



# TSN als Wegbereiter für KI in der Automatisierung

Neue Möglichkeiten dank PROFINET und TSN

## Erfahren Sie mehr über:

- Die Vorteile von TSN für KI-Anwendungen
- Den Unterschied zwischen klassischen Feldbussystemen und TSN-Netzwerken
- Die Funktionen von TSN
- Den Use Case „optische Anomalieerkennung“ mit Hilfe von TSN

# Einleitung

**Time-Sensitive Networks (TSN) werden schon lange als „Game Changer“ in der Automatisierung diskutiert. Vorher müssen aber die folgenden Fragen beantwortet werden: Welche neuen Applikationen und Lösungen werden durch TSN ermöglicht? Wie tragen TSN-Standards dazu bei? Wie sieht der Übergang zu TSN aus? Und wie geht es mit der Technologie in Zukunft weiter? Diese Fragen sollen im Rahmen dieses Whitepaper beantwortet werden.**

Neue Technologien sind immer dann erfolgreich, wenn sie neue Anwendungen ermöglichen, die aktuell gar nicht oder nur sehr aufwendig zu implementieren sind. Eine dieser Anwendungen ist die zunehmende Verbreitung von künstlicher Intelligenz (KI/AI) in der Automatisierung. Die hierbei nutzbare Rechenleistung und Werkzeuge z. B. für maschinelles Lernen, Bilderkennung, Data-Mining etc. werden immer preisgünstiger und sind immer einfacher nutzbar. Chat-GPT ist hier ein gutes Beispiel. Es wird erwartet, dass diese Entwicklung mit rasanter Geschwindigkeit weitergehen wird.

Welche Anforderung stellt daher die Nutzung von KI an die Automatisierung und Vernetzung?

1. Es müssen große Datenmengen aus dem Feld zur KI transportiert werden.
2. Das Ergebnis der KI-Operation wirkt sich in Echtzeit auf den zu steuernden Prozess aus.
3. Hochgenaue Uhrzeitsynchronisation ist essenziell zur Verarbeitung und Auswertung von verteilten Daten aus dem Feld.

Optimal ist die Erfüllung aller dieser Anforderungen in einem einzigen Netzwerk. Hier ist TSN die Lösung.

## Inhalt

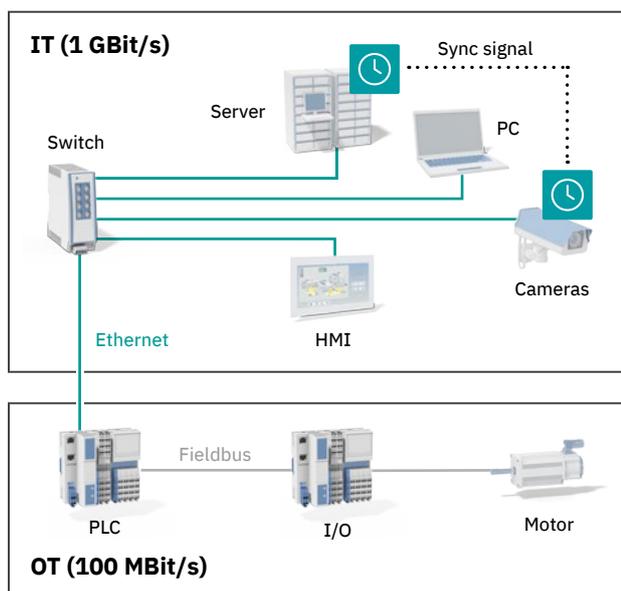
→ Der Status: Alte und neue Welt	3
→ Die Technik: Wie funktioniert TSN?	6
→ Die Anwendung: Wo wird TSN benötigt?	11
→ Ausblick	13
→ Kontakt	14

# 1 Der Status: Alte und neue Welt



## Feldbus und IT in getrennten Netzwerken

Die vorher beschriebenen Anforderungen werden heute oft in getrennten Netzwerken umgesetzt. Das folgende Bild stellt die aktuelle Situation dar:



*Getrennte Netzwerke für Feldkommunikation und IT*

Beispiel ist eine Applikation, bei der mehrere Kameras zu einem synchronisierten Zeitpunkt ein Bild aufnehmen, das dann auf einem Server mit einer KI-basierten Anomalieerkennung ausgewertet wird. Das Ergebnis dieser Auswertung wirkt dann auf den Automatisierungsprozess zurück.

