



WHITE PAPER

ZERO PEAK BANDWIDTH (ZPB)

Einfluss von Dämpfungs- und Impedanzverläufen auf die PAM-16-Ethernet-Übertragung über Kupferdatenkabel

Moderne Multigigabit-Netzwerke nutzen leistungsstarke Modulationsverfahren wie PAM-16, die stabile und störungsfreie Übertragung über Twisted-Pair-Kabel erfordern. Diese steigenden Anforderungen machen eine neue Generation von Kabeltechnologie erforderlich. Die Qualität der Signalübertragung hängt dabei maßgeblich von den physikalischen Eigenschaften der verwendeten Kabel ab, insbesondere von deren Dämpfungs- und Impedanzverhalten über den relevanten Frequenzbereich.

Technische Grundlagen

Ethernet-Standards und PAM-Codierung

Mit der Einführung von 2.5GBASE-T, 5GBASE-T und 10GBASE-T stößt die Datenübertragung über Twisted-Pair-Kabel an physikalische Grenzen. Diese Standards setzen auf mehrstufige Modulationsverfahren wie PAM-16, bei denen pro Symbol bis zu vier Bit übertragen werden. Dadurch steigt die Empfindlichkeit gegenüber Reflexionen, Dämpfungsschwankungen und Inhomogenitäten im Kabel. Besonders im oberen Frequenzbereich sind gleichmäßige Impedanzverläufe und eine peakfreie Dämpfung entscheidend, um Signalverzerrungen und Bitfehler zu vermeiden.

Die Ethernet-Standards nutzen unterschiedliche Modulationsverfahren, abhängig von der angestrebten Datenrate und der jeweiligen Übertragungstechnologie. Ebenso ist das verwendete Kabelmedium entscheidend. Nachfolgend eine Übersicht:

Standard	Geschwindigkeit	Empfohlenes Kabelmedium	Modulation
100BASE-TX	100 Mbit/s	Kat.5	4B5B + MLT-3
1000BASE-T	1 Gbit/s	Kat.5 _e / Kat.6	PAM-5
2.5GBASE-T	2.5 Gbit/s	Kat.5 _e / Kat.6 / Kat.6 _A	PAM-16
5GBASE-T	5 Gbit/s	Kat.6 / Kat.6 _A	PAM-16
10GBASE-T	10 Gbit/s	Kat.6 _A / Kat.7 / Kat.7 _A	PAM-16
25GBASE-T	25 Gbit/s	Kat.7 _A / Kat.8	PAM-16 (adaptiert)

Tabelle: Übersicht der Ethernet-Standards, Datenraten und Modulationsverfahren

- **100BASE-TX:** Verwendet keine PAM, sondern eine 4B5B-Codierung mit anschließender MLT-3-Signalformung. Diese Technik ist ausreichend für Übertragungsraten von bis zu 100 Mbit/s, jedoch nicht skalierbar auf höhere Raten.

- **1000BASE-T (1 Gbit/s):** Nutzt PAM-5, bei dem fünf diskrete Amplitudenstufen pro Symbol übertragen werden. Damit können rechnerisch 2 Bit pro Symbol codiert werden. Zusätzlich dienen bestimmte Zustände der Fehlererkennung und -korrektur (z.B. Trellis-Coding). Die Übertragung erfolgt symmetrisch über vier Adernpaare, was die Komplexität des Empfängers erhöht, jedoch die Bandbreitennutzung effizient gestaltet.

- **2.5G/5G/10G/25GBASE-T (2.5–25 Gbit/s):** Verwenden PAM-16, d.h. 16 Amplitudenstufen, was 4 Bit pro Symbol erlaubt. Durch diese höhere Stufenzahl kann mehr Information pro Zeit übertragen werden, allerdings wird auch das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) deutlich kritischer. Die Pegelabstände zwischen den einzelnen Symbolen verringern sich stark, wodurch geringste Verzerrungen, Rauscheinflüsse oder Reflexionen zu Fehlinterpretationen führen können.

