



# Einleitung: TSN – Time Sensitive Networking



**Dr. René Hummen** – Future Technologies, Hirschmann Automation and Control GmbH



**Stephan Kehrer** – Future Technologies, Hirschmann Automation and Control GmbH



**Dr. Oliver Kleineberg** – Advance Development, Hirschmann Automation and Control GmbH

Time-Sensitive Networking (TSN) wird derzeit als die Zukunftstechnologie von der IEEE entwickelt, die konventionelles Ethernet nach IEEE 802.1 und IEEE 802.3 um einen Grad an Determinismus bei der Datenübertragung ergänzt, wie es bisher nicht möglich war.

Konkret bedeutet dies Ethernet mit:

- berechenbaren und garantierten Ende-zu-Ende Latenzen,
- stark begrenzten Latenzschwankungen (Jitter) und
- extrem geringem Paketverlust.

Aber für welche Anwendungsfelder sind diese Eigenschaften eigentlich relevant und wie funktioniert TSN überhaupt? Dieses White Paper gibt einen Überblick über die wichtigsten TSN-Funktionen und zeigt auf, welche Vorteile der Einsatz von TSN in anspruchsvollen Industrienetzen bietet.

## Inhaltsverzeichnis

- Einleitung.....1
- Echtzeitkommunikation heute und in der Welt der Industrie 4.0.....2
- TSN – Mechanismen und Zusammenhänge.....3
  - Zeitliche Priorisierung mit dem Time-Aware Scheduler.....3
  - Notwendigkeit von Schutzbändern und Unterbrechung von Ethernet-Frames.....4
  - Synchrone Übertragungszyklen als Grundvoraussetzung.....6
  - Traffic Shaping bei unscharfen Übertragungszeitpunkten.....6
  - Gemeinsame Verwendung von Traffic Shapern und Schemulern.....8
  - Unterbinden von Störverkehr mit Ingress Filtering und Policing.....8
  - Sicher ist sicher: Pfadredundanz.....8
  - Konfiguration des Gesamtsystems TSN.....9
- Zusammenfassung und Ausblick.....11
- Referenzen.....11

**Be certain.  
Belden.**

## Echtzeitkommunikation heute und in der Welt der Industrie 4.0

Bereits heute werden Latenzgarantien als Grundvoraussetzung für die Datenübertragung mit Echtzeitanforderungen bei einer Reihe von Anwendungsfeldern benötigt. Hierzu zählen insbesondere die Antriebstechnik, die Automatisierung der Steuerungstechnik in der Stromerzeugung und in den Übertragungsnetzen, sowie das Transportwesen. Bei diesen Anwendungsfeldern liegen die Zykluszeiten für die Übertragung von zeitkritischen Prozessdaten bei teils deutlich unter 1 ms. Um solche Zykluszeiten mit entsprechenden Latenzgarantien bereits heute erreichen zu können, werden typischerweise Echtzeit-Kommunikationsverfahren wie beispielsweise EtherCAT, Profinet IRT oder SERCOS III eingesetzt. Diese Verfahren basieren zwar auf konventionellem Ethernet, erweitern dieses allerdings zwecks Gewährleistung von Latenzgarantien in zueinander inkompatibler Form. Als Folge ist der Markt der Echtzeit-Ethernet-Lösungen derzeit stark fragmentiert und aufgrund der Inkompatibilität der vorherrschenden Insellösungen in seiner Entwicklungsfähigkeit gelähmt. TSN hat hier das Potential, durch eine einheitliche, von der IEEE standardisierte Bitübertragungsschicht den Markt für Echtzeit-Ethernet für eine breite Nutzung zu öffnen. Anwenderseitig beinhaltet eine solche Homogenisierung das

Potential für Skaleneffekte und somit deutliche Kosteneinsparungen sowie Zukunfts- und Investitionssicherheit beim Einsatz von Echtzeit-Ethernet.

Neben den obigen Anwendungsfeldern mit "harten" Echtzeitanforderungen können auch weitere Bereiche, wie zum Beispiel die Prozessautomatisierung, von TSN profitieren. Hier sind zwar die Zykluszeiten oftmals deutlich größer als beispielsweise bei der Antriebstechnik. Allerdings werden auch in diesem Bereich häufig garantierte Ende-zu-Ende Latenzen benötigt. In aktuellen Netzwerken werden diese Garantien typischerweise durch eine Überprovisionierung der verfügbaren Bandbreite näherungsweise umgesetzt. Mit TSN wird es hingegen möglich, auf solche Näherungslösungen zu verzichten und die benötigte Bandbreite bedarfsgenau und garantiert für die zu übertragenden Prozessdaten bereitzustellen. TSN erlaubt somit eine Planung und Dimensionierung zukünftiger Automatisierungsnetzwerke entsprechend der tatsächlich zu erwartenden Bandbreitenanforderungen.

Richtet man nun den Blick in die Zukunft, so ist auch hier eine stetig zunehmende Bedeutung von TSN absehbar. Bereits heute befindet sich die industrielle Automatisierung in einem Umbruch, der von der Vision getrieben wird, sehr viel flexiblere, intelligentere und dynamischere Produktionsstätten zu ermöglichen als dies heute noch der Fall ist. Begriffe, die in diesem Zusammenhang häufig

fallen, sind „Industrie 4.0 (I4.0)“ und „Industrial Internet of Things (IIoT)“. Sie beschreiben die Vision einer intelligenten Produktionsumgebung, in der Fertigungsmaschinen, Förderrichtungen und Werkstücke in ständigem Kontakt zueinander stehen, um so den Produktionsprozess automatisiert zu unterstützen. Ermöglicht wird dies durch eine Zunahme der Vernetzung der an der Produktion beteiligten Sensoren und Aktoren sowie durch eine verstärkte Einbindung der (lokalen) Cloud, wo beispielsweise virtuelle Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) direkt in den Produktionsprozess eingreifen. Diese Veränderungen wirken sich auch auf die Modelle aus, auf deren Basis heute Automatisierungsnetzwerke entwickelt und geplant werden. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird sich beispielsweise die bekannte Automatisierungspyramide langfristig und in einem stetigen Transformationsprozess hin zu einer Automatisierungssäule entwickeln. Bei der Automatisierungssäule müssen jedoch sowohl die Feld- als auch die Verbindungsebene enge, zeitliche Anforderungen an die Datenübertragung erfüllen können.

Neben den zeitlichen Übertragungsanforderungen, berechenbare und möglichst geringe Latenz wie auch Jitter, zeichnet sich darüber hinaus ebenfalls eine verstärkte Konvergenz der heute noch parallel innerhalb einer Produktionsstätte existierenden, unterschiedlichen Netzwerke ab. Während also in aktuellen Anlagen zeitkritische

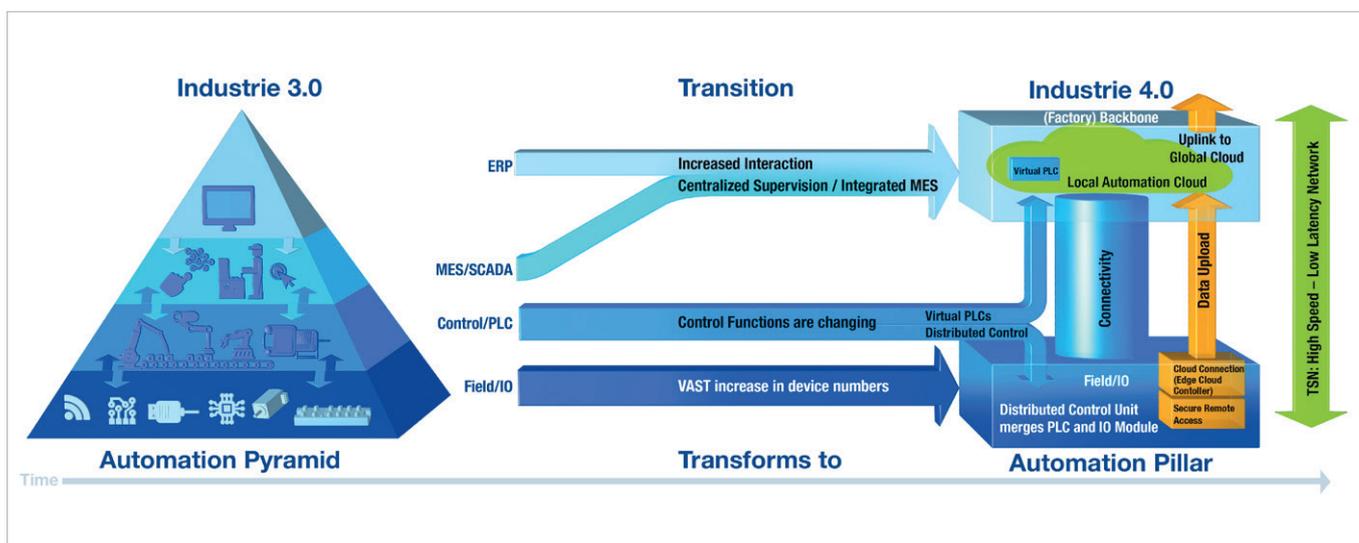


Abb. 1: Transformation von der Automatisierungspyramide hin zur Automatisierungssäule in zukünftigen Automatisierungsnetzen