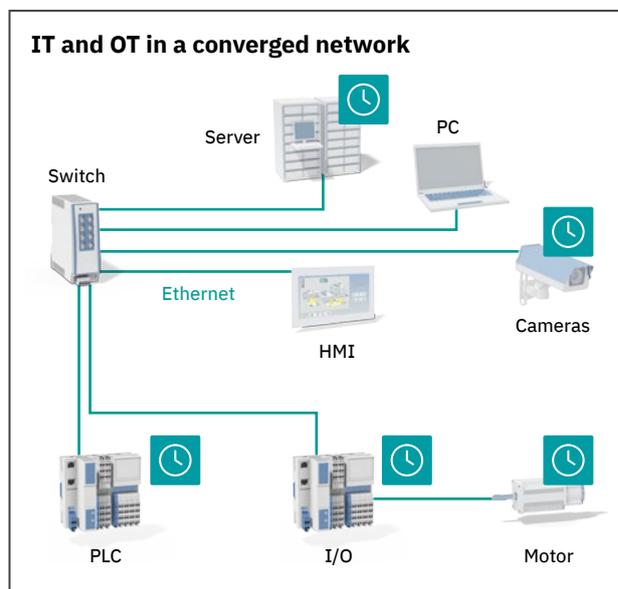
Da bei Bilddaten sehr schnell mehrere 100 MBit/s anfallen können, ist für das Kameranetzwerk mindestens eine Gigabit-Infrastruktur notwendig. Heutige verbreitete Feldbussysteme basieren aber oftmals nur auf 100 MBit/s und können daher nicht für den Transport großer Datenmengen genutzt werden. Auch eine hochgenaue Uhrzeit-synchronisation ist heute in IT-Netzwerken und Systemen wie PROFINET RT nicht immer verfügbar. Deshalb werden z. T. getrennte Leitungen zur Synchronisation der Kameras verlegt.

Eine Trennung hat den Vorteil, dass per Prinzip keine negative Beeinflussung von IT-Kommunikation auf die echtzeitfähige Funktion des Feldbusses einwirken kann. Dem gegenüber gibt es aber Nachteile, wie größere Aufwände und Kosten für Installation, Wartung und Inbetriebnahme von Feldbus, IT und Synchronisationssystem, hohe Komplexität mit notwendigem Spezialwissen und geringe Flexibilität für zukünftige Erweiterungen oder Änderungen, wie z. B. die nachträgliche Installation neuer Kameras.

## TSN – ein Netzwerk für alles

An dem angeführten Beispiel ist einfach erkennbar, dass ein erhebliches Verbesserungspotenzial darin liegt, alle notwendigen Funktionen in einem einzigen Netzwerk zu vereinigen. Dies wird auch oft als „konvergentes Netzwerk“ bezeichnet. Das nebenstehende Bild stellt dies dar.

Wichtig hierbei ist vor allem, dass sich die Disziplinen der IT- und OT-Welt in einem gemeinsamen Netzwerk nicht gegenseitig beeinflussen. Um dies sicherzustellen, müssen in Ethernet selbst einige Optimierungen vorgenommen werden, die in ihrer Summe als Time-Sensitive Networks bezeichnet werden. Dies wird im Folgenden weiter erläutert.