Die Wahl der PAM-16-Codierung ist eine Reaktion auf die Notwendigkeit, immer höhere Datenraten über bestehende, begrenzte Bandbreiten zu realisieren. Diese Strategie birgt jedoch hohe Anforderungen an:

- die Linearität und Symmetrie des Übertragungskanals
- die zeitliche Stabilität der Impulsantwort
- die Kontrolle von Inter-Symbol-Interferenz (ISI)
- die Fähigkeit zur Echtzeit-Fehlerkorrektur im Empfänger (z. B. LDPC-Codes bei 10GBASE-T)

Im Speziellen benötigen Systeme mit PAM-16 deutlich aufwändigere Signalprozessoren (DSP) zur Entzerrung (Equalization), adaptive Pegelkalibrierung sowie präzise Takt- und Synchronisationsmechanismen. Deshalb steigen die Anforderungen an die physikalische Qualität des Kabels: gleichmäßige Impedanzverläufe, geringe Dämpfungsschwankungen sowie minimales Übersprechen sind essenziell für eine funktionierende Hochgeschwindigkeitsübertragung.

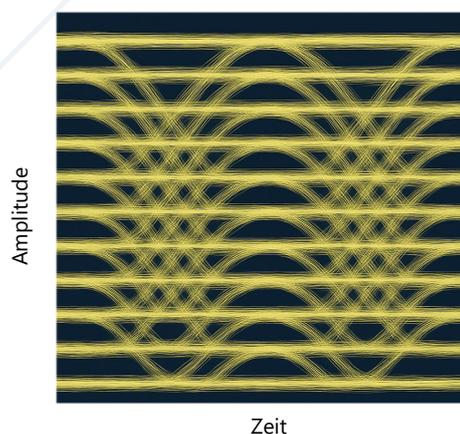


Bild: Beispiel eines Augendiagramms vom PAM16 Signal

Anforderungen an die Übertragungsstrecke

Für eine zuverlässige Übertragung von PAM-16-Signalen sind folgende Parameter kritisch:

- **Signal-Rausch-Verhältnis (SNR):** Ein hohes SNR ist erforderlich, um die engen Amplitudenabstände bei PAM-16 zuverlässig zu unterscheiden.
- **Impedanzkonstanz:** Abweichungen von der charakteristischen Impedanz führen zu Reflexionen und Signalverzerrungen.
- **Dämpfungsverlauf:** Ein gleichmäßiger Dämpfungsverlauf über den Frequenzbereich verhindert selektive Frequenzverluste und Inter-Symbol-Interferenz (ISI).
- **Übersprechen (NEXT, FEXT):** Geringes Übersprechen zwischen den Adernpaaren ist entscheidend für die Signalqualität.

Vergleich zweier Kategorie 7_A-Kabel

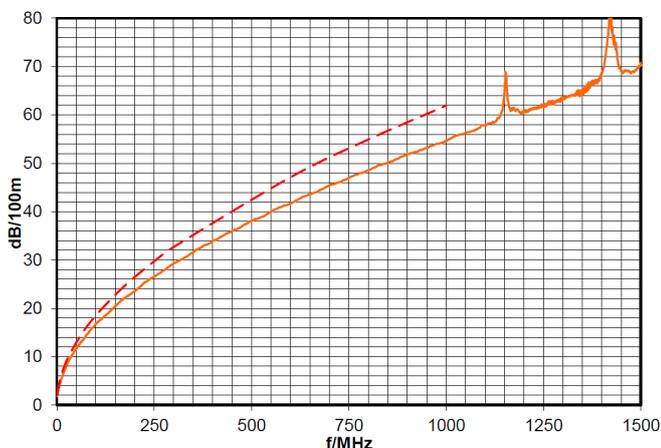
Use Case: zwei Anbieter bieten Kat.7_A-Kabel mit einer normativen Grenzfrequenz von 1000 MHz an. Kabel A ist gemäß Datenblatt bis 1500 MHz spezifiziert, weist jedoch im Bereich oberhalb von 1000 MHz deutliche Peaks auf. Im Gegensatz dazu garantiert das Kabel B der KERPEN DATACOM GmbH mit ZPB-Technologie eine peak-freie Übertragung bis 1300 MHz.

Beispielkonstellation:

In einem direkten Vergleich werden zwei Kat.7_A-Kabel gegenübergestellt. Besonderes Augenmerk gilt dabei dem Datenkabel der KERPEN DATACOM GmbH mit ZPB-Technologie (Zero Peak Bandwidth), das gezielt für eine peak-freie Hochfrequenzübertragung optimiert wurde.