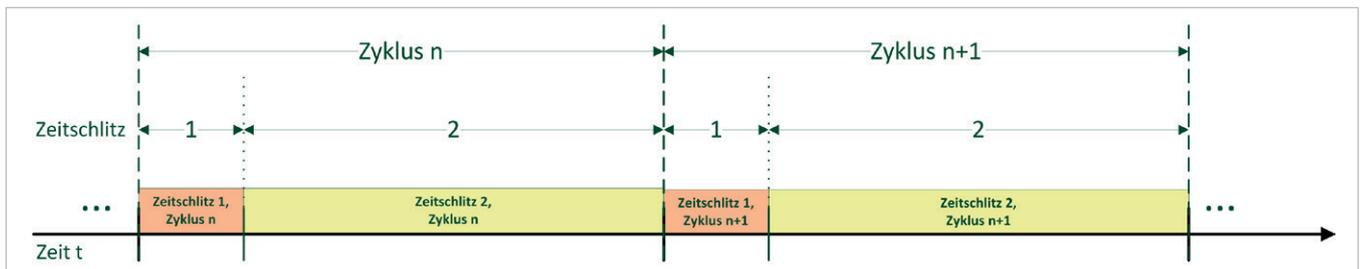


Abb. 2: Das Zeitschlitzverfahren erlaubt die Reservierung von Zeitschlitzen innerhalb eines Zyklus für die zeitlich priorisierte Übertragung von periodischen Echtzeitdaten

Steuerungsinformationen oftmals über dedizierte Netzwerke übertragen werden, ist absehbar dass diese Daten zukünftig zusammen mit „Best-Effort“ Daten (z.B. Konfigurations- und Monitoringinformationen) und Daten mit „weichen“ Echtzeitanforderungen (z.B. Videodaten von Überwachungskameras) über ein gemeinsames Netzwerk übertragen werden. Auch für solche konvergenten Netzwerkinfrastrukturen mit teils hohen Bandbreitenbedarfen auf der Verbindungsebene und harten sowie weichen Echtzeitanforderungen auf der Feld- und Verbindungsebene bietet TSN eine Lösung. Es ist also zu erwarten, dass TSN eine zentrale Rolle in zukünftigen Netzwerken für anspruchsvolle und kritische Anwendungen spielen wird.

## TSN – Mechanismen und Zusammenhänge

Mit TSN erhält ein Grad an Determinismus Einzug in die Ethernet-basierte Datenkommunikation, der auch den höchsten

Anforderungen moderner Steuerungnetzwerke, beispielsweise in der Industrieautomatisierung und der Automobilindustrie, gerecht wird. Bereits heute ist dabei absehbar, dass sich die Zielmärkte von TSN teils erheblich voneinander unterscheiden werden. So kann zum Beispiel eine deterministische sowie redundante Datenübertragung in dem einen Anwendungsfall zwingend erforderlich sein, in einem anderen jedoch die Fehlertoleranz durch redundante Übertragungen nur eine untergeordnete Rolle spielen. TSN ist daher als Baukastensystem konzipiert, mit dem die exakten Eigenschaften der deterministischen Datenübertragung – und die damit einhergehenden Hardware- sowie Softwareanforderungen – an den jeweiligen Bedarf angepasst werden können. Entsprechend handelt es sich bei TSN auch nicht um ein einzelnes Standarddokument, sondern vielmehr um eine Familie von Standards, die sich seit 2012 bei der IEEE 802 im Rahmen der TSN Task Group [1] in der Entwicklung befindet. Inzwischen tragen diese Aktivitäten erste Früchte: zentrale

Mechanismen der TSN-Familie sind bereits als fertige Standarddokumente verfügbar. Um einen Überblick über diese neuen Zukunftstechnologien zu geben, wird daher in den folgenden Abschnitten auf die wichtigsten TSN-Mechanismen und deren Zusammenhänge eingegangen.

### Zeitliche Priorisierung mit dem Time-Aware Scheduler

Bis dato war es mit Class of Service (CoS)-Mechanismen wie den strikten Prioritäten nach IEEE 802.1Q nicht möglich, die Vermittlung von zeitkritischem Datenverkehr zu einem fest definierten Zeitpunkt zu garantieren: Ein sich bereits in der Vermittlung befindendes Ethernet-Frame niedriger Priorität konnte die Übertragung selbst von Datenpaketen mit höchster Priorität (7) bei jedem Ethernet Switch entlang des Übertragungspfades verzögern. Als einer der zentralen Bestandteile von TSN führt der Time-Aware Scheduler (TAS) daher erstmals die Möglichkeit ein, die Datenübertragung von konventionellen Ethernet-Frames auf zeitlicher

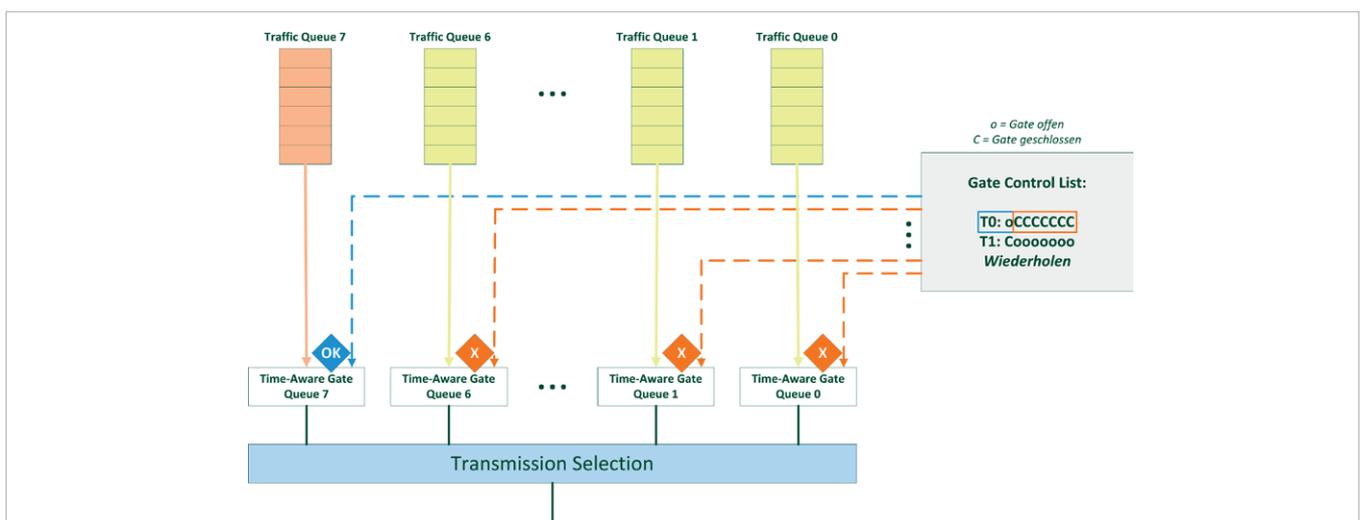


Abb. 3: Der Time-Aware Scheduler setzt die zeitliche Priorisierung durch neu eingeführte Time-Aware Gates zwischen den CoS-Warteschlangen und der Auswahl der zu sendenden Pakete

Ebene zu priorisieren und somit deren Weiterleitung zu einem fest definierten Zeitpunkt zu garantieren.

Die Kernidee dieses im März 2016 publizierten TSN-Mechanismus, IEEE 802.1Qbv-2016 [2] ist es, die Zeit entsprechend des Zeitschlitzverfahrens (TDMA – Time-Division Multiple Access) wie in Abbildung 2 gezeigt in diskrete Abschnitte gleicher Länge, sogenannte Zyklen, zu unterteilen. Dies ermöglicht es, dedizierte Zeitschlitz für die Übertragung von Datenpaketen mit Echtzeitanforderungen innerhalb dieser Zyklen bereitzustellen. Anders ausgedrückt, kann mithilfe des Time-Aware Schedulers die Übertragung von konventionellem Best-Effort Ethernet-Verkehr kurzzeitig unterbrochen werden, um so im Rahmen von reservierten Zeitschlitz zeitkritischen Datenverkehr weiterzuleiten. Der Time-Aware Scheduler ermöglicht also eine zeitliche Bevorzugung von periodischen Echtzeitdaten (siehe Zeitschlitz 1 in Abbildung 2) gegenüber konventionellem Best-Effort Datenverkehr.

Ähnlich zu den strikten Prioritäten setzt der Time-Aware Scheduler dabei auf die im VLAN Tag des Ethernet-Headers kodierte CoS-Prioritäten (PCP – Priority Code Point). Ethernet-Frames werden hierbei zunächst unverändert verarbeitet bis sie die Warteschlangen (Traffic Queues) am Ausgangsport

erreichen. An dieser Stelle greift der Time-Aware Scheduler durch die neu eingeführten Time-Aware Gates, wie in Abbildung 3 aufgezeigt, in die Paketverarbeitung ein. Genauer gesagt, findet die Auswahl des nächsten zu übertragenden Ethernet-Frames bei Verwendung des Time-Aware Schedulers nicht mehr ausschließlich basierend auf einer strikten Rangfolge der Warteschlangen statt, sondern es wird ebenfalls der Zustand des jeweiligen Gates berücksichtigt. Dieses kann entweder geöffnet oder geschlossen sein. Entsprechend dieses Zustands werden in der zugehörigen Warteschlange liegende Ethernet-Frames bei der Paketauswahl berücksichtigt oder eben nicht. Zum Beispiel wird bei der in Abbildung 3 dargestellten Situation ausschließlich die zur Priorität 7 gehörende Warteschlange bedient.

