

## **TTEthernet – Ein leistungsstarkes Netzwerk für alle Ansprüche**

Trotz seines stolzen Alters von mehr als 30 Jahren breitet sich Ethernet weiterhin in neuen Anwendungsbereichen aus. Neben Office- und Web-Applikationen wird der Einsatz von Ethernet als einheitliches Universalnetzwerk heute auch ernsthaft in Produktionsanlagen, sicherheitskritischen Systemen, Flugzeugen oder Automobilen verfolgt. Ethernet verspricht für alle Bereiche ein hohes Einsparungspotential. Die Kosten für Engineering, Erhaltung und Lernaufwand sind im Gegensatz zu vielen proprietären Bus-Systemen wesentlich geringer. Darüber hinaus bietet Ethernet um Größenordnungen höhere Bandbreiten. Die ursprüngliche Entwicklung von Ethernet berücksichtigte nicht Aufgaben mit extrem zeitkritischen, deterministischen oder sicherheitsrelevanten Randbedingungen zu bedienen. TTEthernet erweitert das klassische Ethernet mit neuen vielseitigen Diensten, um möglichst alle neuen Anforderungen zu erfüllen.

### ***Von Ethernet zu TTEthernet***

In den letzten Jahren wurde viel publiziert und diskutiert, wie man Ethernet für neue Anwendungsbereiche fit machen könnte. Es ging vor allem um den Einsatz für Echtzeitaufgaben im industriellen Umfeld (Industrial Ethernet). Mehr als 20 verschiedene Ansätze kämpfen heute alleine in der industriellen Automatisierung um die Gunst des Anwenders. Jüngst wurde der Wettbewerb in dieser Branche um zusätzliche Safety Ethernet Lösungen erweitert, die vor allem den Ansprüchen der Maschinen- und Anlagenbauer genügen sollen. Auch in anderen Branchen gibt es Bemühungen Ethernet fit für spezielle Anforderungen zu machen, wie z.B. LXI in der Messtechnik oder AFDX in der Luftfahrtindustrie.

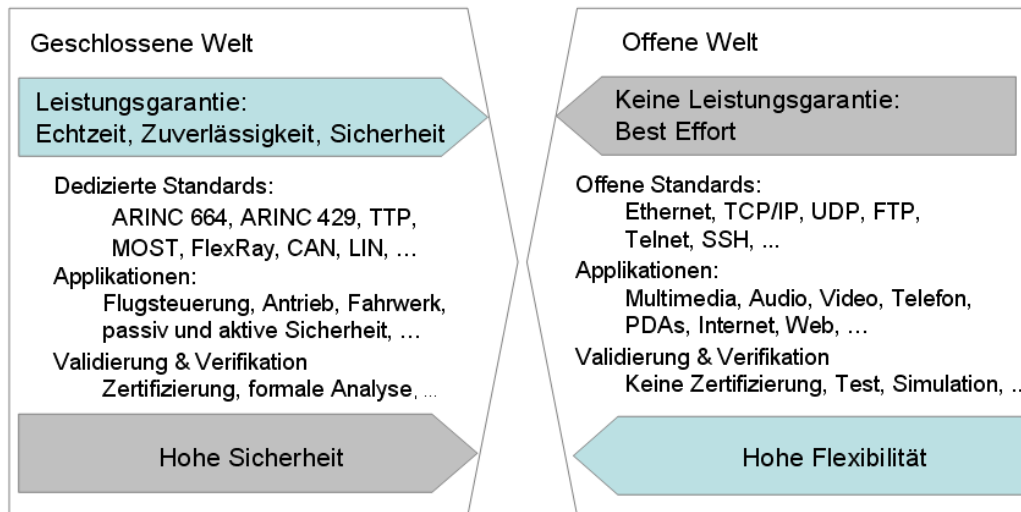
Die bisher vorgestellten Ethernet Systeme sind nur sehr eingeschränkt mit klassischen Ethernet Netzwerken, Geräten und Diensten kombinierbar. Darüber hinaus ist die Skalierbarkeit dieser Systeme beschränkt, und die Technik wurde für einen ganz bestimmten Anwendungsbereich maßgeschneidert. An den Einsatz der bisher publizierten Echtzeit und Safe Ethernet Systeme außerhalb des klassischen Maschinen und Anlagenbaus ist nicht gedacht. In allen Anwendungsbereichen erzeugt der Markt Druck die Anzahl der Netzwerke radikal zu reduzieren und damit Kosten, Aufwand und Ressourcen zu sparen. TTEthernet vereinigt die bewährten Eigenschaften Determinismus, Fehlertoleranz und Echtzeit- der Zeitsteuerung (time-triggered technology) mit der Flexibilität, Dynamik und das Legat von „Best-Effort“-Ethernet und ist daher für alle Applikationsarten geeignet.

In der Netzwerktechnik wird im Allgemeinen zwischen der geschlossenen, statisch konfigurierten embedded Welt und der offenen, dynamischen Welt mit freier Kommunikationsform unterschieden. Während Netzwerke der statisch konfigurierten Welt die zuverlässige Datenübertragung in Echtzeit (in unterschiedlichem Ausmaß) ermöglichen, erbringen Netzwerke der dynamischen Welt ihre Leistung nur nach dem Best-Effort-Prinzip, d.h. es wird keine Gewähr dafür übernommen, ob und wann die Daten übertragen werden. Da die Systeme der statisch konfigurierten Welt normalerweise strengen Sicherheitsstandards entsprechen müssen, ist die Anzahl der Kommunikationsteilnehmer zwar bekannt, aber nicht sehr flexibel. Bei Systemen der dynamischen Welt bilden offene Standards, z.B. der TCP/IP/Ethernet-Stack für das Internet, die

## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

Seite 2

Grundlage der Kommunikation, wodurch beliebig viele Teilnehmer vorhanden sein können. TTEthernet kombiniert die enorme Flexibilität aus der dynamischen Welt mit der Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit aus der statisch konfigurierten Welt (siehe Abbildung 1).



**Abb. 1: TTEthernet vereint die Vorzüge von Systemen der offenen und geschlossenen Welt auf Basis der Ethernet Standards IEEE 802.3**

### Anforderungsziele von TTEthernet

TTEthernet ermöglicht die nahtlose Kommunikation aller Anwendungen mittels Ethernet Technik. Herkömmliche PCs, Geräte aus der Web- und Office-Welt, Multimediasysteme, Echtzeitsysteme bis zu höchsten Anforderungen sowie sicherheitskritische Systeme sollen ein und dasselbe Netzwerk nutzen können. Ein einziges Netzwerk, vollständig kompatibel zu den Ethernet Standards des IEEE 802.3, ist geeignet Daten zwischen verschiedenen Anwendungen mit den unterschiedlichsten Randbedingungen zu transportieren. In einem Flugzeug könnte damit nur mehr eine Netzwerktechnik alle Anwendungen, vom Unterhaltungsprogramm, über die Bordversorgung, die elektronischen Navigations- und Lenksysteme bis zum Internetzugang am Sitz bedienen. Kritische Bereiche sind entsprechend fehlersicher (fail-safe oder fail-operational) ausgeführt. Mechanismen zur Fehlerisolation schließen sowohl die Ausbreitung von Fehlern im System als auch unerlaubte Zugriffe auf nicht freigegebene Ressourcen durch potentielle Hacker aus.