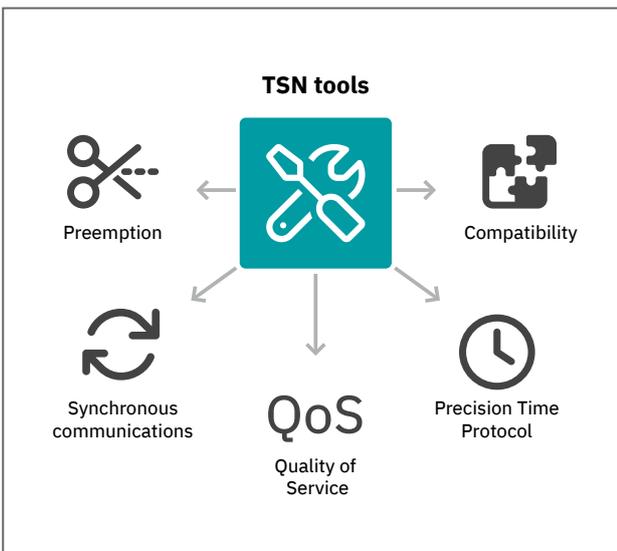


*Ein konvergentes Netzwerk für Feldkommunikation und IT*

# 2 Die Technik: Wie funktioniert TSN?



Es ist wichtig zu verstehen, dass TSN kein einzelner Mechanismus oder ein einzelner Standard ist. Vielmehr kann man TSN mit einem Werkzeugkasten vergleichen, der mit mehreren Werkzeugen gefüllt ist. Jedes dieser Werkzeuge ist für einen speziellen Zweck gestaltet. Erst im richtigen Zusammenspiel aller Werkzeuge entfaltet sich der volle Nutzen eines konvergenten Netzwerks. Diese Werkzeuge werden bei PROFINET über TSN so kombiniert, dass sich das Look-and-Feel nicht ändert. Dies wird noch einmal durch das folgende Bild verdeutlicht:

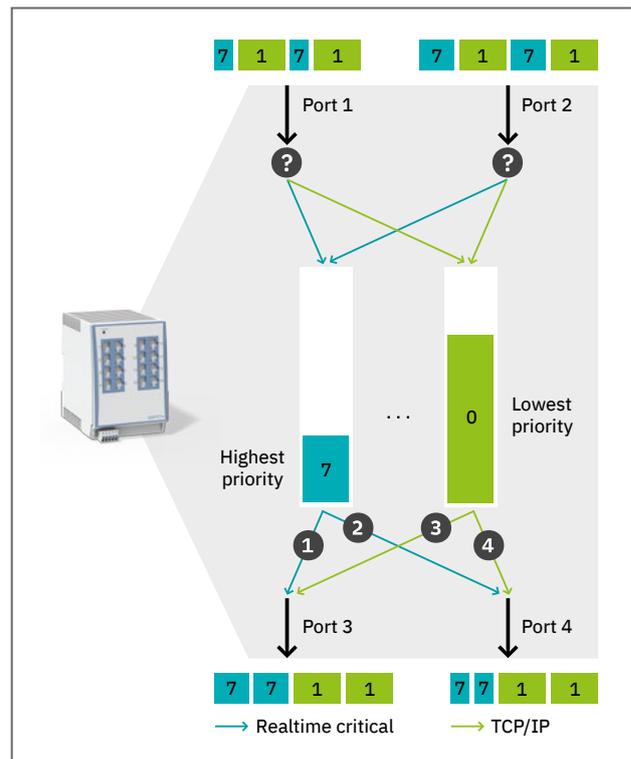


TSN-Werkzeuge für ein konvergentes Netzwerk

## Quality-of-Service – Vorfahrtsregeln

Quality-of-Service (QoS) ist kein neues Konzept. Es ist bei Ethernet bereits seit vielen Jahren im Einsatz. Damit sich die einzelnen Kommunikationsarten nach vorgegebenen Regeln nicht gegenseitig beeinflussen, wird QoS in einem konvergenten Netz allerdings existenziell.

Jedes empfangene Telegramm z. B. an einem Switch wird anhand eines enthaltenen Prioritätsfelds (VLAN-Priorität) in getrennte Speicherbereiche (sog. Queues) einsortiert. In den Eingangsdaten können Pakete unterschiedlicher Priorität gemischt sein. Üblich sind heute bis zu acht Prioritäten. Die gespeicherten Telegramme werden dann auf der Sendeseite entsprechend ihrer Priorität von ‚Hoch‘ nach ‚Niedrig‘ wieder gesendet. Es muss sichergestellt sein, dass Queues mit hoher Priorität wie z. B. für Realtime-Telegramme nicht überlastet werden, da es sonst zu Telegrammverlusten und Verbindungsabbrüchen im Feld kommen kann. Bei PROFINET RT wird dies heute schon durch eine Netzwerkplanung gewährleistet. Dieses Modell stellt sicher, dass Telegramme mit hoher Priorität selbst dann gesendet werden, wenn die Speicher von niedrigeren Prioritäten überlastet sind, was bei TCP/IP-Traffic nicht so kritisch ist.