Welche Traffic Queue zu einem bestimmten Zeitpunkt im Zyklus senden darf, wird durch die Gate Control List vorgegeben. Neben den Zuständen der Time-Aware Gates gibt diese jeweils den Zeitraum an, für den ein bestimmter Eintrag aktiv sein soll. Entsprechend spiegelt die in Abbildung 3 auf der rechten Seite gezeigte Gate Control List den aus einer Best-Effort Phase sowie einer Phase mit zeitlich priorisiertem Datenverkehr bestehenden Zyklus aus Abbildung 2 wider.

### Notwendigkeit von Schutzbandern und Unterbrechung von Ethernet-Frames

Aufgrund der sehr schlechten Vorhersagbarkeit der Verkehrsmuster von Best-Effort Datenübertragungen ist im Normalfall nicht absehbar, wann ein bestimmtes Best-Effort Datenpaket vermittelt werden soll. Entsprechend könnte, wie beispielsweise in Abbildung 4 dargestellt, die Übertragung eines Ethernet-Frames in Zeitschlitz 2 zu spät gestartet werden. Dieses Ethernet-Frame würde dann, trotz des Einsatzes des Time-Aware Schedulers, in den Zeitschlitz 1 des nachfolgenden Zyklus hineinragen. Hierdurch würden die Vermittlung der zeitkritischen Echtzeitdaten entsprechend verzögert und die garantierten Ende-zu-Ende Latenzen verletzt werden.

Um solch eine Situation zu vermeiden, wurden im Zusammenhang mit dem Time-Aware Scheduler neben den Übertragungsschranken ebenfalls sogenannte Schutzbander eingeführt. Diese unterbinden die gesamte Paketvermittlung für die Länge eines maximal großen Ethernet-Frames. Die Schutzbander können so verhindern, dass die Übertragung eines Best-Effort Ethernet-Frames in den nachfolgenden Zeitschlitz hineinragt. Wie in Abbildung 4 gezeigt, verhindert dies die Vermittlungsverzögerung von Echtzeitdaten beim Übergang von einer Best-Effort zu einer Phase mit zeitlich priorisiertem

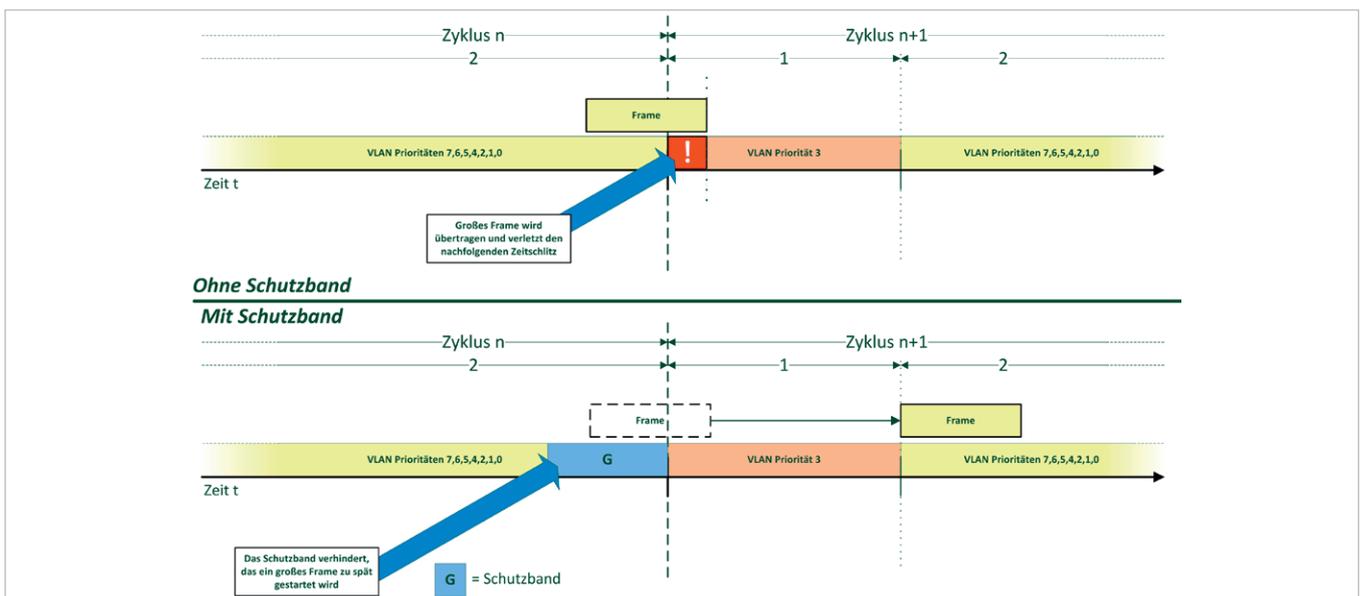


Abb. 4: Das Schutzband von TSN verhindert ein Hineinragen von Best-Effort Datenverkehr in einen reservierten Zeitschlitz, schmälert jedoch die verfügbare Bandbreite

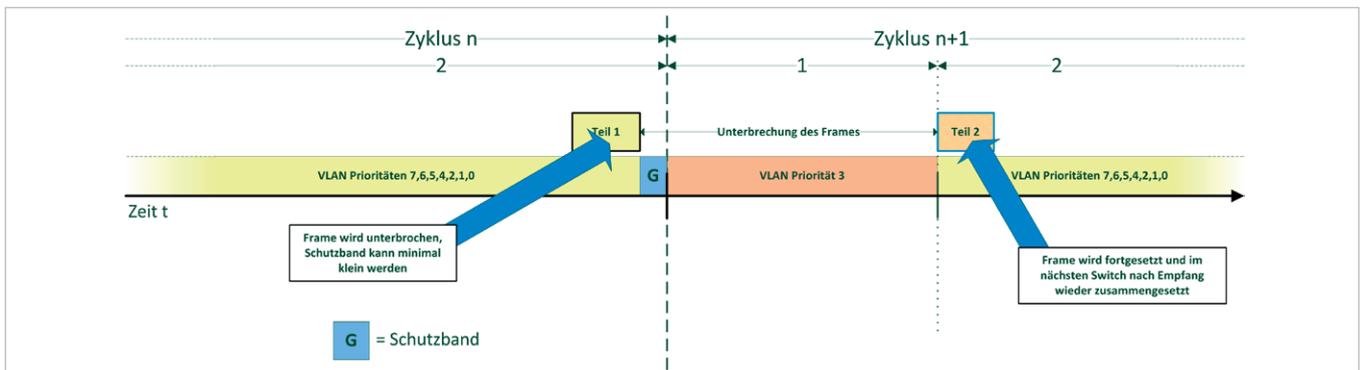


Abb. 5: Mit dem Verfahren zur Ethernet-Frame-Unterbrechung kann das Schutzband von der Größe eines maximal großen Ethernet-Frames auf die Größe eines Teilpaketes verringert werden

Datenverkehr. Gleichzeitig führt ein Schutzband jedoch auch unweigerlich zu unerwünschten Totzeiten und damit zu einer Verschwendung von Bandbreite im Netzwerk.

Alternativ zu den expliziten Schutzbändern erlaubt der Time-Aware Scheduler daher ebenfalls, die Paketlänge des nächsten zu übertragenden Ethernet-Frames bei der Übertragungsentscheidung mit zu berücksichtigen. Die Übertragungsentscheidung hängt nun also davon ab, ob das nächste, in der Warteschlange liegende Paket innerhalb des aktuellen Zeitschlitzes vollständig übertragen werden kann, ohne den nachfolgenden Zeitschlitz zu stören. Auch hier kann es jedoch bei entsprechend großen Paketen bzw. bei zunehmend geringer Restzeit im Zeitschlitz zu der Situation kommen, dass ein Paket nicht mehr übertragen werden kann. Mit diesem Ansatz können die durch die Anforderungen an die deterministische

Datenübertragung hervorgerufenen Totzeiten also ebenfalls nicht vollständig vermieden werden.

Um die Bandbreitenausnutzung von Best-Effort Ethernet-Frames zu maximieren, wurde daher in der IEEE 802 Arbeitsgruppe ein Verfahren zur Ethernet-Frame-Unterbrechung (IEEE 802.1Qbu-2016 [3], IEEE 802.3br-2016 [4]) entworfen, welches im Juni 2016 fertiggestellt wurde. Mit Hilfe dieses Verfahrens können konventionelle Ethernet-Frames in bis zu 64 Byte kleine Teilpakete („Framelets“) unterteilt und jedes Framelet separat übertragen werden. Wie in Abbildung 5 gezeigt ermöglicht dies, die Übertragung eines Ethernet-Frames trotz unzureichender Restlaufzeit innerhalb einer Best-Effort Phase zu starten. Das Frame kann dann vor Beendigung des aktuellen Zeitschlitzes an einer 64 Byte Grenze unterbrochen und zu Beginn der nächsten Best-Effort Phase vervollständigt werden. Die

Frame-Unterbrechung erlaubt es dabei, das Schutzband entsprechend der maximalen Größe solcher Ethernet-Framelets zu beschränken. Bei Fast-Ethernet-Netzwerken bedeutet dies beispielsweise eine Verringerung der Totzeit von bis zu 0,12 ms pro Übergang von einer Best-Effort-Phase zu einer Phase mit zeitkritischem Datenverkehr und damit eine deutlich verbesserte Nutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite.