TTEthernet ist skalierbar. Netzwerke, die heute eher unkritische Anwendungen verbinden, sollen morgen Echtzeitdaten für verteilte Steuerungen austauschen können und übermorgen fit für sicherheitskritische Anwendungen sein. Änderungen an den bereits laufenden Anwendungen sind nicht notwendig, wenn das Netzwerk funktionell erweitert wird. Bei TTEthernet haben zeitkritische Nachrichten gegenüber weniger wichtigen Nachrichten in jedem Fall Vorzug. Herkömmliche Anwendungen sind davon gar nicht beeinflusst. Das Zeitverhalten der zeitkritischen Nachrichten ist je nach geforderter Güte charakterisierbar oder genau vorhersag- und berechenbar (deterministisch).

---

## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

---

Seite 3

TTEthernet bedient auch sicherheitskritische fail-operational Anwendungen. Das heißt, dass trotz Fehler (Einzel- und Mehrfachfehler-Hypothese) im Netzwerk, das System weiterhin voll funktionsfähig bleibt. Egal ob ein Knoten, ein Switch oder ein Netzwerkstrang fehlerhaft ist, das Netzwerk erlaubt weiterhin eine sichere Kommunikation. Dies ist ein wesentlicher Unterschied von TTEthernet zu den bisher vorgestellten Safe Ethernet Systemen, die für industrielle Anwendungen ausreichend sind (fail-safe). Diese sorgen nämlich nur dafür, dass Fehler im Netzwerk sicher erkannt werden und das System dann in einen sicheren Zustand, wie z.B. Stoppen der Maschine, schaltet. Um die Verfügbarkeit des Systems zu gewährleisten, verfügt TTEthernet über eine Reihe von Diensten für Uhrensynchronisation, Inbetriebnahme, Cliquenerkennung und Wiederherstellung. Das Verhalten von TTEthernet ist genau vorher berechenbar und daher auch formal verifizierbar.

### **Systemeigenschaften von TTEthernet**

TTEthernet besitzt zeitgesteuerte Dienste, die die zeitgesteuerte Kommunikation über Ethernet ermöglichen. Diese zeitgesteuerten Dienste setzen eine globale Zeit fest, die durch die Synchronisation der lokalen Uhren in den Geräten konstant gehalten wird. Die globale Zeit bildet die Grundlage für die Systemeigenschaften von TTEthernet wie z.B. zeitliche Partitionierung, genaue Diagnose, effiziente Ressourcennutzung und Zusammensetzbarkeit.

**Zeitliche Partitionierung:** Die globale Zeit kann als wirkungsvolle Methode zur Fehlerisolierung genutzt werden, wenn Geräte von Störungen betroffen sind. In solchen Fällen sprechen wir von der globalen Zeit als einer „Temporal Firewall“. Bei einer Störung kann die fehlerhafte Applikation nicht mehr auf das Netzwerk zugreifen. Je nach dem, wo die Störung auftritt, wird entweder der Kommunikationscontroller oder der Switch die fehlerhafte Übertragungsversuche blockieren. Störungen im Switch können durch wirkungsvolle End-to-End-Maßnahmen wie z.B. CRCs oder hoch zuverlässige Konstruktionen ausgeblendet werden.

**Effiziente Ressourcennutzung:** Die globale Zeit trägt zur effizienten Ressourcennutzung in mehrfacher Weise bei. Die zeitgesteuerte Kommunikation minimiert den Speicherpuffer in den Geräten des Netzwerks, weil der Ablaufplan konfliktfrei arbeitet. Daher ist es nicht notwendig, Switches gegen Nachrichtenhäufungen, die über dieselbe physische Verbindung zugestellt werden müssen, abzusichern. Die Entwicklung zeitgesteuerter Switches kann auch die Zugriffslogik wie z.B. bei Empfang und Versand bündeln. Eine weitere Methode der effizienten Ressourcennutzung ist die Pufferspeicherung in den Knoten. Diese kann minimiert werden, weil die Sensorwerte gemäß der globalen Zeit vor dem Versand der Nachricht erfasst werden. Die dritte Methode der effizienten Ressourcennutzung ist das Energiemanagement, das Energie analog zum Speicher spart.

**Genauere Diagnose:** Ein Stempel der globalen Zeit vereinfacht den Wiederherstellungsprozess bei einer Kette verteilter Ereignisse. Andererseits lassen sich durch die synchrone Erfassung von Sensorwerten Zustandsaufnahmen des gesamten Systems durchführen.

**Zusammensetzbarkeit:** Mit der globalen Zeit lassen sich die Geräte nicht nur im Wertebereich, sondern auch im Zeitbereich spezifizieren. D.h., dass der Zugriff auf das Kommunikationsnetzwerk schon während

## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

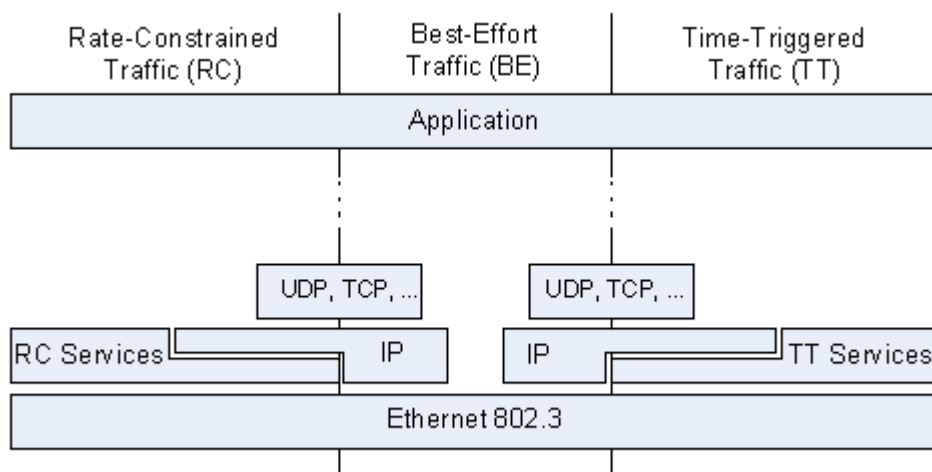
Seite 4

der Entwicklung der Geräte definiert werden kann. Die Geräte können demnach parallel entwickelt werden. Bei der Integration der Geräte ist garantiert, dass die oben genannten Dienste stabil arbeiten und alle Geräte koordiniert betrieben werden.