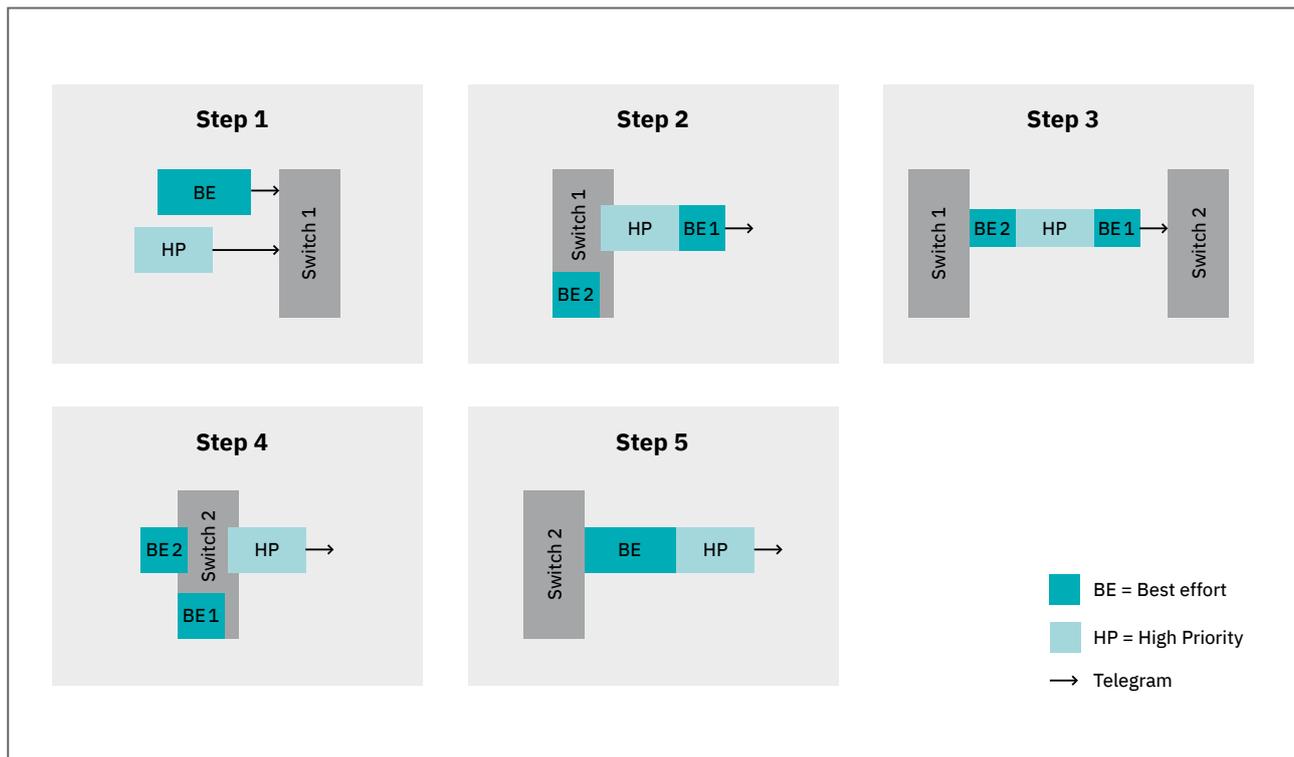


Funktionsprinzip von Quality-of-Service

## Preemption – Unterbrechung von langen Telegrammen

Ein weiteres Problem, das in einem konvergenten Netzwerk auftreten kann, ist die Verzögerung von echtzeitkritischen Telegrammen durch lange TCP/IP-Telegramme auf dem Sende-Port. Bei 1 GBit/s Bandbreite belegt ein maximal großes Ethernet-Telegramm von 1.500 Byte das Medium für 12,5 µs. Bei übergroßen Telegrammen (Jumbo Frames, 9.000 Bytes) beträgt diese Zeit sogar 75 µs. Ohne weitere Maßnahmen addieren sich diese Zeiten in Linientopologien zu nicht deterministischen Übertragungslatenzen (sog. Jitter). Hier setzt der sog. Preemption-Mechanismus von TSN an.