Da mit der Ethernet-Frame-Unterbrechung ein Eingriff in die Ethernet-Strukturen einher geht, ist wichtig anzumerken, dass die beiden benachbarten Geräte einer Ethernet-Verbindung (beispielsweise zwei Ethernet Switches) die Unterstützung dieses Verfahrens zunächst mit Hilfe des Link Layer Discovery Protocol (LLDP) (IEEE 802.1AB-2016 [5]) aushandeln. Ausschließlich bei beidseitiger Unterstützung wird anschließend die Ethernet-Frame-Unterbrechung auf

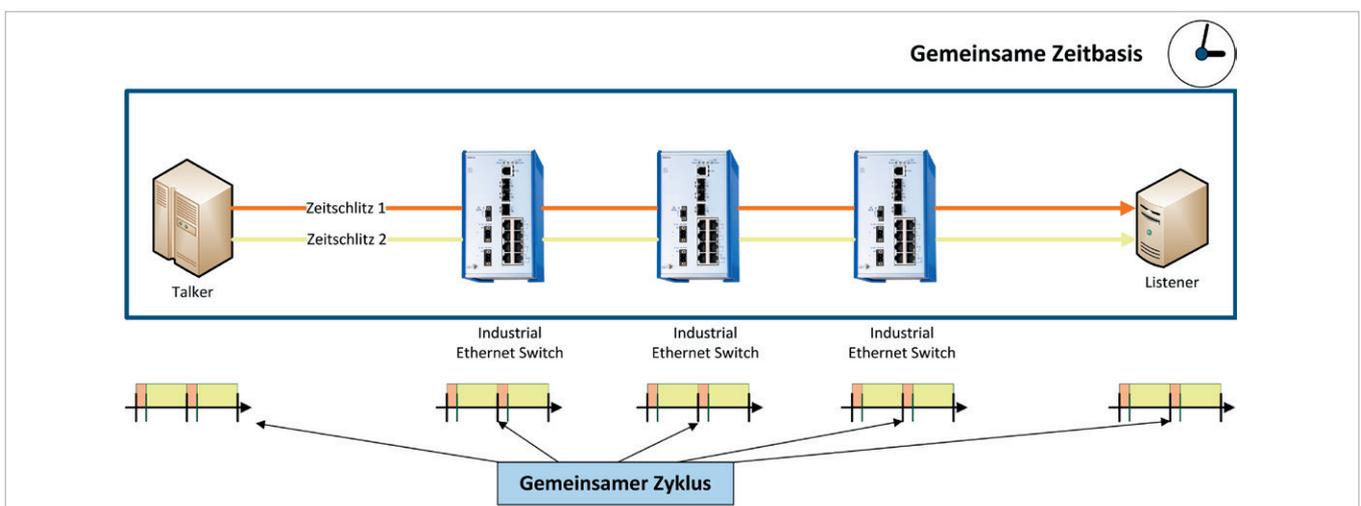


Abb. 6: Eine gute Zeitsynchronisation ist Grundvoraussetzung für den Time-Aware Scheduler von TSN



den entsprechenden Endgeräte- oder Switch-Ports aktiviert. Hierdurch wird eine Rückwärtskompatibilität zu bereits existierenden Ethernet-Geräten gewährleistet.

## Synchrone Übertragungszyklen als Grundvoraussetzung

Der Time-Aware Scheduler greift ausschließlich auf lokale Informationen zurück – mit anderen Worten die Informationen, die innerhalb eines Netzwerkteilnehmers (Endgerät oder Switch) vorliegen. Diese Informationen beinhalten beispielsweise Daten über die Zyklus- und Zeitschlitzzeiträume. Um sicherstellen zu können, dass die Frames die richtigen Zeitschlitze „treffen“, also Datenströme tatsächlich mit garantierten Latenzen ohne Wartezeiten über eine Ende-zu-Ende Verbindung übertragen werden können, wird neben dem Time-Aware Scheduler daher eine enge Abstimmung zwischen den an der Übertragung beteiligten Netzwerkteilnehmern benötigt (siehe Abbildung 6). Insbesondere bedeutet dies, dass alle Netzwerkteilnehmer ein gemeinsames Verständnis von Zeit besitzen müssen. Insbesondere müssen die Teilnehmer wissen, wann ein Zyklus beginnt und in welchem Zeitraum welcher Zeitschlitz aktiv ist. Um dies zu ermöglichen, ist der Einsatz eines Protokolls zur Zeitsynchronisation wie das Precision Time Protocol (PTP) nach IEEE 1588 (IEEE 1588-2008 [6]) oder das IEEE 1588 Profil IEEE 802.1AS (IEEE 802.1AS-2011 [7]) zwingend notwendig.

Sowohl IEEE 1588 als auch IEEE 802.1AS ermöglichen dabei die Synchronisation verteilter Uhren innerhalb eines Netzwerkes mit einer Genauigkeit von unter 1 µs. In Hardware umgesetzt, können sogar Genauigkeiten im Bereich weniger Nanosekunden erreicht werden (Hirschmann PTP Whitepaper [8]). Im Gegensatz zu aus dem IT-Umfeld bekannten Protokollen wie dem Network Time Protocol (NTP) wird mit IEEE 1588 dabei oftmals keine globale Zeitsynchronisation, also beispielsweise der Abgleich mit einer Atomuhr, angestrebt. Vielmehr wird mithilfe des Best Master Clock (BMC)-Algorithmus der Netzwerkteilnehmer mit der genauesten, frei laufenden Uhr ermittelt. Dieser dient

anschließend als Referenzuhr (Grandmaster Clock), gegen die sich die übrigen Netzwerkteilnehmer synchronisieren. Für TSN ist es also wichtig, dass die Zeit auf allen Uhren in einem Netzwerk synchronisiert ist. Die konkrete Uhrzeit spielt hingegen nur eine untergeordnete Rolle.

Das IEEE 1588 Profil IEEE 802.1AS folgt demselben grundlegenden Synchronisationsmodell wie PTP. Es wurde ursprünglich entwickelt, um die große Anzahl an Konfigurationsoptionen auf genau die Parameter zu beschränken, die in lokalen Netzwerken (LANs) relevant sind. IEEE 802.1AS beschränkt sich beispielsweise bei der Wahl der Transporttechnologie und -kapselung auf Ethernet, während IEEE 1588 zusätzlich IPv4-Kapselung für den Einsatz in Weitverkehrsnetzen zur Verfügung stellt. Im Zuge der TSN-Standardisierung wird das existierende IEEE 802.1AS Profil nun um einige zusätzliche Parameter aus IEEE 1588 erweitert, die für den Einsatz in Automatisierungsnetzwerken erforderlich sind. Zum Beispiel bietet IEEE 1588 die Unterstützung für mehrere parallel synchronisierte Zeitdomänen. Entsprechend können Netzwerkteilnehmer mit IEEE 1588 gegen eine globale (wie bei NTP) sowie eine zweite netzwerkweite Zeitquelle synchronisiert werden. Dies bietet die Möglichkeit, die global synchronisierte Uhr beispielsweise für ein eindeutiges Ereignis-Logging zu nutzen, während die netzwerkweit synchronisierte Uhr für den Time-Aware Scheduler genutzt werden kann, da hier keine Zeitanpassung aufgrund globaler Konventionen wie der Schaltsekunde vorgenommen werden muss. Unter anderem die Fähigkeit zur Synchronisation mit mehr als einer Zeitdomäne wird mit IEEE 802.1AS-Rev [9] auch in die nächste Version dieses Profils übernommen.

Da IEEE 1588 in der derzeit aktuellen Version bereits 2008 spezifiziert wurde, hat sich diese Technologie zur Zeitsynchronisation bereits in vielen Märkten und Anwendungsbereichen etabliert. Teilweise wurden sogar gesonderte Profile für spezielle Anwendungsfelder wie beispielsweise den Energiemarkt entwickelt. In solchen Fällen muss IEEE

802.1AS natürlich nicht neu spezifiziert werden, um TSN nutzen zu können. Vielmehr erlauben die TSN-Mechanismen die wahlfreie Nutzung eines beliebigen Mechanismus zur Zeitsynchronisation. Je nach Anwendungsfeld kann daher weiterhin die Nutzung von IEEE 1588 mit oder ohne Profile als Lösung zur Zeitsynchronisation gegenüber 802.1AS bevorzugt werden. Diese Wahlfreiheit bezüglich des eingesetzten Zeitsynchronisationsprotokolls soll nach heutigem Stand der TSN-Aktivitäten an der IEEE auch nicht weiter eingeschränkt werden. Unabhängig vom eingesetzten Synchronisationsprotokoll muss jedoch gewährleistet sein, dass die erreichte Zeitsynchronisation ein extrem hohes Maß an Genauigkeit bietet, damit auf allen Geräten im Netzwerk die Zeitschlitze zum richtigen Zeitpunkt starten und wieder enden.

## Traffic Shaping bei unscharfen Übertragungszeitpunkten

Gerade bei Anwendungsfeldern wie der Prozessautomatisierung werden häufig periodische Steuerungsabläufe durchlaufen, welche nur sporadisch – beispielsweise ereignisbasiert – zu Datenübertragungen führen. So kann die Datenübertragung zum Beispiel für die Kommunikation von Zustandsübergängen oder für den Versand aggregierter Messwerte beim Überschreiten von Zeit- oder Wertschranken konzipiert sein. Entsprechend lässt sich der Übertragungszeitpunkt in diesen Szenarien nicht immer exakt vorhersagen. Bei der Übertragung sollen dennoch typischerweise klar definierte Latenzobergrenzen eingehalten werden, um so eine Steuerungsentscheidung basierend auf aktuellen Informationen sicherstellen zu können. Da der Time-Aware Scheduler jedoch auf exakte Sendezeiten angewiesen ist, eignet sich dieser Mechanismus nur bedingt, um bei solchen Verkehrsmustern eine zeitliche Priorisierung der zu übertragenden Prozessdaten zu gewährleisten.