### **Datenfluss und Kommunikationsklassen**

TTEthernet verfügt über besondere Dienste, die die zeitgesteuerte Kommunikation über Ethernet ermöglichen. Diese zeitgesteuerten Dienste lassen sich parallel zu den herkömmlichen OSI-Schichten betrachten: ein Kommunikationscontroller, der diese Dienste implementiert, vermag sich mit anderen Kommunikationscontrollern und Switches des Systems synchronisieren. Ein solcher Kommunikationscontroller kann dann Nachrichten zu Zeitpunkten senden, die sich von der systemweiten Synchronisation herleiten. Diese Nachrichten werden demzufolge als zeitgesteuert bezeichnet.

Da TTEthernet die Kommunikation von Anwendungen mit unterschiedlichen Anforderungen an Echtzeit und Sicherheit auf einem Netzwerk unterstützt, werden drei verschiedene Kommunikationsklassen angeboten: zeitgesteuerte (TT), rate-constrained (RC) und best-effort (BE) Nachrichten. Bei Bedarf kann die entsprechende Kommunikationsklasse einer Nachricht auf der Grundlage der jeweiligen Ethernet Destination Adresse ermittelt werden. Die Beziehung zwischen den Kommunikationsklassen von TTEthernet und den bestehenden Standards ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abb. 2: Die Beziehung von TTEthernet zu bestehenden Standards**

Nachrichten aus höheren Protokollschichten wie z.B. IP oder UDP lassen sich ohne Änderung ihrer Inhalte zu zeitgesteuerten Nachrichten umwandeln. Der Overhead des TTEthernet-Protokolls wird in eigenen Nachrichtenblocks übertragen. Diese Protokollsteuerungsnachrichten dienen der systemweiten Synchronisation. In TTEthernet geht es nur um das „Wann“ einer Nachricht und nicht um die besonderen Inhalte einer Nachricht.

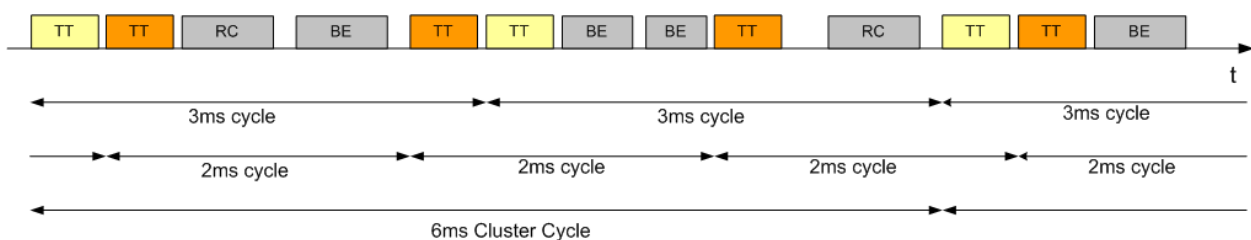
## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

TT-Nachrichten bedienen zeitgesteuerte Anwendungen. Alle TT-Nachrichten werden zu vorbestimmten Zeitpunkten am Netzwerk versandt und haben höchste Priorität gegenüber allen anderen Nachrichtenklassen. TT-Nachrichten werden typischerweise in Brake-by-Wire- und Steer-by-Wire-Systemen eingesetzt, die schnelle Regelschleifen über das Netzwerk schließen. Mit TT-Nachrichten lassen sich strikt deterministische verteilte Systeme entwickeln und prüfen, in denen das Verhalten aller Systemkomponenten spezifiziert, analysiert und mit einer Genauigkeit von unter einer Mikrosekunde getestet werden kann.

RC-Nachrichten bedienen Anwendungen, die weniger hohe Ansprüche an Determinismus und Echtzeit stellen als streng zeitgesteuerte Anwendungen. RC-Nachrichten stellen sicher, dass für einzelne Anwendungen eine im Voraus bestimmte Bandbreite zur Verfügung steht und sich Verzögerungszeiten und zeitliche Abweichungen in definierten Grenzen halten. Sicherheitskritische Anwendungen in Flugzeugen und Automobilen, die hochzuverlässige Kommunikation mit vergleichbar moderaten Anforderungen an die zeitliche Qualität benötigen, bedienen sich der RC-Nachrichten. Weitere typische Nutzer der RC-Nachrichten sind Multimedia-Systeme.

RC-Nachrichten werden nicht auf Grundlage einer systemweiten synchronisierten Zeitbasis verschickt. Daher können verschiedenen Kommunikationscontroller RC-Nachrichten zu unterschiedlichen Zeitpunkten an den Empfänger schicken. In der Folge kann es dazu kommen, dass sich die RC-Nachrichten in den Switches des Netzwerks stauen und vermehrt als Jitter in der Übertragung bemerkbar machen. Da die Übertragungsrate von RC-Nachrichten a priori begrenzt ist und von den Switches im Netzwerk kontrolliert wird, kann der Maximalwert des Jitter off-line errechnet und Nachrichtenverlust verhindert werden.

BE-Nachrichten entsprechen dem bekannten Verfahren auf klassischen Ethernet-Netzen. Es gibt keine Garantien, ob und wann diese Nachrichten versandt werden können, welche Verzögerungszeiten auftreten, und ob BE-Nachrichten jemals beim Empfänger ankommen. BE-Nachrichten nützen die Restbandbreite des Netzwerks und haben die niedrigste Priorität hinter TT- und RC-Nachrichten. Typische Nutzer von BE-Nachrichten sind Web-Services. Der Datenfluss alter Ethernet-Systeme (z.B. Internet-Protokoll) kann ohne Qualitätseinbuße auf dieser Kommunikationsklasse abgebildet werden. TTEthernet beruht auf einer strikten Partitionierung zwischen nicht-kritischen BE-Nachrichten und allen anderen Kommunikationsklassen (siehe Abbildung 3).



**Abb. 3: TTEthernet umfasst TT-, RC- und BE- Nachrichten**

### ***TTEthernet als transparentes Synchronisationsprotokoll***

TTEthernet ist ein transparentes Synchronisationsprotokoll, d.h., es kann mit anderen Datenflüssen aus alten Systemen auf demselben physischen Kommunikationsnetzwerk existieren. Viele Geräte lassen sich zwecks Fehlertoleranz so konfigurieren, dass sie Synchronisationsnachrichten erzeugen. Diese Geräte sind mit zahlreichen zwischengeschalteten Geräten über das gesamte Netzwerk verteilt.