Beim Senden eines Telegramms mit hoher Priorität wird eines mit niedrigerer Priorität sofort unterbrochen. Der noch zu sendende Rest wird gespeichert und nach der hoch-priorioren Übertragung fortgesetzt. Dieser Mechanismus ist in der Hardware implementiert, so dass er mit „Wire Speed“ funktioniert. Preemption sorgt dafür, dass die Varianz der Übertragung bei 1 GBit/s auf ca. 1 µs sinkt und das unabhängig von der Telegrammgröße. Daher ist Preemption ein sehr wirksames Werkzeug aus dem TSN-Werkzeugkasten.



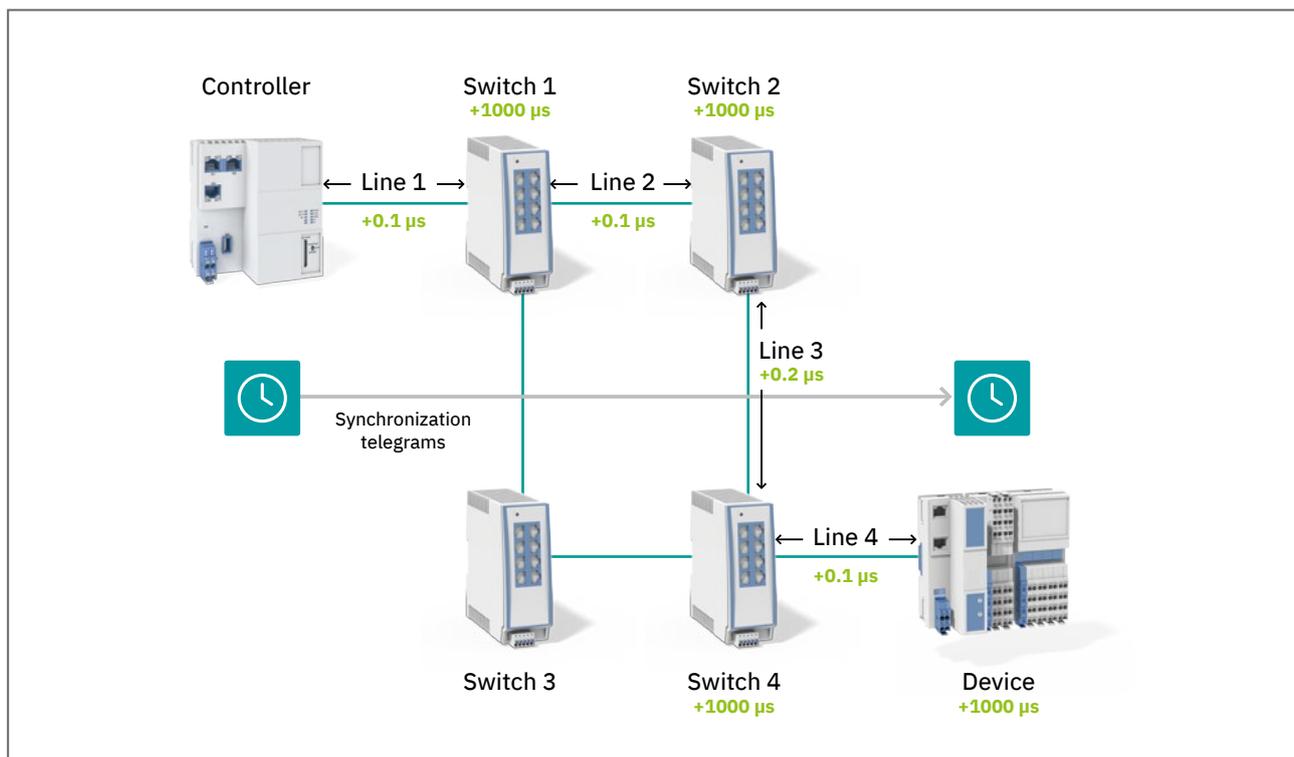
Funktionsprinzip von Preemption

## PTP – Präzise Uhrzeitsynchronisation

Für viele Anwendungen in Kombination mit AI ist eine hochgenaue Uhrzeitsynchronisation erforderlich. Das verbreitete Synchronisationsprotokoll NTP (Network Time Protocol) reicht hier nicht mehr aus. Außerdem wird NTP nicht von jedem Gerät unterstützt.