Neben dem Time-Aware Scheduler bietet TSN daher weitere Priorisierungsmechanismen, die sogenannten Traffic Shaper. Diese erlauben es, die innerhalb eines Beobachtungsintervalls (beispielsweise 250 µs) maximal notwendige Bandbreite für zeitkritische Datenübertragungen zu



Abb. 7: Beim Credit-Based Shaper werden Datenströme mit reservierter Bandbreite bei positivem Sendekredit bevorzugt gegenüber Best-Effort Verkehr übertragen

reservieren. Der weiterzuleitende Datenverkehr wird anschließend durch den jeweiligen Traffic Shaper in einer Art und Weise umgeformt, die gewährleistet, dass gewisse Latenzobergrenzen für zeitkritische Datenübertragungen erreicht werden können. Ein Kompromiss für die so gewonnene Flexibilität bei der zeitlichen Priorisierung ist jedoch eine konzeptbedingt geringere Genauigkeit hinsichtlich der erreichbaren Latenz- und Jittergarantien im Vergleich zum Time-Aware Scheduler.

Im Rahmen der Standardisierungsaktivitäten an der IEEE sind derzeit drei verschiedene Traffic Shaper für den Einsatz mit TSN angedacht, auf die im Folgenden weiter eingegangen wird:

- der Credit-Based Shaper (CBS; IEEE 802.1Qav-2009 [10]),
- Cyclic Queuing and Forwarding (CQF; IEEE 802.1Qch-2017 [11]) sowie
- Asynchronous Traffic Shaping (ATS; IEEE P802.1Qcr [12]).

Der Credit-Based Shaper wurde bereits 2009 von der IEEE 802.1 Arbeitsgruppe für die Vorgängertechnologie von TSN, Audio/Video Bridging (AVB), entwickelt. Er bedient, wie der Name bereits besagt, primär Audio-/Video- und vergleichbare Anwendungen. Ziel des Credit-Based Shapers ist es, die für eine Audio-/Video-Übertragung über den Zeitverlauf hinweg (maximal) benötigte Bandbreite garantiert bereitstellen zu können ohne den gleichzeitig zu vermittelnden Best-Effort Datenverkehr merklich zu unterbrechen. Um dies zu erreichen, weist der Credit-Based Shaper Datenströmen mit reservierter Bandbreite einen Sendekredit zu. Initial liegt dieser bei 0.

Solange sich der Sendekredit im positiven Bereich ( $\geq 0$ ) befindet, können Datenpakete mit reservierter Bandbreite bevorzugt übertragen werden (siehe beispielsweise die Übertragung des ersten blau markierten AVB Frames in Abbildung 7 links). Durch jede solche

bevorzugte Übertragung nimmt der Sendekredit ab bis er schließlich den negativen Bereich erreicht. Während der Sendekredit negativ ist, dürfen Datenpakete mit reservierter Bandbreite nicht mehr übertragen werden. Entsprechend können zu diesem Zeitpunkt in den Warteschlangen befindliche Best-Effort Datenpakete vermittelt werden. Wird durch diese Übertragung wiederum die Weiterleitung von Datenpaketen mit reservierter Bandbreite verzögert, steigt der Sendekredit des entsprechenden Datenstroms an (siehe Übertragung des schwarz markierten Best-Effort Frames in Abbildung 7). Als Folge können die aufgestauten Ethernet-Frames der priorisierten Datenströme im Anschluss an die Best-Effort Übertragung in direkter Abfolge vermittelt werden. Dies vermeidet weitere Verzögerungen bei der Weiterleitung zeitkritischer Frames.

Aufgrund dieses Priorisierungsverhaltens eignet sich der Credit-Based Shaper

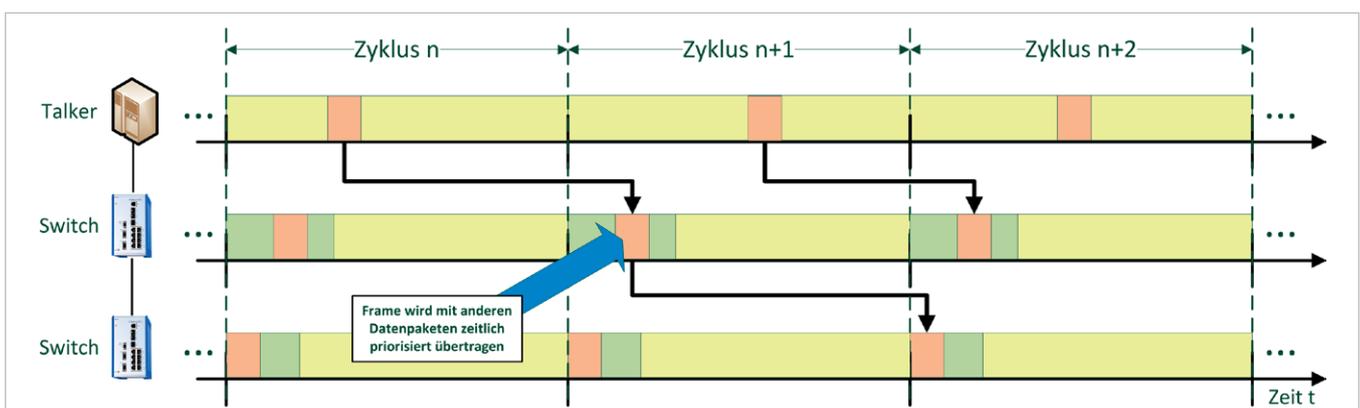


Abb. 8: Mit Cyclic Queuing and Forwarding werden Datenströme mit reservierter Bandbreite stoßweise mit jedem Zyklus um einen Hop in Richtung Empfänger übertragen



hervorragend für die bevorzugte Übertragung von Audio-/Video-Daten wie sie zum Beispiel bei der Videoüberwachung von Produktionsprozessen oder -anlagen vorkommen. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf eine geringfügige Pufferung dieser Daten beim empfangenden Endgerät. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die im Standard angegebenen maximalen Ende-zu-Ende Latenzen von 2 ms bzw. 50 ms über 7 Hops nicht bei jeder Netzwerktopologie und jedem Kommunikationsmuster eingehalten werden können [13]. Dies verhindert den Einsatz des Credit-based Shapers in Anwendungsfeldern wie der Prozesssteuerung, wo fixe Garantien hinsichtlich der maximalen Ende-zu-Ende Latenz erforderlich sind. An der IEEE werden daher aktuell zwei weitere Traffic Shaper entwickelt, die ohne Einschränkung an die Netzwerktopologie und die Kommunikationsmuster, Ende-zu-Ende Latenzen garantieren können.

Einer dieser Traffic Shaper ist das Cyclic Queuing and Forwarding Verfahren, welches auf den Mechanismen des Time-Aware Schedulers aufsetzt. Im Gegensatz zum Time-Aware Scheduler entschärft dieser Traffic Shaper jedoch die Anforderungen an die zeitgenaue Übertragung deutlich. Wie in Abbildung 8 dargestellt, ist die Kernidee des Cyclic Queuing and Forwarding Verfahrens, die innerhalb eines Zyklus empfangenen Datenpakete mit reservierter Bandbreite zu sammeln und zu Beginn des nächsten Zyklus priorisiert zu vermitteln. Damit lässt sich die maximale Ende-zu-Ende Latenz über die Anzahl an Hops auf dem Übertragungspfad und die konfigurierte Zykluszeit eindeutig bestimmen. Mit diesen Eigenschaften eignet sich Cyclic Queuing and Forwarding beispielweise für die eingangs beschriebenen sporadischen Datenübertragungen bei der Prozessautomatisierung.

Aufgrund der ähnlichen Funktionsweise zum Time-Aware Scheduler ist klar, dass Cyclic Queuing and Forwarding ein gemeinsames Zeitverständnis der Netzwerkteilnehmer und somit einen Zeitsynchronisierungsmechanismus voraussetzt. Der geplante dritte Traffic Shaper, Asynchronous Traffic Shaping, unterscheidet sich insofern von Cyclic

Queuing and Forwarding, als dass dieser Ansatz keinen Zeitsynchronisierungsmechanismus benötigt. Entsprechend eignet sich Asynchronous Traffic Shaping beispielsweise zur bevorzugten Übertragung von Datenpaketen, welche für die Zeitsynchronisierung selbst benötigt werden. Auch das Verfahren zum Asynchronous Traffic Shaping befindet sich allerdings aktuell noch in einem sehr frühen Stadium des Standardisierungsprozesses, sodass zum Zeitpunkt des Erstellens des vorliegenden Dokuments (4. Quartal 2017) noch keine Aussage über die konkrete Ausgestaltung dieses Traffic Shapers gemacht werden kann.