TTEthernet umfasst grundlegende Bestandteile, die die transparente Integration der zeitgesteuerten Dienste auf der nachrichtenbasierten Kommunikationsinfrastrukturen wie z.B. Ethernet ermöglicht. Aus diesem Grund definiert TTEthernet einen transparenten Uhrenmechanismus, der das Konzept eines permanenten Zeitpunkts zur Wiederherstellung der Versandordnung der Nachrichten im Empfänger unterstützt:

- **Transparenter Uhrenmechanismus:** Alle Geräte eines verteilten Computernetzwerks, das eine dynamische Verzögerung bei Versand, Empfang oder Weiterleitung einer Synchronisationsnachricht erzwingt, fügen diese dynamische Verzögerung in einem eigenen Feld der Synchronisationsnachricht bei.
- **Genaue Errechnung des permanenten Zeitpunkts:** Der Einsatz eines transparenten Uhrenmechanismus erlaubt die genaue Wiederherstellung der zeitlichen Ordnung unter den Synchronisationsnachrichten. In einem ersten Schritt wird die Verzögerungszeit für den ungünstigsten Fall errechnet. In einem zweiten Schritt wird jede Synchronisationsnachricht beim Empfang um „die Verzögerungszeit für den ungünstigsten Fall minus der dynamischen Verzögerung“ verzögert. Dabei ist die dynamische Verzögerung jene, die zur Synchronisationsnachricht hinzugefügt wird, während sie durch den Kommunikationskanal strömt. Dieser Zeitpunkt nach dem Empfang wird als permanenter Zeitpunkt bezeichnet.

Die Versandordnung der Nachrichten ist von höchster Wichtigkeit, wenn es um fehlertolerante Algorithmen im Allgemeinen und fehlertolerante Synchronisationsalgorithmen im Besonderen geht. Die Wiederherstellung der Versandordnung der Synchronisationsnachrichten ist für jedes Synchronisationsprotokoll erforderlich, das Fehler ausblendet. Ein solches Protokoll stellt die Synchronisation der lokalen Uhren in einem verteilten Computernetzwerk sicher.

### ***Sicherheit und Fehlertoleranz***

Auf Grund des zeitgesteuerten Verfahrens bietet TTEthernet schon grundlegend hohe Sicherheit um Ausfälle und Unregelmäßigkeiten im Netzwerk und bei einzelnen Geräten zu erkennen und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Bei höchsten Anforderungen an Sicherheit, Verfügbarkeit und Fehlertoleranz müssen noch weitere Maßnahmen gesetzt werden.

TTEthernet-Netzwerke können mit mehrfach redundanten Endgeräten, Switches und Segmenten aufgebaut werden. Auf diese Weise arbeitet das System auch bei Fehlern verlustfrei weiter. In fehlertoleranten TT-Ethernet-Systemen werden zu jeder Zeit redundante Netzwerkpfade betrieben, sodass der Ausfall einzelner Geräte oder Nachrichten ohne Einfluss auf die Applikation toleriert werden kann. Bei Mehrfachredundanz

## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

Seite 7

können auch Mehrfachausfälle abgefangen werden. Wichtig ist immer, dass das Gesamtsystem unter den zeitlich vorherbestimmten Rahmenparametern ohne Unterbrechung weiterläuft.

Zusätzlich bietet TTEthernet die Möglichkeit Guardians in Switches und Endsysteme zu integrieren. Guardians überwachen den Ablauf der Kommunikation am Netzwerk gemäß der vorbestimmten Parameter. Sollten fehlerhafte Geräte Gefahr laufen Netzwerksegmente zu blockieren, so koppelt der Guardian das betroffene Netzwerksegment bzw. Port ab. Guardians können (mehrfach)redundant ausgeführt werden um höchste Sicherheitsanforderungen zu befriedigen (siehe Abbildung 4).

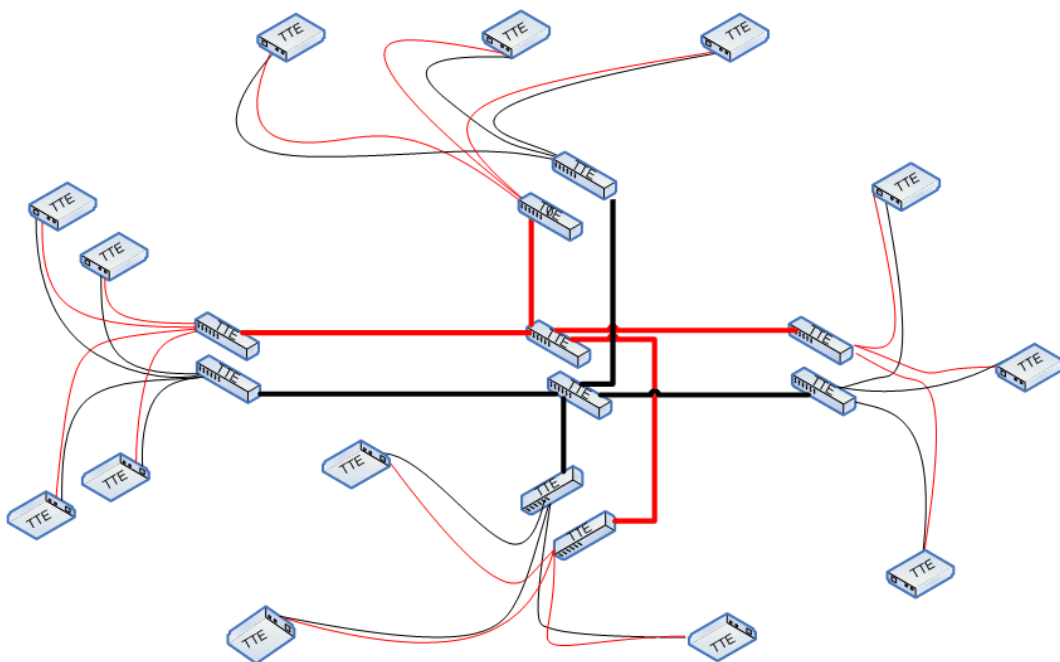


Abb. 4: TTEthernet bietet implizite Funktionen zur Fehltoleranz

### **Fehltolerante Funktionen**

TTEthernet ist für zahlreiche Applikationen unterschiedlicher Industrien ausgelegt. Daher umfasst TTEthernet anspruchsvolle fehlertolerante Funktionen:

- TTEthernet ist skalierbar: TTEthernet kann so konfiguriert werden, dass es als Synchronisationsprotokoll im Master-Slave-Verfahren zur Industriesteuerung oder im Multi-Master-Verfahren für Luftfahrtavionik betrieben wird. Diese Skalierbarkeit bedeutet einen enormen wirtschaftlichen Vorteil, weil die Kosten für den Einsatz von TTEthernet in verschiedenen Anwendungsgebieten erheblich gesenkt werden können. Zudem erhöht der Einsatz von TTEthernet in unterschiedlichen Industrien die Wahrscheinlichkeit, latente Fehler zu erkennen. Ebenso trägt die Verwendung von TTEthernet in Systemen vergleichbarer Kritikalität zur „Wartungsgeschichte“ von TTEthernet bei.