Daher wird zur Uhrzeitsynchronisation bei TSN das sog. Precise Time Protocol (PTP, 802.1AS) verwendet. Über dieses Protokoll lassen sich Synchronisationsgenauigkeiten im  $\mu\text{s}$ -Bereich erzielen. Die Funktion ist wie folgt: Grundprinzip der Uhrzeitsynchronisation ist das regelmäßige Versenden einer Referenzzeit ins Netzwerk.

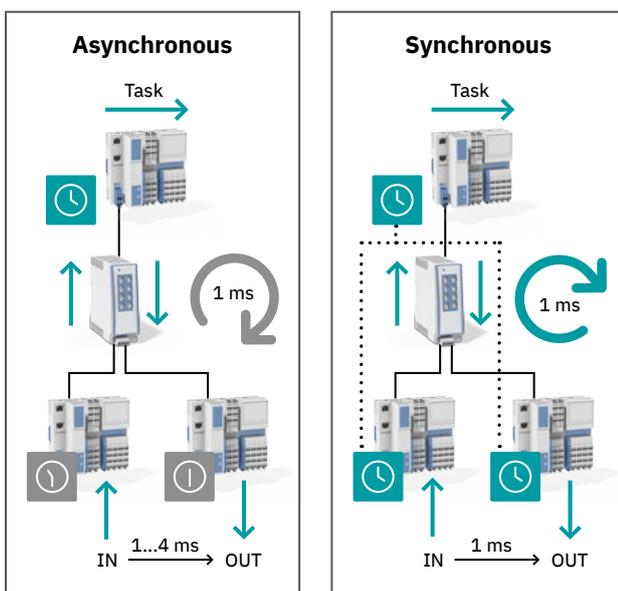
Auf diese Zeitbasis synchronisieren sich die Uhren in allen beteiligten Geräten. Die Laufzeit von Ethernet-Telegrammen auf der Leitung beträgt  $5 \text{ ns/m}$ . Bei  $100 \text{ m}$  sind das entsprechend schon  $500 \text{ ns}$ . Für eine Genauigkeit von  $1 \mu\text{s}$  muss also schon die Laufzeit auf den Leitungen bekannt sein und kompensiert werden. Dazu kommt noch die Weiterleitezeit der Uhrzeittelegramme in den Switches. Diese liegen selbst im  $\mu\text{s}$ -Bereich und müssen ebenfalls kompensiert werden. Das PTP-Protokoll spezifiziert daher Mechanismen zur Laufzeitmessung und Kompensation von Uhrzeittelegrammen, die zu der geforderten hohen Synchronisationsgenauigkeit führen.



Grundlagen von Precision Time Protocol

## Synchrone Kommunikation

Die hochgenaue Uhrzeitsynchronisation über PTP ermöglicht auch die Synchronisation der Kommunikation und der Applikationen in den beteiligten Geräten, wie im Bild dargestellt.