### Gemeinsame Verwendung von Traffic Shapern und Schemulern

Die Verwendung der unterschiedlichen Traffic Shaper und Scheduler ist stets an die exklusive Zuweisung einer der acht CoS-Prioritäten aus dem VLAN-Tag zu einem bestimmten Shaping/Scheduling Algorithmus gebunden. Unterstützt ein Gerät beispielsweise den Time-Aware Scheduler nach IEEE 802.1Qbv, den Cyclic Queuing and Forwarding Traffic Shaper nach IEEE 802.1Qch-2017 und die heute in fast allen Ethernet-Switchen üblichen Strict Priorities nach IEEE 802.1Q, können in der Gerätekonfiguration die verschiedenen CoS-Prioritäten diesen Scheduling und Shaping Mechanismen zugewiesen werden. Beispielsweise könnten die Prioritäten 7, 4, 3, 2, 1 und 0 dem Strict Priority Mechanismus zugeordnet werden und zur Übertragung von Best-Effort Traffic verwendet werden. Die Priorität 5 könnte dem Cyclic Cyclic Queuing and Forwarding Shaper zugeordnet werden und die Priorität 6 dem Time-Aware Scheduler, um Kommunikation mit weichen und harten Echtzeitanforderungen umzusetzen. Auf diese Weise können unterschiedliche Verkehrsklassen im selben Netzwerk koexistieren und durch den jeweils passenden Mechanismus priorisiert werden. Grundvoraussetzung hierfür ist jedoch, dass alle Geräte im Netzwerk VLAN Tagging nach IEEE 802.1Q unterstützen und die für die Behandlung des Datenverkehrs notwendigen Scheduling- und Shaping Mechanismen beherrschen.

### Unterbinden von Störverkehr mit Ingress Filtering und Policing

Bei einem System, in dem sich alle Teilnehmer wie erwartet verhalten, bieten die bisher beschriebenen TSN-Standards bereits alle für eine deterministische Datenübertragung notwendigen Mechanismen. Allerdings setzen die bisher aufgezeigten Verfahren einen vollständigen Paketempfang sowie eine (partielle) Paketverarbeitung in einem vermittelnden Switch bzw. einem empfangenden Endgerät voraus. Als Folge können fehlerhaft konfigurierte Geräte oder auch böswillige Netzwerkteilnehmer durch das Versenden von Datenpaketen mit fehlerhaft zugeordneten CoS-Prioritäten oder durch eine Überbeanspruchung der ihnen bereitgestellten Ressourcen die Funktionsweise von TSN-Mechanismen wie dem Time-Aware Scheduler zum Teil deutlich stören.

Um dem entgegen zu wirken, ist ein weiterer TSN-Mechanismus im Rahmen der Standardisierungsaktivitäten durch die IEEE 802.1 Arbeitsgruppe entwickelt worden. Dieser erlaubt es, fehlerhaft zugeordnete Datenpakete bereits beim Empfang zu verwerfen (IEEE 802.1Qci-2017 [14]). Ebenso ermöglicht es dieser Mechanismus, Echtzeit-Datenströme, die mehr als die ihnen bereitgestellte Bandbreite nutzen, zu verwerfen und somit ein Policing durchzuführen. Zu guter Letzt kann natürlich auch bei TSN auf bereits existierende Layer 2 Sicherheitsmechanismen, wie beispielsweise MACsec (IEEE 802.1AE [15]), zurückgegriffen werden. So kann die Authentizität des Absenders überprüft und ausschließlich korrekt verifizierte Ethernet-Frames weitergeleitet werden. Auf diese Weise ist es möglich, eine Vielzahl an Angriffen und Szenarien mit fehlerhaft konfigurierten Netzwerkteilnehmern zu bewältigen.

### Sicher ist sicher: Pfadredundanz

Neben solch fehlerhaft konfigurierten oder auch böswilligen Netzwerkteilnehmern kann aber auch der Ausfall eines Netzwerkelementes oder einer Leitung zur Störung einer deterministischen Datenübertragung führen. Um den mit einer solchen Störung einhergehenden

Paketverlust zu vermeiden, wird mit IEEE P802.1CB [16] derzeit ein Redundanzverfahren an der IEEE entwickelt, das ähnlich zu den bereits etablierten, stoßfreien Redundanzmechanismen High Availability Seamless Redundancy (HSR) und dem Parallel Redundancy Protocol (PRP) nach IEC 62439-3 arbeitet, sowie hierzu kompatibel gehalten werden soll. Bei IEEE P802.1CB handelt es sich daher um ein statisches Redundanzverfahren, bei dem die redundanten Übertragungspfade dauerhaft aktiv sind. Im Fehlerfall können so die Umschaltzeiten von einem Pfad zum anderen Pfad vermieden werden.

Um nun eine stoßfreie Redundanz nach IEEE P802.1CB zu erreichen, werden die zu übertragenden Ethernet-Frames zu Beginn einer redundanten Übertragungstrecke zunächst vervielfältigt und anschließend über verschiedene Pfade durch das Netzwerk vermittelt. Üblicherweise geschieht die Vervielfältigung dabei entweder direkt am sendenden Endgerät oder, falls das Endgerät wie in Abbildung 9 dargestellt über keine redundante Netzwerkanbindung verfügt, am ersten Netzwerkelement auf dem Übertragungspfad. Am Empfangsziel angekommen, wird das erste redundante

Datenpaket Richtung Anwendungsschicht weitergeleitet. Nachfolgend empfangene Paketduplikate werden hingegen über ein Redundanzfeld im Ethernet-Header erkannt und verworfen. So wird sichergestellt, dass die redundante Datenübertragung nach IEEE P802.1CB für übergeordnete Schichten im Netzwerkstack transparent ist und dort nicht gesondert berücksichtigt werden muss.

Die im Rahmen von IEEE P802.1CB entwickelten Redundanzmechanismen bieten im Vergleich zu HSR und PRP den Vorteil, dass sie auf beliebigen Topologien eingesetzt werden können. IEEE P802.1CB ist somit nicht auf die sonst zwingend erforderlichen Ringtopologien oder Topologien mit vollständig unabhängigen Pfaden beschränkt. Zusätzlich entfällt mit IEEE P802.1CB die Limitierung der Redundanz auf genau zwei Pfade. Um die Wahrscheinlichkeit von Paketverlusten weiter zu verringern, ist es also ebenfalls möglich, Datenübertragungen über eine Vielzahl redundanter Übertragungspfade durchzuführen. Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass alle redundanten Pfade die geforderten Latenzgarantien bedienen können. Die komfortable Verwaltung von Anforderungen und Konfiguration von

TSN-Netzwerken ist somit ein wichtiger Bestandteil eines funktionierenden TSN-Ökosystems, das aus Netzwerkgeräten und dem Netzmanagement besteht.

### Konfiguration des Gesamtsystems TSN

Wie eingangs erläutert, besteht TSN aus einer Reihe von Standards und Mechanismen, die die verschiedenen Anforderungen an eine deterministische Datenübertragung bedienen. Um diese Mechanismen in einem Netzwerk gemeinsam einsetzen und über verschiedene Netzwerkteilnehmer hinweg, herstellerunabhängig parametrisieren zu können, wird eine standardisierte Form der Konfiguration für die eingesetzten Einzelkomponenten im Gesamtsystem TSN benötigt. Dieser Konfigurationsmechanismus muss es zum einen erlauben, die Nutzung von TSN-Mechanismen wie zum Beispiel der Ethernet-Frame-Unterbrechung oder der redundanten Datenübertragung nach IEEE P802.1CB bedarfsgerecht zu aktivieren. Zum anderen müssen die innerhalb eines Netzwerkes genutzten TSN-Mechanismen wie der Time-Aware Scheduler parametrisiert, also Aspekte wie Zykluszeiten, CoS-Prioritäten und Zeitschlitze für die zeitlich priorisierte Übertragung von Echtzeitdaten konfiguriert werden können.

Zur Konfiguration von TSN werden an der IEEE daher derzeit drei verschiedene Modelle entwickelt (IEEE 802.1Qcc [17]): ein zentralisierter, ein dezentraler und ein hybrider Ansatz. Allen drei Ansätzen ist gemein, dass die Konfiguration weitgehend automatisiert erfolgen soll, um so eine einfache Handhabbarkeit von TSN zu gewährleisten. Konkret soll es möglich sein, dass Endgeräte ihre Anforderungen an die Datenübertragung bekanntgeben und die relevanten Netzwerkelemente anschließend entsprechend dieser Anforderungen konfiguriert werden.