Kabel A (Anbieter "XYZ"):

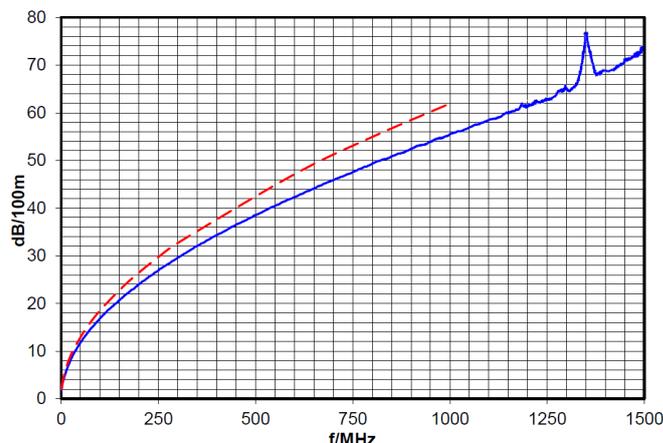
- Frequenzbereich: spezifiziert bis 1500 MHz, deutlich oberhalb der Kat.7_A-Anforderungen
- Messverhalten: weist insbesondere im Bereich zwischen 1000 und 1500 MHz mehrere ausgeprägte Peaks in Dämpfung und Impedanz auf, mit Resonanzverhalten bei Frequenzwechselln
- Kabel ist normkonform für Kat.7A hinsichtlich maximaler Frequenzangabe (1000MHz, jedoch mit instabilem Übertragungsverhalten in kritischen Frequenzzonen



Kabel A: Dämpfungsverlauf von 1 bis 1500 MHz

Kabel B (KERPEN DATACOM GmbH mit ZPB-Technologie):

- Frequenzbereich: spezifiziert bis 1300 MHz, deutlich oberhalb der Kat.7_A-Anforderungen
- Vollständig peak-freier Verlauf im Bereich 1–1300 MHz, keine Resonanzeffekte, keine Frequenzsprünge
- Technologischer Hintergrund: Basierend auf der ZPB-Technologie, entwickelt mit KI-gestützten Optimierung von Twisted-Pair-Datenkabeln
- Besonderheit: Die ZPB-optimierten Kabel garantieren nicht nur Normkonformität, sondern eine tatsächliche Überlegenheit in der Hochfrequenzübertragung durch gezielte Peak-Vermeidung
- Messverhalten: linearer, kontinuierlicher Dämpfungsverlauf ohne nennenswerte Peaks



Kabel B : Dämpfungsverlauf von 1 bis 1500 MHz, peak-frei bis ca. 1340 MHz mit ZPB Technologie

Im direkten Vergleich zeigen sich Unterschiede in der Ausprägung der frequenzabhängigen Eigenschaften: Während Kabel A im oberen Frequenzbereich zwischen 1000 und 1250 MHz signifikante Unregelmäßigkeiten zeigt, weist das ZPB-Kabel der KERPEN DATACOM GmbH einen weitgehend konstanten Dämpfungsverlauf auf. Dies wirkt sich insbesondere bei Anwendungen mit hohen Übertragungsraten bereits ab 10 Gbit/s auf die Signalintegrität und Systemsicherheit positiv aus.

Die im oberen Frequenzbereich auftretenden Peaks bei Kabel A führen zu lokalen Reflexionen und Verzerrungen des Signals. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit von Bitfehlern, insbesondere bei komplexen Modulationsverfahren wie PAM-16, das in 10 GBASE-T eingesetzt wird. In der Praxis bedeutet das: Obwohl Kabel A formal noch die Norm erfüllt, ist mit einer signifikant höheren Bitfehlerrate zu rechnen. Dies kann dazu führen, dass Übertragungsraten von 10 oder 25 Gbit/s instabil sind oder gar nicht dauerhaft erreicht werden. Die Folge sind Nachverhandlungen bei der Linkgeschwindigkeit, Paketverluste oder reduzierte Systemperformance – insbesondere bei kritischen Echtzeitanwendungen oder hoher Netzwerklast. In professionellen Netzwerken kann dies zu unerwarteten Systemausfällen, erhöhtem Wartungsaufwand oder gar zur Notwendigkeit kostenintensiver Nachinstallationen führen.