---

## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

---

Seite 8

- TTEthernet toleriert viele inkonsistente Fehler: Im Multi-Master-Verfahren toleriert TTEthernet einen inkonsistenten, durch Wegfall fehlerhaft gewordenen Kommunikationspfad und sogar ein inkonsistentes, durch Wegfall fehlerhaft gewordenes Endsystem zum selben Zeitpunkt. Dieser Fehlermodus bedeutet, dass jedes fehlerhafte Gerät Nachrichten an die ein- und ausgehenden Kommunikationsverbindungen mit potenziell inkonsistentem Nachrichtenverhalten schickt. Aus diesem Grund erlaubt TTEthernet den kosteneffizienteren Einsatz von Systemarchitekturen, die die Toleranz mehrerer gleichzeitig auftretender Störungen in einem System erfordert.
- TTEthernet toleriert beliebige Fehler in Endsystemen: Switches in TTEthernet können so konfiguriert werden, dass sie die Funktion eines zentralen Buswächters ausüben. Diese Funktion stellt sicher, dass die systemweiten Auswirkungen fehlerhafter Endsysteme auch dann ausgeblendet werden, wenn eine ganze Reihe von Endsystemen fehlerhaft wird. Dieser Fehlermodus umfasst auch Babbling Idiots und ähnliche Störfälle. Die Switches sorgen für Fehlerisolierung in TTEthernet.
- TTEthernet toleriert beliebige transiente Störungen auch bei Auftreten permanenter Störungen: Neben Fehlertoleranz bietet TTEthernet auch Selbststabilisierung, d.h., die Synchronisation wird auch nach transienten Fehlern in vielen Geräten des verteilten Computersystem wieder hergestellt. TTEthernet stabilisiert die Geräte mit beliebigem Systemstatus zu Geräten mit synchronisiertem Systemstatus. Diese Selbststabilisierung wird angesichts abnehmender Chipgröße und zunehmender Häufigkeit transienter Fehler immer wichtiger. Die Entwicklung zukünftiger verteilter Computernetzwerke setzt auf die wirksame und einwandfreie Toleranz mehrerer transienter Störungen.

### **Die Netzwerkstruktur von TTEthernet**

TTEthernet unterstützt alle in IEEE 802.3 spezifizierten Physical Layer für Switch-basierte Netzwerke. Auch Sub-Netzwerke mit unterschiedlichen Bandbreiten (100 Mbit/s, 1 Gbit/s,...) werden unterstützt.

Switches haben in TTEthernet die zentrale Rolle den Datenverkehr zu ordnen. -Nachrichten werden im Switch nach Zeitplan mit kleinstmöglicher, vorherbestimmter Verzögerung weitergeleitet. Durch die genaue Planung zur Entwurfszeit ist jeglicher Ressourcenkonflikt zur Laufzeit ausgeschlossen. TTprotocol- und TTdata-Nachrichten haben die höchste Prioritätsstufe. Ist der geplante Sendezeitpunkt einer dieser Nachrichten erreicht, wird diese sofort gesendet. Nachdem die Übertragung der Nachricht vorweg geplant ist, kann vom Switch sichergestellt werden, dass zum Sendezeitpunkt das Medium auch frei und Verzögerungen ausgeschlossen sind.

RC-Nachrichten leitet der Switch mit niedriger Verzögerungszeit weiter. Sind TT-Nachrichten zur gleichen Zeit über dasselbe Ausgangsport zu versenden, haben diese Vorrang. RC-Nachrichten können von TT-Nachrichten verzögert werden. RC-Nachrichten werden erst übertragen, wenn keine geplante TT-Übertragung ansteht und der Sender den minimalen Sendeabstand eingehalten hat. Die Reihung von mehreren RC-Nachrichten an einem Ausgangsport übernimmt der Switch.



---

## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

---

Seite 9

BE-Nachrichten haben immer Nachrang. BE-Nachrichten können am selben Ausgangsport durch anstehende RC- und TT-Nachrichten verzögert oder auch verworfen werden. Für BE-Nachrichten nützt der Switch die Restbandbreite, wenn keine TT- oder RC-Nachrichten zu versenden sind. BE-Nachrichten haben immer Nachrang. BE-Nachrichten können am selben Ausgangsport durch anstehende RC- und TT-Nachrichten verzögert oder auch verworfen werden. Für BE-Nachrichten nützt der Switch die Restbandbreite, wenn keine TT- oder RC-Nachrichten zu versenden sind. Ein TTEthernet-System wird vorab mittels Entwicklungswerkzeugen entworfen und verifiziert. Es ist sichergestellt, dass gemäß der Anforderungen der Anwendung immer genügend Bandbreite für TT, RC und BE Nachrichten zur Verfügung steht und Unterbrechungen auf ein Minimum reduziert sind. Spätere inkrementelle Änderungen in der Systemkonfiguration sind möglich.

TTEthernet-Switches erlauben die gleichzeitige Verteilung von TT-Nachrichten an ganze Gruppen von Endgeräten oder die Verbindung von zueinander nicht synchronisierten TTEthernet Netzwerken. Auf diese Weise können größere TTEthernet Netzwerke in anwendungsspezifisch kleinere Teilnetze aufgeteilt werden und der Entwurf vereinfacht werden.

### **Unterstützte Topologien**

TTEthernet ermöglicht die Synchronisation lokaler Uhren in einem verteilten Computernetzwerk. Besonders interessant sind Computernetzwerke zum Austausch von Informationen über Nachrichten, die auf Kommunikationsleitungen zwischen Geräten im Netzwerk verschickt werden. Bei Ethernet sind die Endsysteme über Netzwerk-Switches mit bidirektionalen Kommunikationsverbindungen angeschlossen. Ein Endsystem kommuniziert mit einem zweiten oder mehreren Endsystemen, indem es eine Nachricht an den Switch schickt, der die Nachricht an das empfangenden Endsystem oder die empfangenden Endsysteme. Auch Switches können miteinander über bidirektionale Kommunikationsverbindungen angeschlossen werden. In diesem Fall wird die entstehende Architektur als eine Multi-Hop-Architektur und die Leitungen zwischen zwei Switches als Multi-Hop-Leitung.