Der grundlegende Konfigurationsablauf eines TSN-Netzwerkes ist dabei wie folgt: Zunächst werden die innerhalb eines Netzwerkes unterstützten TSN-Mechanismen bestimmt und bei Bedarf aktiviert. Im Anschluss kommuniziert das sendende Endgerät, der sogenannte Talker, Informationen über den von ihm zu übertragenden

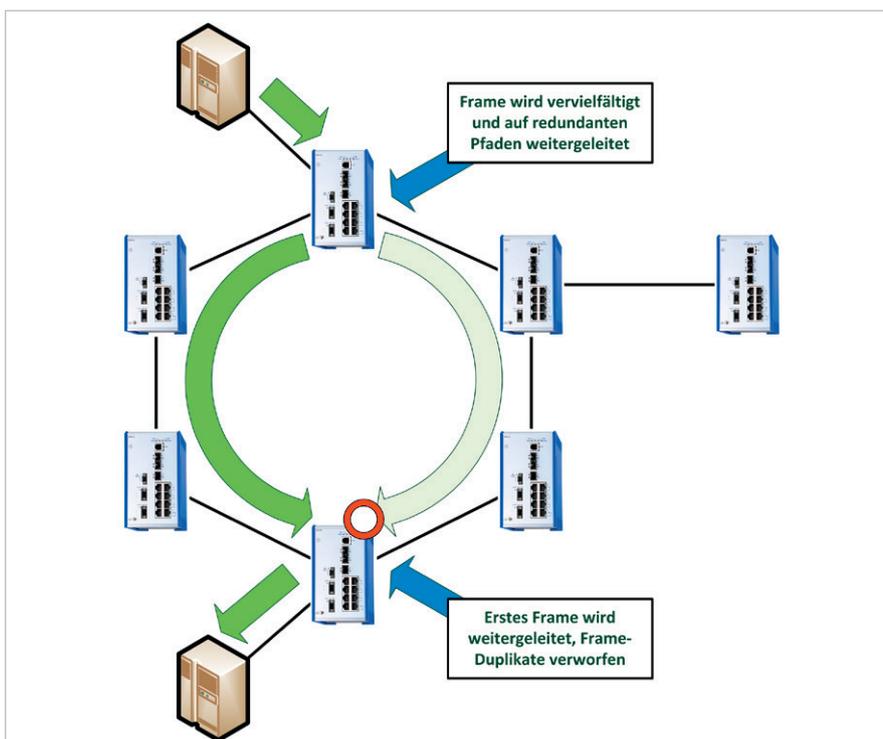


Abb. 9: Bei dem stoßfreien Redundanzverfahren nach IEEE P802.1CB werden Ethernet-Frames zu Beginn einer redundanten Übertragungstrecke dupliziert und Paketduplikate später verworfen

Datenstrom. Diese Informationen umfassen insbesondere identifizierende Merkmale wie die Ziel-MAC-Adresse und CoS-Prioritäten. An einem Datenstrom interessierte Endgeräte, sogenannte Listener, können sich anschließend anhand dieser Informationen für einen bestimmten Datenstrom registrieren und empfangen nach erfolgter Registrierung die zum Strom gehörenden Datenpakete.

Die drei angedachten Konfigurationsansätze unterscheiden sich nun darin, wie die Anforderungen im Netzwerk

vermittelt und verarbeitet werden. Beim zentralisierten Ansatz kommunizieren Talker und Listener, wie in Abbildung 10 dargestellt, über eine direkte Ende-zu-Ende Verbindung mit einer (logisch) zentralen Konfigurationsinstanz, der Centralized Network Configuration (CNC). Diese berechnet basierend auf der ihr vorliegenden Informationen über die Netzwerktopologie und die bereits vergebenen Ressourcenreservierungen beispielsweise den Zeitschlitz für einen neuen Datenstrom und konfiguriert die Netzwerkteilnehmer entsprechend. Für die Verbindung

zwischen Talker bzw. Listener und CNC können dabei zum Beispiel Protokolle wie OPC UA eingesetzt werden. Die Konfiguration der Switches erfolgt hingegen über existierende Management-Protokolle wie SNMP (Simple Network Management Protocol).

Im Gegensatz zum zentralisierten Ansatz werden beim dezentralen Ansatz die Endgeräte-Anforderungen im Netzwerk verteilt (siehe Abbildung 11) und basierend auf den jeweils lokal vorliegenden Informationen eine gemeinsame

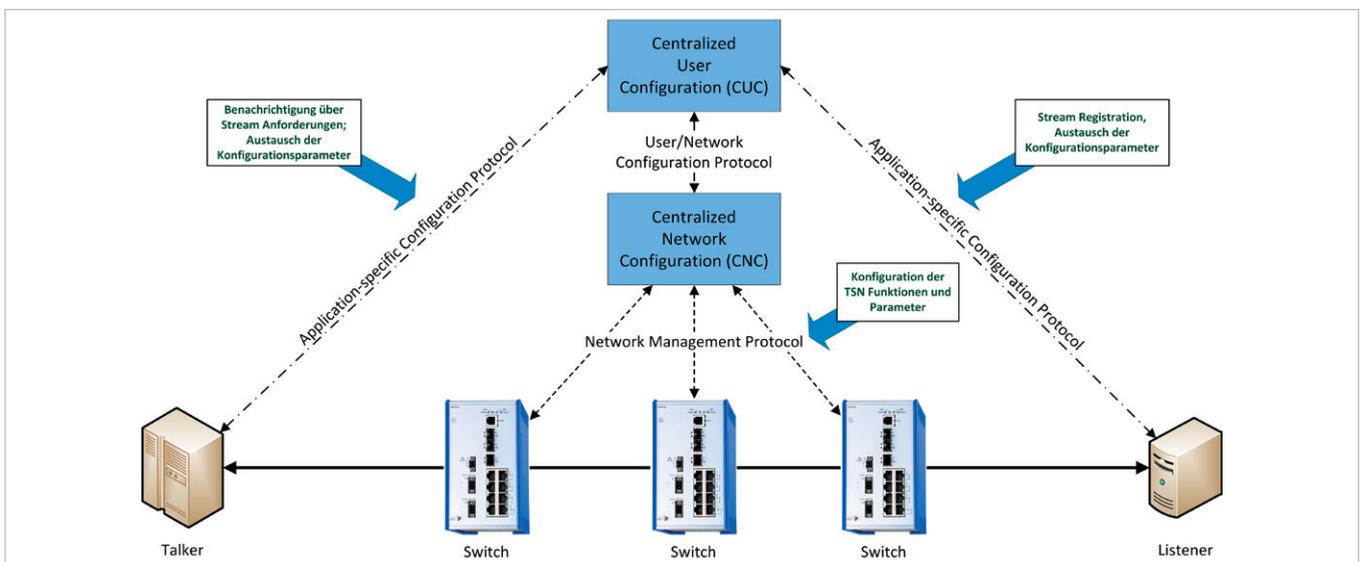


Abb. 10: Beim zentralisierten Ansatz zur Konfiguration von TSN kommunizieren die Endgeräte direkt mit einer zentralen Konfigurationsinstanz

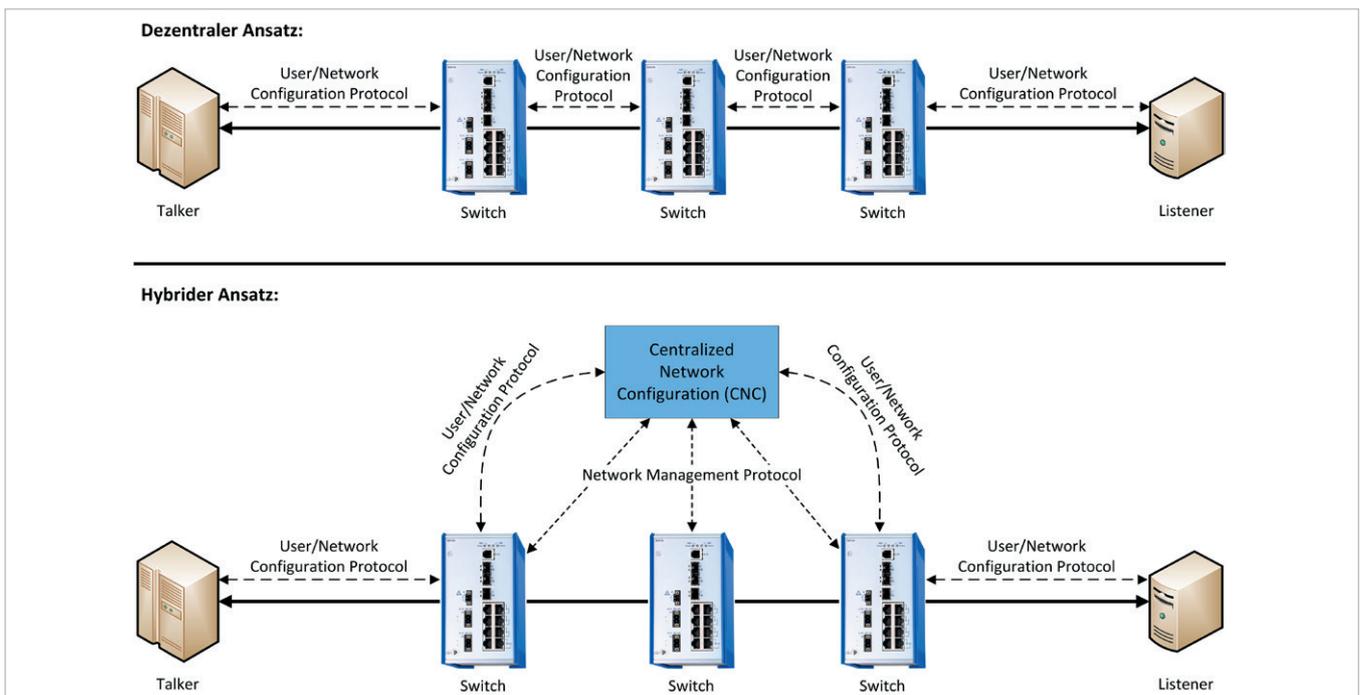


Abb. 11: Der dezentrale und der hybride Ansatz bieten für die Endgeräte eine vom eingesetzten Modell unabhängige Konfigurationsschnittstelle