Auswirkungen von Dämpfungs- und Impedanzpeaks

Peaks in Dämpfung und Impedanz – also sprunghafte Veränderungen der frequenzabhängigen Übertragungseigenschaften – wirken sich direkt auf die Qualität der Datenübertragung aus und sind insbesondere im Kontext hochbitratiger Modulationsverfahren wie PAM-16 kritisch zu bewerten.

- **Reflexionen und Return Loss:** Impedanzsprünge verursachen Teilreflexionen an Stellen, an denen das Kabel nicht der charakteristischen Impedanz entspricht. Diese reflektierten Signale überlagern sich mit dem ursprünglichen Signal und führen zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz. Dies äußert sich als Jitter und Amplitudenverfälschung im Empfängersignal.
- **Verzerrung der Impulsantwort (Channel Impulse Response, CIR):** Eine gleichmäßige Impulsantwort ist Voraussetzung für eine verlustarme Übertragung. Lokale Dämpfungsmaxima in bestimmten Frequenzbändern beeinflussen die Gruppenlaufzeit (Group Delay) und führen zu sogenannter Group Delay Distortion. Diese bewirkt eine zeitliche Verschmierung des Signals und führt zu Inter-Symbol-Interferenz (ISI), da sich aufeinanderfolgende Symbole überlagern.
- **Reduziertes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR):** Frequenzabhängige Verluste durch Dämpfungspeaks bewirken eine selektive Schwächung bestimmter Spektralanteile. Dies reduziert lokal das SNR und verschlechtert die Decodierbarkeit der PAM-16-Stufen, deren Pegelabstände nur geringe Störmargen zulassen.
- **Nichtlineare Entzerrung erforderlich:** Um die durch Peaks entstehenden Verzerrungen auszugleichen, müssen am Empfänger aufwändige adaptive Entzerrer (Equalizer) eingesetzt werden. Die Komplexität dieser digitalen Signalverarbeitung (DSP) steigt erheblich, was Energieverbrauch und Latenz erhöht.

In der Summe führen Dämpfungs- und Impedanzpeaks zu einer instabilen und fehleranfälligeren Übertragung, insbesondere bei hohen Frequenzen und engen Symbolabständen wie bei PAM-16. Ein peak-freier Verlauf des Übertragungsverhaltens – wie bei ZPB-Kabeln – trägt entscheidend zur Stabilität und Effizienz der Datenübertragung bei.

Vorteile eines gleichmäßigen Frequenzverhaltens

Ein Kabel mit konstantem Dämpfungs- und Impedanzverlauf zeigt in der Frequenzdomäne ein gleichförmiges Übertragungsverhalten ohne ausgeprägte spektrale Schwankungen. Diese Gleichförmigkeit minimiert Reflexionen (geringer Return Loss), reduziert die Notwendigkeit komplexer Entzerrungsalgorithmen und bewirkt eine bessere Impulsantwort des Kanals, was sich in einem geringeren Inter-Symbol-Interferenz-Anteil (ISI) niederschlägt.

Bei Kabel A mit dokumentierten Dämpfungs- und Impedanzpeaks sind hingegen in bestimmten Frequenzbändern selektive Verluste messbar. Diese führen zu lokal verschlechtertem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und können eine asymmetrische Gruppenlaufzeitverzögerung verursachen. Die daraus resultierende Group Delay Distortion verschlechtert die zeitliche Auflösung der empfangenen Symbole, was insbesondere bei PAM-16-Übertragung problematisch ist, da dort die Pegelabstände gering sind und das Decoding empfindlich auf Signalverzerrungen reagiert.

Das ZPB-Datenkabel von KERPEN DATACOM GmbH wurde so entwickelt, dass es über den gesamten Frequenzbereich bis 2000 MHz eine gleichmäßige Übertragungscharakteristik ohne signifikante Peaks aufweist. Dies begünstigt ein symmetrisches Zeitverhalten, stabile Impedanzübergänge und konstante SNR-Bedingungen über das gesamte genutzte Spektrum hinweg. Aus physikalischer Sicht bietet ein solches Verhalten Vorteile für:

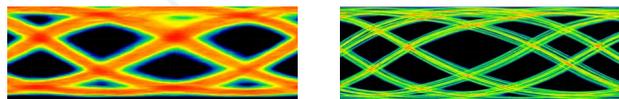
- **Stabile Signalübertragung:** Gleichmäßige Dämpfung und konstante Impedanz minimieren reflektierte Signalanteile und Resonanzeffekte.
- **Skalierbarkeit bei Datenraten:** Da keine spektralen Engstellen auftreten, ist eine robuste Umsetzung höherer Modulationsstufen wie PAM-16 oder sogar PAM-32 möglich.
- **Zukunftssicherheit:** Kabel mit flachem, peak-freiem Frequenzverlauf zeigen eine höhere Systemmarginalität und sind daher auch für künftige Ethernet-Generationen besser geeignet.

Visualisierung: Augendiagramme

Augendiagramme sind ein bewährtes Mittel zur Analyse und Visualisierung der Signalqualität in digitalen Hochgeschwindigkeitsübertragungssystemen. Sie stellen eine Überlagerung vieler einzelner Bit- bzw. Symbolübergänge in einem Zeitfenster dar und ermöglichen eine direkte Beurteilung der Qualität der physikalischen Übertragungsstrecke.

Aussagekraft von Augendiagrammen

Durch die Analyse eines Augendiagramms lassen sich typische Einflüsse von Dämpfungs- und Impedanzstörungen, wie sie durch Peaks im Frequenzverlauf entstehen können, sehr gut erkennen. Ein idealer Übertragungskanal zeigt ein weit geöffnetes „Auge“ mit klar voneinander getrennten Amplitudenstufen (z. B. bei PAM-16: 16 horizontale Augenöffnungen), stabilen Übergängen und geringen Jitter-Effekten. Dies ist ein Hinweis auf hohe Signalintegrität, ein günstiges Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und geringe Inter-Symbol-Interferenz (ISI).



Augendiagramme: links PAM Signal mit hoher BER (Bit Error Rate); rechts PAM Signal über ZPB optimierte Datenpaare.

Treten hingegen Unregelmäßigkeiten in der Übertragungsstrecke auf – wie z.B. durch Dämpfungspeaks oder Impedanzabweichungen – so schließen sich die Augenbereiche zunehmend. Die Pegelgrenzen verschwimmen, Übergänge werden unscharf und es kommt zu Überlagerungen. Dies äußert sich im Diagramm durch verwaschene, verrauschte Signale, asymmetrische Übergänge und letztlich eine Reduktion der Augenöffnung.

Die visuelle Darstellung macht damit unmittelbar sichtbar, welche Auswirkung eine nicht konstante physikalische Strecke auf das Signal hat – unabhängig davon, ob diese durch Kabel, Steckverbindungen oder externe Störungen bedingt ist. So lassen sich Kabeltypen, wie z. B. das ZPB-Kabel mit gleichmäßiger Dämpfung, durch eine stabile und symmetrische Augendarstellung verifizieren, während Kabel mit ausgeprägten Peaks eine deutlich instabilere Darstellung zeigen.

Technologischer Hintergrund der ZPB-Datenkabel

Die Zero Peak Bandwidth-Technologie (ZPB) wurde von der KERPEN DATACOM GmbH als technologische Antwort auf die stetig steigenden Anforderungen an die Datenübertragungskapazität entwickelt, die durch moderne Anwendungen wie 10G-BASE-T, 25GBASE-T sowie zukünftige Hochgeschwindigkeitsstandards getrieben werden. Ziel der Entwicklung war es, eine Übertragungscharakteristik zu realisieren, die über den normativ relevanten Frequenzbereich hinaus eine konstant hohe Signalintegrität gewährleistet – insbesondere im Hinblick auf frequenzabhängige Störungen wie Dämpfungsspeaks und Impedanzsprünge.

ZPB geht über die Anforderungen gängiger Normen hinaus und definiert einen neuen Qualitätsstandard: Ein kontinuierlich peak-freier Dämpfungsverlauf im gesamten spezifizierten Frequenzbereich. Die Technologie wurde auf Grundlage wissenschaftlicher Ergebnisse aus einem öffentlich geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekt entwickelt, bei dem KI-Modelle zur gezielten Kontrolle der frequenzabhängigen Übertragungseigenschaften eingesetzt wurden.