Kommunikationsverbindungen und Switches bilden gemeinsam einen Kommunikationskanal zwischen Endsystemen. Endsysteme können direkt miteinander über bidirektionale Kommunikationsverbindungen angeschlossen werden. Dadurch lässt sich in gewissen Konfigurationen schwer zwischen Endsystemen und Switches unterscheiden. Der Begriff „Gerät“ wird in der Regel zur Bezeichnung eines physischen Geräts verwendet, das entweder ein Endsystem oder ein Switch sein kann. Ob ein Gerät als Endsystem oder Switch betrachtet wird, hängt somit mehr von der Verwendungsart als vom physischen Erscheinungsbild ab.

### **Synchronie**

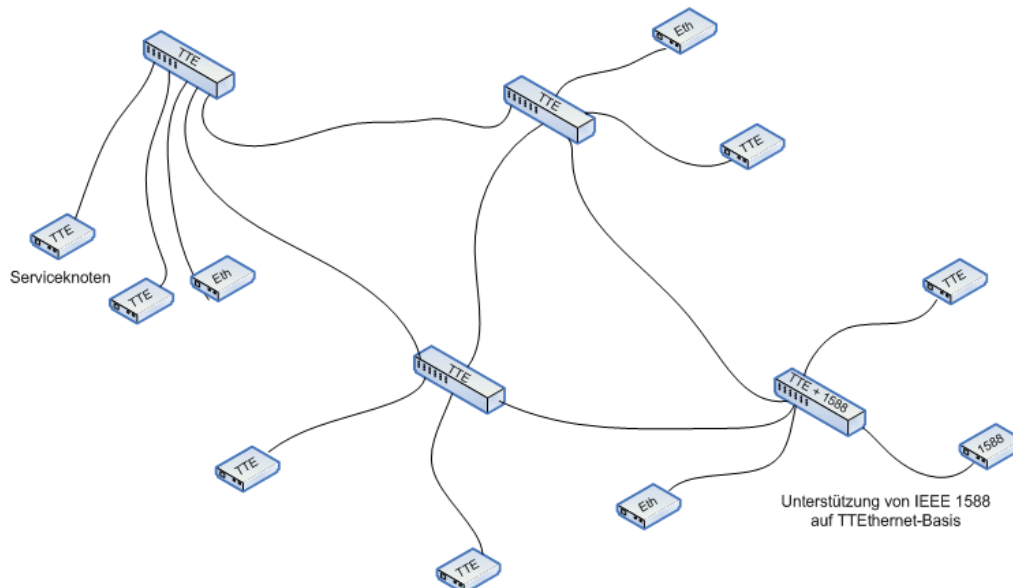
Der Knackpunkt bei zeitgesteuerten Systemen ist, dass Ereignisse nur zu genau vorbestimmten Zeitpunkten auftreten. So auch die Kommunikation der TT-Nachrichten. Systemweit wird schon beim Design festgelegt, wann welche TT-Nachrichten von welchen Teilnehmern ausgesandt werden und wer diese empfangen soll. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass das Netzwerk bei den kritischen TT-Nachrichten kollisionsfrei (im Sinne von Staus in den Switches) arbeitet, und der Empfänger kann laufend die Qualität

## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

Seite 10

des deterministischen Systems überprüfen, wenn z.B. Nachrichten nicht zum vorbestimmten Zeitpunkt oder überhaupt nicht ankommen. Unter anderem aus diesem Grund ist TTEthernet auch für Anwendung der höchsten Sicherheitsklasse geeignet.

Das Austauschen von TT-Nachrichten steht und fällt mit der Synchronität aller kritischen Teilnehmer. In TTEthernet werden laufend TTprotocol-Nachrichten ausgetauscht um die in den Endgeräten und Switches verteilten Uhren im Gleichlauf zu halten. Bei TTEthernet setzt man auf ein redundantes, hierarchisches Master-Slave-Verfahren in welchem eine verteilte, fehlertolerante Mehrheit von Master-Knoten und -Switches die Zeit im System vorgibt. Dies garantiert einerseits eine hohe Ausfallsicherheit und andererseits eine hohe Qualität der Synchronisation. Das Verfahren ist einzigartig bei TTEthernet und kann mit anderen Mechanismen, wie IEEE 1588 gekoppelt werden (siehe Abbildung 5).



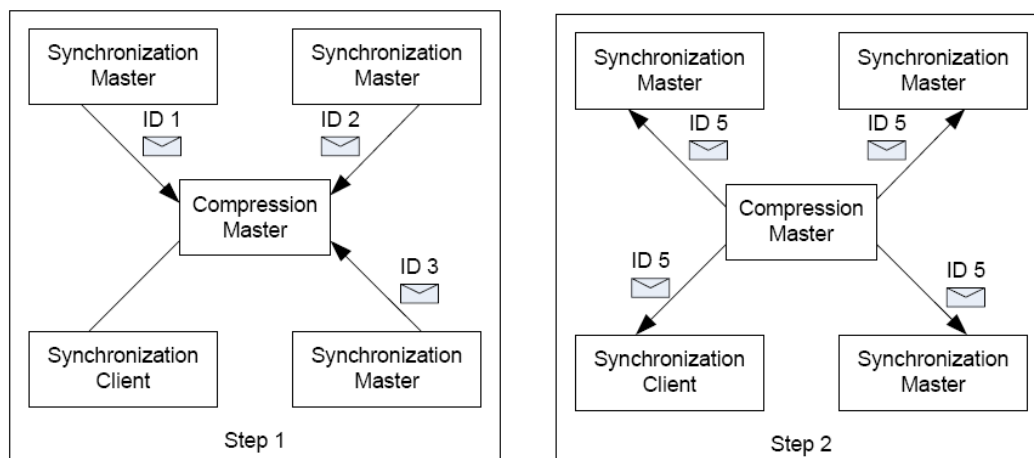
**Abb. 5: TTEthernet erlaubt flexible, auch redundant Netzwerktopologien und die Synchronisation mit Drittsystemen wie IEEE 1588**

IEEE 1588 spezifiziert ein Synchronisationsprotokoll für Ethernet. Die globale Zeitbasis von TTEthernet kann auch zur Synchronisation von reinen IEEE 1588-Clients eingesetzt werden. Zu diesem Zweck lässt sich eine zusätzliche Funktion auf einem TTEthernet-Gerät implementieren, die IEEE 1588 Uhrensynchronisationsblocks erzeugt. TTEthernet stellt Mittel zum Ausgleich von Zeitverzögerungen innerhalb eines TTEthernet-Netzwerks bereit. Außerhalb eines TTEthernet-Netzwerks, d.h. in einem reinen IEEE 1588-Netzwerk, können die Uhrensynchronisationsnachrichten wie reine IEEE 1588-Uhrensynchronisationsnachrichten behandelt werden.