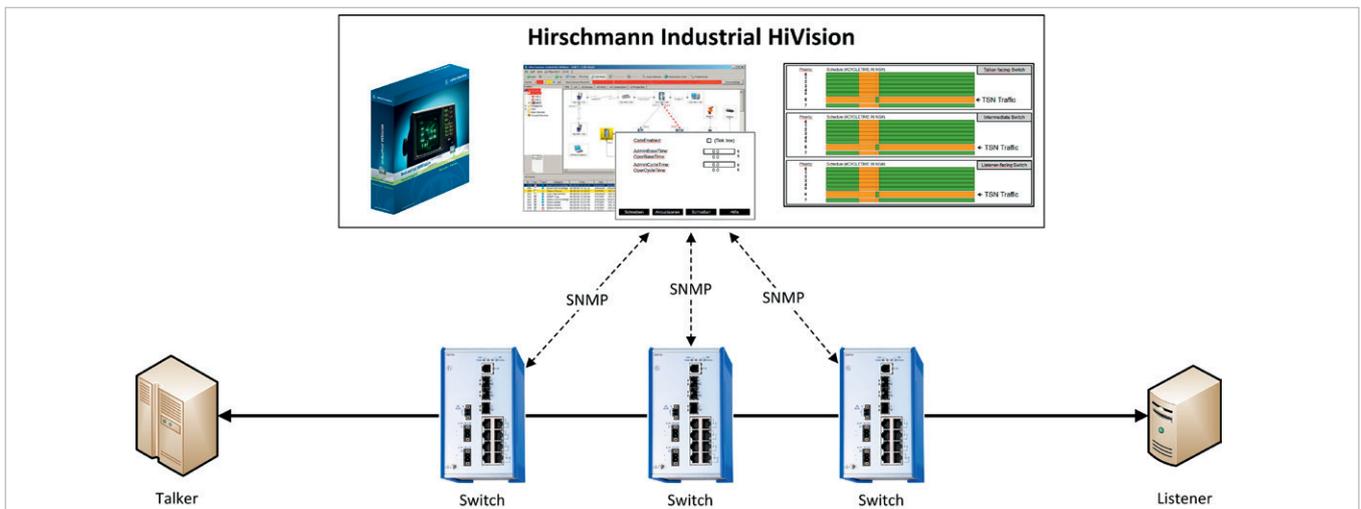


Abb. 12: Hirschmann Industrial HiVision ermöglicht ein manuelles Engineering von TSN Netzwerken und deren Überwachung

Konfiguration der eingesetzten TSN-Mechanismen bestimmt. In diesem Zusammenhang ist geplant, dass das für die TSN-Vorgängertechnologie AVB entwickelte Stream Reservation Protocol (SRP) an die Anforderungen von TSN angepasst wird.

Der hybride Ansatz stellt schließlich eine Vereinigung des zentralisierten und des dezentralen Ansatzes dar. Die Endgeräte geben hier wie beim dezentralen Ansatz ihre Anforderungen über ein dezentral arbeitendes Protokoll bekannt. Die eigentliche TSN-Konfiguration findet jedoch, wie in Abbildung 11 gezeigt, zentralisiert statt. Ein Vorteil dieses Vorgehens ist, dass Endgeräte nur ein einziges Konfigurationsprotokoll unterstützen müssen, das Netzwerk dennoch zentralisiert oder dezentral gemanagt werden kann. Auch für diesen Ansatz sind jedoch die noch ausstehenden Erweiterungen von SRP notwendig.

Auch wenn sich alle drei hier beschriebenen Konfigurationsmechanismen derzeit noch im aktiven Standardisierungsprozess befinden, so ist es dennoch bereits heute möglich, die schon verfügbaren TSN-Mechanismen über standardisierte Schnittstellen wie SNMP zu konfigurieren. Dies ermöglicht beispielsweise ein manuelles Engineering der Zykluszeiten und der Zeitschlitze des Time-Aware Schedulers mittels Netzwerk-Management-Tools wie Hirschmann Industrial HiVision (siehe Abbildung 12).

## Zusammenfassung und Ausblick

Mit TSN wird zum ersten Mal eine deterministische Datenübertragung mit Ethernet nach IEEE 802.1 und 802.3 möglich. Das Funktionsspektrum von TSN erlaubt dabei dessen Einsatz in den verschiedensten Anwendungsfeldern mit teils stark unterschiedlichen Anforderungen an Übertragungslatenz, Jitter und Ausfallsicherheit. Der Standardisierungsprozess im Bereich des Time-Sensitive Networking ist allerdings noch nicht abgeschlossen und wird voraussichtlich noch einige Jahre andauern. Entsprechend befinden sich verschiedene TSN-Mechanismen derzeit noch im aktiven Standardisierungsprozess. Ebenso ist denkbar, dass zukünftig weitere Mechanismen zur bereits bestehenden TSN-Familie hinzustoßen werden.

Zentrale Mechanismen der TSN-Familie wurden jedoch inzwischen fertiggestellt und konnten inzwischen erfolgreich demonstriert werden. Diese Mechanismen, wie beispielsweise der Time-Aware Scheduler, können bereits in Produkte integriert und deren Vorteile sofort genutzt werden. Ebenso ist durch den IEEE 802 Standardisierungsprozess die Rückwärtskompatibilität vollständig gewährleistet: Bereits heute installierte TSN Netzwerke können auch in Zukunft weiter verwendet werden. Die Zeit von TSN ist damit gekommen.

## Referenzen

1. <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>
2. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7572856>
3. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7553413>
4. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7900319>
5. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7433913>
6. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4579757>
7. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5741896>
8. Hirschmann IEEE 1588 White Paper, verfügbar auf: <http://belden.picturepark.com/Website/?Action=viewPdf&AssetId=8050>
9. <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1AS-rev.html>
10. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5375702>
11. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7961301>
12. <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1cr.html>
13. <http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2010/ba-boiger-bridge-latency-calculations.pdf>
14. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8064219>
15. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=11085>
16. <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1cb.html>
17. <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1cc.html>

## Belden Competence Center

Mit zunehmender Verbreitung und Komplexität von Kommunikations- und Verbindungslösungen steigen auch die Anforderungen hinsichtlich der Gestaltung, Implementierung und Pflege dieser Lösungen. Dabei spielt auch das Erlangen und Nachweisen von aktuellem Fachwissen der Anwender eine entscheidende Rolle. Als Partner für Gesamtlösungen bietet das Belden Competence Center kompetente Beratung, Konzeption, technische Unterstützung sowie Technologie- und Produkt-Schulungen aus einer Hand. Ergänzend bieten wir Ihnen mit dem weltweit ersten Zertifizierungsprogramm für industrielle Netze das richtige Zertifikat für jeden Kompetenzbereich. Aktuelles Herstellerwissen, ein internationales Servicenetz und der Zugriff auf externe Spezialisten garantieren Ihnen eine bestmögliche Betreuung, die auf den Produkten von Belden, GarrettCom, Hirschmann, Lumberg Automation und Tofino Security aufsetzen.



Unabhängig davon, welche Technologie bei Ihnen zum Einsatz kommt, können Sie sich auf unsere uneingeschränkte Unterstützung verlassen – von der Implementierung bis hin zur Optimierung sämtlicher Aspekte des täglichen Betriebs.

### Mit Belden immer einen Schritt voraus

In einem stark wettbewerbsgeprägten Umfeld ist es überaus wichtig, zuverlässige Partner zu haben, die einen Mehrwert für Ihr Geschäft bieten können. Wenn es um Signalübertragung geht, ist Belden die Nummer Eins unter den Lösungsanbietern. Wir kennen uns in Ihrem Geschäft aus und wollen wissen, welchen Herausforderungen Sie sich gegenüber sehen und welche Ziele Sie im Einzelnen verfolgen, damit wir Ihnen mit einer effektiven Signalübertragung zu einem Wettbewerbsvorsprung verhelfen können. Indem wir die Stärken unserer fünf führenden Marken Belden, GarrettCom, Hirschmann, Lumberg Automation and Tofino Security vereinen, können wir Ihnen die Lösung anbieten, die Sie brauchen. Heute ist es vielleicht ein einzelnes Kabel, ein Switch oder ein Steckverbinder, morgen könnte es ein umfassendes Spektrum integrierter Applikationen, Systeme und Lösungen sein. Die Anzahl vernetzter, intelligenter Geräte und die von ihnen erzeugten Datenmengen werden, bedingt durch das Industrial Internet of Things (IIoT), explosionshaft zunehmen. Mit unserer Unterstützung sind Sie bestens auf die Bewältigung und Analyse dieser Datenmengen vorbereitet. Machen Sie Ihre Vision zur Realität, indem Sie neue Maßstäbe für Ihr Unternehmen setzen und von jederzeit abrufbaren Daten profitieren. Weitere Informationen finden Sie unter [info.belden.com/iiot](http://info.belden.com/iiot).

### Über Belden

Belden Inc., ein weltweit führender Anbieter von hochwertigen Signalübertragungslösungen, bietet ein umfassendes Produktportfolio, das auf die Anforderungen unternehmenskritischer Netzwerkinfrastrukturen in den Branchen Industrie- und Gebäudeautomation sowie Broadcast zugeschnitten ist. Mit innovativen Lösungen für die zuverlässige und sichere Übertragung stetig wachsender Datenmengen für Audio- und Videoinformationen, die für moderne Anwendungen benötigt werden, übernimmt Belden eine Schlüsselrolle bei der globalen Veränderung hin zu einer vernetzten Welt. Das Unternehmen mit Hauptsitz in St. Louis, USA, wurde 1902 gegründet und betreibt Fertigungsstätten in Nord- und Südamerika, Europa und Asien.

Für weitere Informationen besuchen Sie uns unter [www.belden.com](http://www.belden.com) und folgen Sie uns auf Twitter [@BeldenIND](https://twitter.com/BeldenIND).