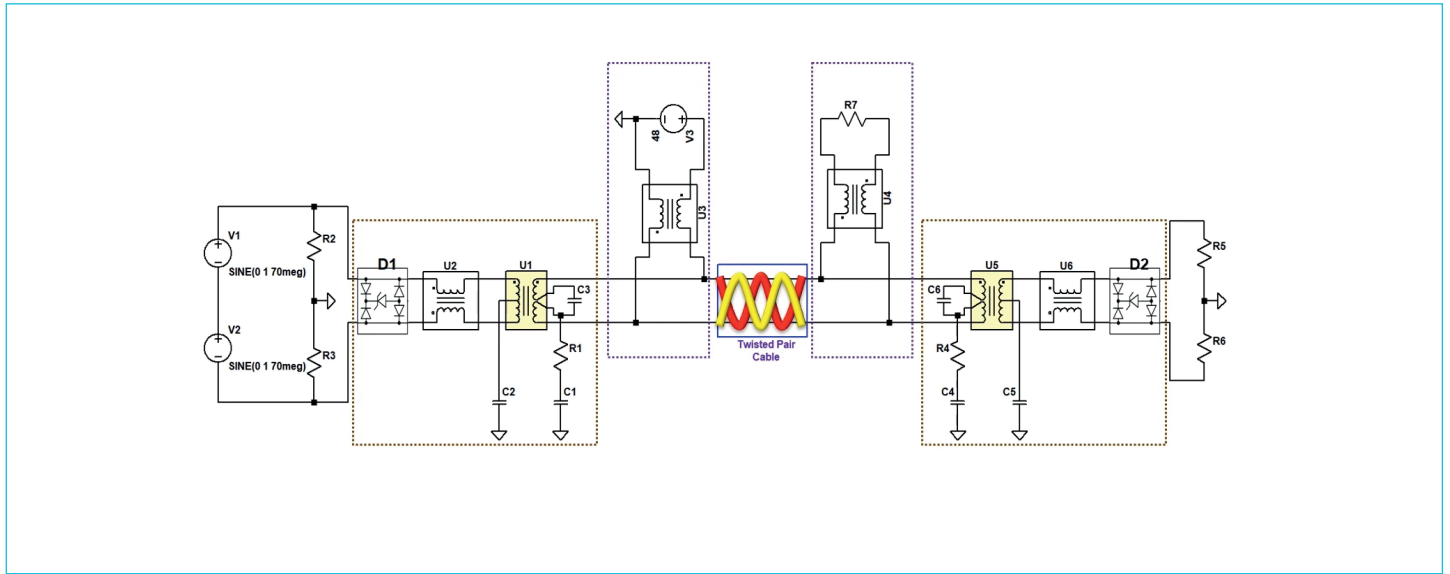


Bild 11. Die Schaltung für 100BASE-T1 und Power over Data Line. (Bild: Würth Elektronik)

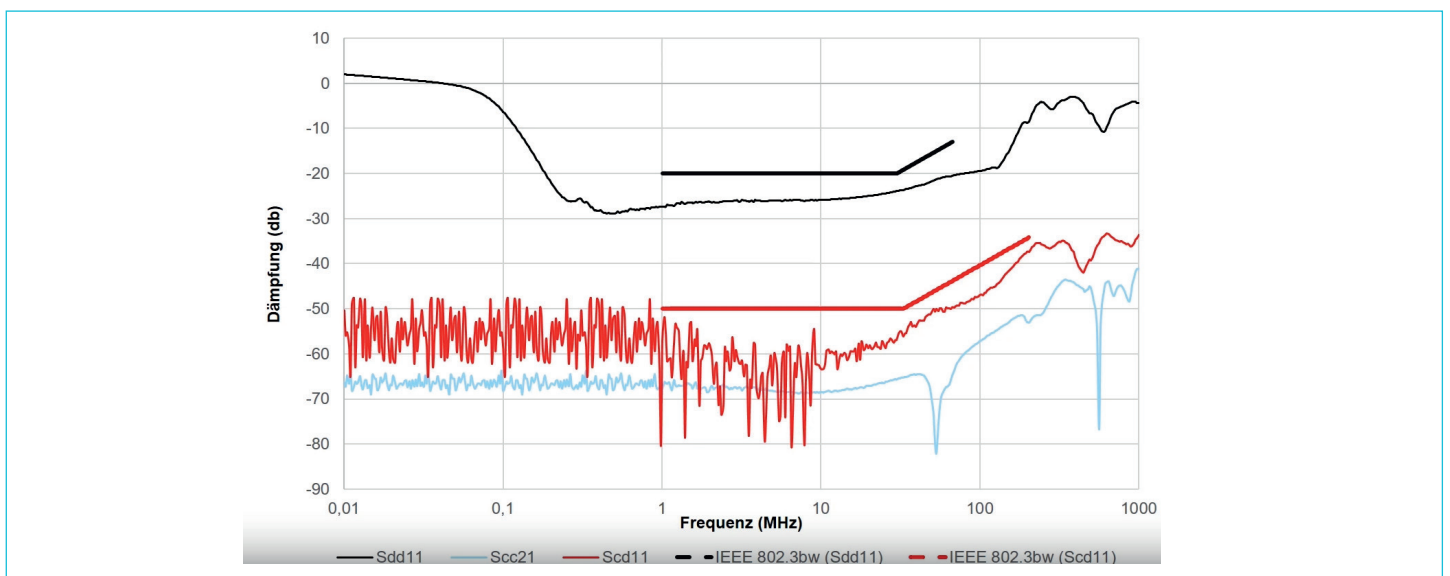


Bild 12. Rückflusdämpfung und Mode Conversion Loss für 100BASE-T1 plus PoDL. (Bild: Würth Elektronik)

Zusammenfassung

Kondensator-Lösungen können nicht garantieren, dass die Return-Loss-Anforderungen für 10BASE-T1 erfüllt werden. Obwohl man leicht in die andere Richtung tendiert: Die Übertrager-Lösung hat tatsächlich den kleinsten Footprint.

Bei 100BASE-T1 gilt, dass die 50-V-Kondensator-Trennung nur bedingt die Anforderungen an den Mode Conversion Loss erfüllen. Auch hier bietet die Übertrager-Lösung eine kompakte Stellfläche.

Nach Unterlagen der Firma Würth Elektronik (<http://www.we-online.de>)