## Synchronisationsansatz

TTEthernet verfolgt einen zweistufigen Synchronisationsansatz. Im ersten Schritt schicken die Synchronisationsmaster Protokollsteuerblocks an die Kompressionsmaster. Anschließend berechnen die Kompressionsmaster einen Mittelwert aus den relativen Ankunftszeiten der Protokollsteuerblocks und schicken einen neuen Protokollsteuerblock im zweiten Schritt. Dieser neue Protokollsteuerblock wird dann auch an die Synchronisationsclients geschickt.

Die Anforderungen an die Systemarchitektur bestimmen, welche Geräte als Synchronisationsmaster, Synchronisationsclients und Kompressionsmaster konfiguriert werden. Endsysteme können als Synchronisationsmaster und Switches als Kompressionsmaster konfiguriert werden. Ebenso sind Systemkonfigurationen möglich, in denen die Endsysteme als Kompressionsmaster und die Switches als Synchronisationsmaster konfiguriert werden. Switches und Endsysteme, die weder als Synchronisationsmaster noch als Kompressionsmaster konfiguriert sind, werden als Synchronisationsclients konfiguriert (siehe Abbildung 6).



**Abb. 6: TTEthernet verfolgt einen zweistufigen Synchronisationsansatz**

## Synchronisationstopologie

Bei TTEthernet werden vier verschiedenen Schichten in der Synchronisationstopologie unterschieden. Auf der untersten Ebene befindet sich die Geräteschicht, die Synchronisationsmaster, Synchronisationsclients und Kompressionsmaster beinhaltet. Die Cluster-Schicht fasst die Geräte mit derselben Synchronisationspriorität und derselben Synchronisationsdomäne zu einem einzigen Cluster zusammen. Die Multi-Cluster-Schicht fasst mehrere Cluster mit verschiedenen Synchronisationsprioritäten, aber derselben Synchronisationsdomäne zusammen. Auf der obersten Ebene ist die Netzwerkschicht, die viele Cluster (möglicherweise Multi-Clusters) mit verschiedenen Synchronisationsprioritäten und verschiedenen Synchronisationsdomänen zusammenfasst (siehe Abbildung 7).

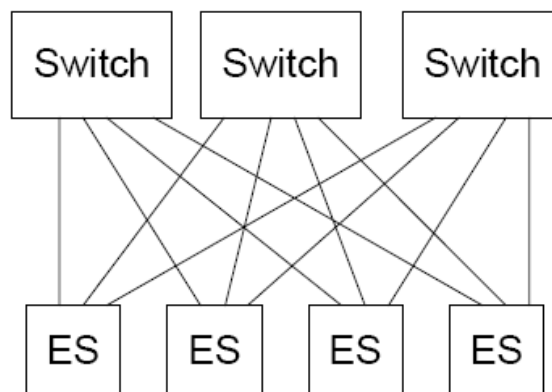
## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

Network Level	y Synchronization Domains, (y,z) Synchronization Priorities
Multi-Cluster Level	One Synchronization Domain, x Synchronization Priorities
Cluster Level	One Synchronization Domain, One Synchronization Priority
Device Level	Synchronization Masters, Synchronization Clients, Compression Masters

**Abb. 7: Die vier Schichten der Synchronisationstopologie von TTEthernet**

TTEthernet spezifiziert das Konzept eines Clusters. Ein TTEthernet-Cluster ist eine Gruppe von Endsystemen und Switches, die dieselbe Synchronisationspriorität und dieselbe Synchronisationsdomäne haben. TTEthernet-Clusters könnten in großen TTEthernet-Netzwerken eingesetzt werden, in denen verschiedene Cluster getrennt voneinander und im Master-Slave-Verfahren betrieben werden sollen, sowie ein hoch prioritärer Cluster mit einem Netzwerk verbunden oder eingeschaltet wird.

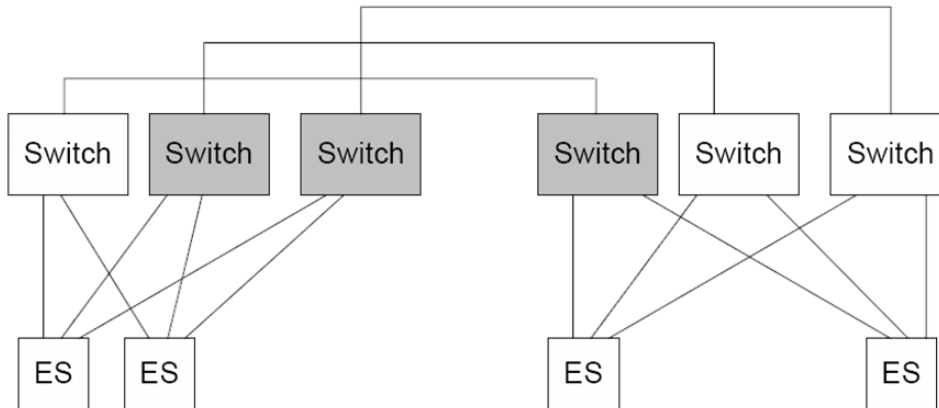
Ein einfacher TTEthernet-Cluster umfasst mehrere Endsysteme, die über optional redundante Kommunikationskanäle miteinander verbunden sind, wobei jeder Kommunikationskanal aus einem einzigen Switch besteht (siehe Abbildung 8). In einem kaskadierender TTEthernet-Cluster besteht jeder Kommunikationskanal aus mehr als einem Switch (siehe Abbildung 9).



**Abb. 8: Ein einfacher TTEthernet-Cluster mit drei redundanten Kanälen**

## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

Seite 13



**Abb. 9: Ein kaskadierender TTEthernet-Cluster mit drei redundanten Kanälen**

TTEthernet spezifiziert verschiedene Synchronisationsprioritäten. In einem Multi-Cluster-System erfolgt die Synchronisation nach dem Master-Slave-Verfahren, wobei die Geräte entsprechend der höchsten Synchronisationspriorität synchronisiert werden. Darüber hinaus spezifiziert TTEthernet verschiedene Synchronisationsdomänen. Eine Synchronisationsdomäne umfasst eine Gruppe von TTEthernet-Cluster, die nicht miteinander synchronisiert werden. Dennoch lässt sich der Datenfluss zwischen zwei TTEthernet-Cluster in verschiedenen Synchronisationsdomänen mittels RC- und BE-Nachrichten bewerkstelligen.

### **Variable Implementierung**

TTEthernet-Anbindungen für Endgeräte können je nach Anforderung an die zeitliche Qualität, Sicherheit oder Fehlertoleranz in Hardware oder Software realisiert werden. Es ist jederzeit möglich an ein TTEthernet-System auch herkömmliche Ethernet-Geräte anzuschließen, ohne das vorausberechnete Verhalten zu beeinflussen. Es könnte höchstens passieren, dass für dieses zusätzliche Gerät keine Bandbreite mehr zur Verfügung steht.