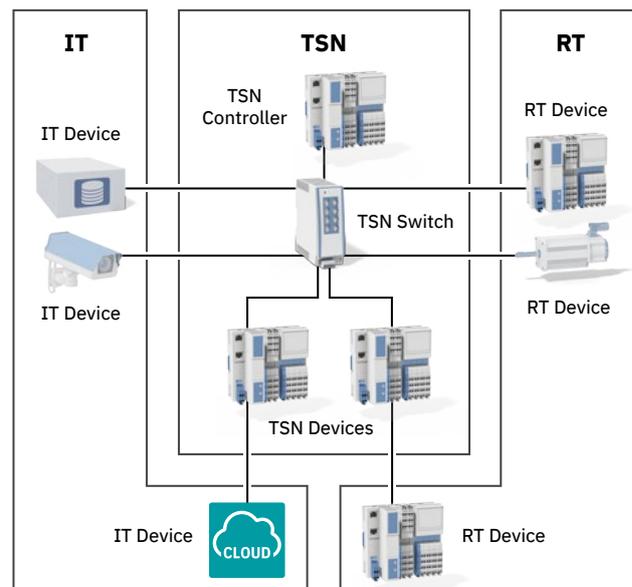


Asynchrone vs. synchrone Kommunikation

Bei PROFINET RT laufen die Kommunikation und die Applikationen auf den Geräten und Steuerungen asynchron. Dies führt dazu, dass die sog. „Klemme-zu-Klemme“-Reaktionszeit in weiten Bereichen variieren kann. Bei einer angenommenen Zykluszeit von 1 ms kann ohne Synchronisation auf dem Weg vom Eingang zum Ausgang immer gerade ein Zyklus verpasst werden. Damit kann sich die Reaktionszeit sporadisch im Bereich von 1 bis 4 ms ändern. Mit der synchronen Kommunikation wird sichergestellt, dass die Daten auf dem Weg vom Eingang zum Ausgang immer pünktlich empfangen und verarbeitet werden. Dies erhöht den Determinismus von PROFINET signifikant.

## Kompatibilität – Investitionssicherheit

Die Nutzung der beschriebenen Werkzeuge erfordert neue Hardware in allen beteiligten Geräten. Daher erfolgt die Einführung von TSN erst einmal nur dort, wo sich auch ein signifikanter Vorteil ergibt. Aus diesem Grund werden auch Maßnahmen getroffen, die einen sanften Übergang von PROFINET RT hin zu PROFINET über TSN ermöglichen. So werden Investitionen in Geräte und Know-how gesichert.



Kompatibilität des TSN-Systems mit bestehenden RT- und IT-Geräten

Die beschriebenen TSN-Werkzeuge können nur zwischen geeigneten Geräten genutzt werden. Diese müssen dann in einem durchgängigen Bereich installiert sein. An jeden Port dieses Bereichs können bestehende RT- oder auch IT-Geräte angeschlossen werden. Diese Geräte profitieren zwar nicht direkt von TSN, können aber mit der gleichen Qualität wie bisher weitergenutzt werden.

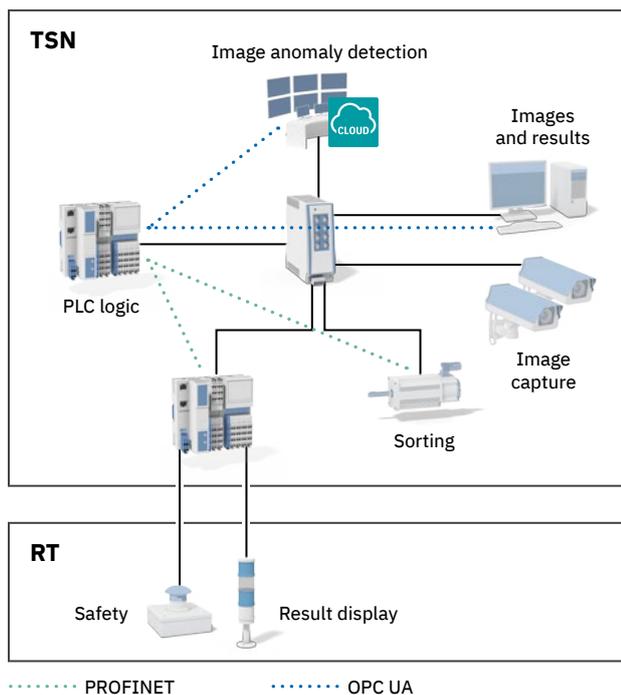
# 3 Die Anwendung: Wo wird TSN benötigt?



## Anwendungsbeispiel „Optische Anomalieerkennung“

Die Vorteile von TSN können konkret an dem Anwendungsbeispiel „Optische Anomalieerkennung“ erläutert werden.