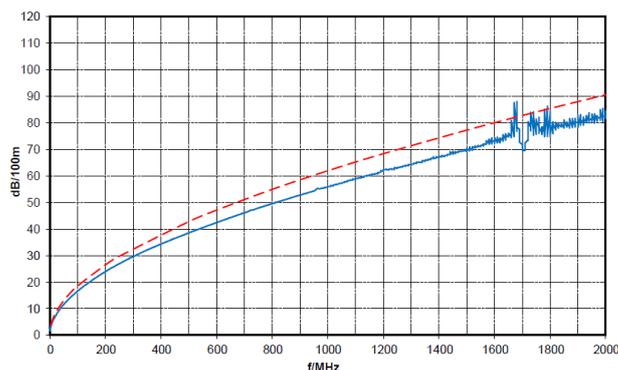
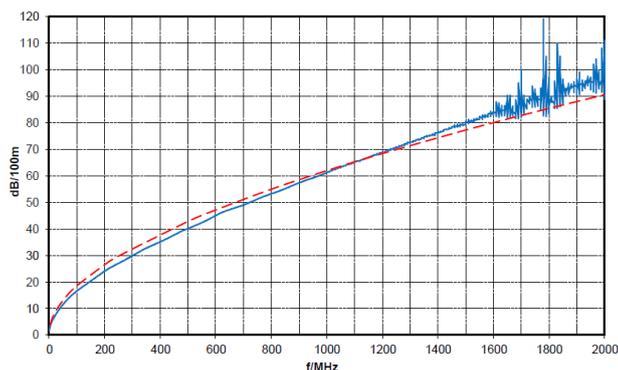
Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das Resultat sind Datenkabel für strukturierte Verkabelung mit herausragender Signalreinheit, ideal für PAM-16-basierte Ethernet-Anwendungen bis 25GBASE-T und perspektivisch auch darüber hinaus.



Diese beiden Diagramme veranschaulichen die Wirksamkeit der Zero Peak Bandwidth Technologie im Entwicklungsprozess.

Links: Der ursprüngliche Dämpfungsverlauf eines AWG22-Datenpaares erfüllt knapp die normativen Anforderungen bis 1000 MHz, weist jedoch deutlichen Anstieg der Dämpfung und Peaks oberhalb dieses Bereichs auf.

Rechts: Durch gezielte Anpassung von Schlaglänge, Kapazität und Impedanz zeigt das optimierte Datenpaar eine gleichmäßige, peakfreie Dämpfung bis 1650 MHz – mit HF-Reserven von bis zu 7 dB gegenüber den normativen Grenzwerten. Grundlage hierfür sind KI-gestützte Vorhersagemodelle im Entwicklungsprozess.

Fazit

Für Ethernet-Übertragungen mit hohen Datenraten und PAM-16-Codierung ist die Wahl des geeigneten Kabels entscheidend. Kabel mit gleichmäßigem Dämpfungs- und Impedanzverlauf über den gesamten spezifizierten Frequenzbereich bieten eine zuverlässigere Signalübertragung, geringere Fehlerquoten und bessere Zukunftssicherheit. Daher ist das Datenkabel mit Zero Peak Bandwidth-Technologie (ZPB) der KERPEN DATACOM GmbH mit seiner garantierten peak-freien Übertragung im Bereich bis zu 2000 MHz die erste Wahl für anspruchsvolle Ethernet-Anwendungen. Es kombiniert herausragende elektrische Eigenschaften mit einem reproduzierbar gleichmäßigem Frequenzverhalten und stellt damit eine belastbare, zukunftssichere Lösung für moderne Netzwerkinfrastrukturen dar. Die hohe Gleichmäßigkeit der Übertragungseigenschaften sorgt für eine fehlerfreie und robuste Datenübertragung ohne ständige Unterbrechungen, mit einer geringen Bitfehlerrate (BER) und minimalen Paketverlusten. Diese Kabel sind besonders für professionelle Anwender geeignet, die besonderen Wert auf Stabilität, Betriebssicherheit und nachhaltige Leistungsfähigkeit ihrer Netzwerkinfrastruktur legen.

Sie möchten mehr über die ZPB-Technologie und verfügbare Kabelvarianten erfahren?

Sprechen Sie mit uns – unter kerpen-data.com/kontakt, telefonisch unter +49 2402 17 1 oder per E-Mail an info@kerpen-data.com.