In einen kontinuierlichen Fertigungsprozess für Produkte soll eine optische Qualitätskontrolle integriert werden. Wegen der Fertigungsgeschwindigkeit kann eine Kamera alleine kein scharfes Produktbild aufnehmen. Deshalb werden über den durchlaufenden Produkten mehrere Kameras installiert, deren Bildeinzug auf ein Fertigungsprodukt synchronisiert ist. Eine KI-Applikation, z. B. auf einem Edge-PC, liest die einzelnen Bilder ein, setzt sie zu einem kompletten Produktbild zusammen und vergleicht dieses Bild mit einem gelernten Normal. Weicht das Produktbild von diesem Normal ab, dann wird das betroffene Bauteil in einem späteren Schritt aussortiert.



Anwendungsbeispiel für PROFINET mit TSN

Die folgenden TSN-Werkzeuge sind hier hilfreich:

- PROFINET mit synchroner Kommunikation für die Fertigungssteuerung,
- PTP zur Synchronisation der Kameras,
- QoS zur parallelen Übertragung von Realtime-Daten und Bilddaten,
- Preemption, um die Latenz der Echtzeittelegramme durch Kameradaten nicht zu beeinflussen.

All dieses kann in einem einzigen Netzwerk realisiert werden. Zukünftige Erweiterungen sind ebenfalls möglich, da beliebige Ports für neue Geräte genutzt werden können.

## Weitere Anwendungsbeispiele für TSN

Weitere mögliche Applikationen, die von TSN-Werkzeugen profitieren, sind:

- Robot-Vision
- Übertragung von Schwingungsdaten für Predictive Maintenance
- 3D-Bilder über synchronisierte Kameras
- Frequenzsynchronisation im Einspeise- und Lastmanagement von alternativen Energieerzeugern
- Hochgenaue Zeitstempel in Alarmmeldungen zum zeitlichen Nachvollziehen einer Sequenz
- Das Update von großen Datenmengen, z. B. Firmware-Updates im laufenden Betrieb.

Diese Anwendungen und noch viele Weitere profitieren von der Nutzung eines gemeinsamen Netzwerks inkl. Uhrzeitsynchronisation. Hierdurch ergeben sich erhebliche Vorteile im Vergleich zu getrennten Installationen.

# Ausblick

Die beschriebenen Werkzeuge sind für die PROFINET-Kommunikation zwischen Steuerungen und Feldgeräten einfach nutzbar, ohne dass sich die Anwendungssicht auf PROFINET ändert. In vielen Applikationen findet aber die Kommunikation nicht nur zwischen Steuerungen und Feldgeräten (Controller to IO), sondern auch zwischen Steuerungen selbst (Controller to Controller) statt. Für diesen Anwendungsfall ist OPC UA

mit Pub-/Sub-Kommunikation besser geeignet. Daher arbeitet die OPC Foundation im Rahmen der Arbeiten zu OPC UA Field Exchange ebenfalls an einem Nutzungskonzept für TSN. Ziel ist die gemeinsame Nutzung von PROFINET-, OPC UA- und IT-Daten in einem konvergenten Netzwerk.



*Gemeinsame Nutzung von PROFINET-, OPC UA- und IT-Daten in einem konvergenten Netzwerk*

# Kontakt

---

## Sichern Sie sich jetzt einen Beratungstermin

Sie suchen einen starken Partner für den Aufbau und den Betrieb zukunftssicherer Kommunikationsnetzwerke?

Für ein sicheres und stabiles Netzwerk benötigen Sie eine professionelle Planung und hochwertige Komponenten, die optimal aufeinander abgestimmt sind. Wir beraten Sie von der Netzwerkplanung, über die Wahl der passenden Komponenten bis zur Umsetzung und unterstützen Sie mit zukunftssicheren Produkten.

Decken Sie Ihre Potenziale auf in einem gemeinsamen Gespräch mit unseren Expertinnen und Experten. Wir freuen uns auf Ihre Kontaktaufnahme.



**Gunnar Lessmann**

*Master Specialist für PROFINET  
und TSN bei Phoenix Contact*

*[glessmann@phoenixcontact.com](mailto:glessmann@phoenixcontact.com)*

## Bleiben Sie am Ball

Erfahren Sie mehr über neue Technologien wie:

- Time-Sensitive Networking (TSN)
- 5G
- Single Pair Ethernet (SPE)
- Und viele mehr

[phoenixcontact.com/communication-technologies](https://phoenixcontact.com/communication-technologies)