Auch Standard PCs können Teilnehmer eines TTEthernet-Systems sein. Folgende Szenarien sind möglich:

- Ein PC mit herkömmlicher Network Interface Card (NIC) kann BE-Nachrichten senden und empfangen. Mit geeigneter Software kann der PC auch TT- und RC-Nachrichten empfangen und auswerten.
- Ein PC mit herkömmlicher NIC und einem TTEthernet-Stack ermöglicht als Software-based End System (SES) den Empfang und den Versand von TT-, RC- und BE-Nachrichten. Die zeitliche Präzision ist durch die PC Software eingeschränkt.
- Ein PC mit spezieller TTEthernet NIC kann TT-, RC- und BE-Nachrichten mit höchster zeitlicher Präzision senden und empfangen.

Bei nicht-PC-basierenden Embedded Systemen kann TTEthernet ebenfalls entweder Stack-basierend auf Standard Ethernet Hardware oder mittels dediziertem Hardware Controller realisiert werden.

---

## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

---

Seite 14

Die Kompatibilität von TTEthernet mit dem Ethernet-Standard bedingt eine große Freiheit bei der Implementierung, zumal in TTEthernet nur Ethernet-Nachrichten eingesetzt werden. Es gibt jedoch eine Wechselwirkung zwischen der Implementierung und der Zeitgüte von TTEthernet. Ein TTEthernet-Protokoll-Stack, der auf einem Standard-PC mit Standard-NICs implementiert ist, kann eine Genauigkeit in der Größenordnung von hundert Mikrosekunden erzielen. Im Gegensatz dazu kommt eine Implementierung in dedizierter Hardware auf eine Genauigkeit von bis zu 10 Mikrosekunden und darunter. Dennoch ist die Zeitgüte standardisierter Ethernet-Controller für die meisten Echtzeit-Prozesse ausreichend. In beiden Fällen können die deterministischen Eigenschaften der zeitgesteuerten Systeme aufrecht erhalten bleiben.

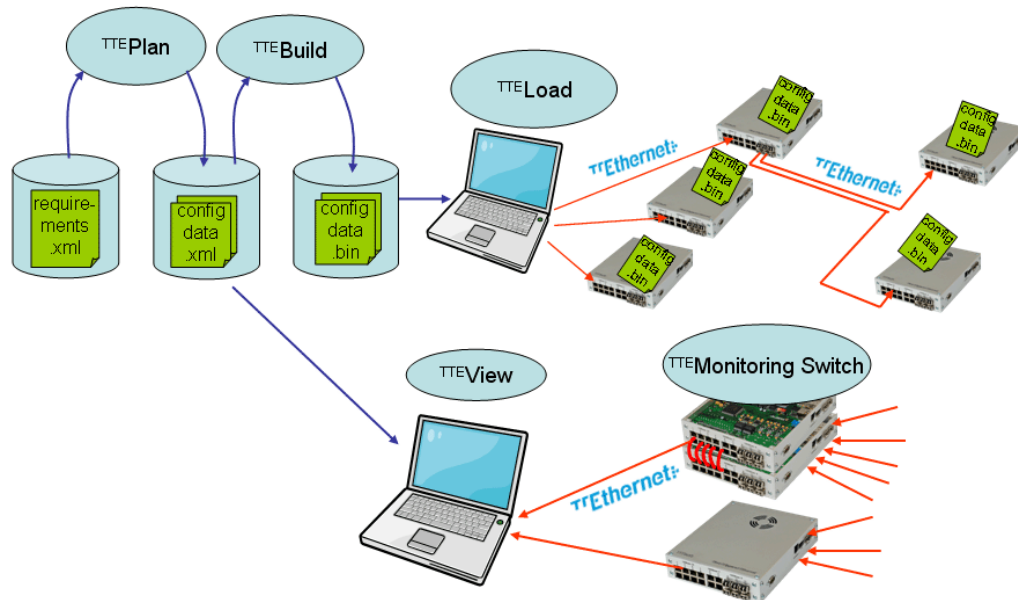
### **Verfügbare Produkte**

<sup>TT</sup>Evaluation Systems sind für Lösungen mit 100 Mbit/s und 1 Gbit/s verfügbar. Damit lassen sich die TTEthernet-Merkmale prüfen und verteilte Echtzeitapplikationen entwickeln. Die <sup>TT</sup>ETools sind im Lieferumfang der Evaluierungssysteme enthalten, damit der zeitgesteuerte Schedule erstellt und adaptiert werden kann.

Diese Werkzeuge decken den gesamten Lebenszyklus des Netzwerks ab. Automatische und manuelle Modellierungswerkzeuge erlauben die intuitive Auslegung des Systems in Bezug auf Zeitverhalten, Netzwerk und Topologie. <sup>TT</sup>EPlan und <sup>TT</sup>EBuild bilden aus den Vorgaben für die Kommunikation entsprechende Konfigurationsdaten, die mit <sup>TT</sup>ELoad in die beteiligten Geräte geladen werden. Die Werkzeuge sind in das offene Eclipse-Framework als Plug-in integrierbar. Mittels <sup>TT</sup>EMonitoring-Switches und <sup>TT</sup>EView kann der Netzwerkverkehr online und offline dargestellt werden. <sup>TT</sup>EVerify überprüft die Korrektheit und Konsistenz eines entworfenen Systems samt Zeitverhalten von TT- und RC-Nachrichten und generiert detaillierte Reports für die Abnahme eines Systems nach Anwendungsvorschriften wie z.B. DO-178B in der Luftfahrt (siehe Abbildung 10). Offene XML-Datenaustauschformate ermöglichen die einfache und nahtlose Integration mit Werkzeugen von Drittherstellern.

## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

Seite 15



**Abb. 10: Die TTEthernet-Tool-Chain beinhaltet Werkzeuge für jede Phase des Lebenszyklus eines Netzwerks.**

Ein TTEthernet-System lässt sich mit einem der folgenden zwei Modelle des <sup>TTE</sup>Development Switches definieren und entwickeln: entweder das eine mit 1 GBit/s und 2 oder mehr Kanälen oder das andere mit 100 MBit/s und 1 Kanal. Der <sup>TTE</sup>Monitoring Switch erlaubt die Überwachung der Datenströme. Das <sup>TTE</sup>Monitoring System unterstützt als Testaufbau im Labor die Aufzeichnung von bis zu 30 Minuten Datenfluss mit 1 GBit/s.

Für die TTEthernet-Variante mit 1 Gbit/s sind Netzwerkkarten verfügbar. Als Schnittstellen werden die Steckmodule PMC und PCI Express unterstützt. Für die TTEthernet-Variante mit 100 MBit/s gibt es software-basierte Clients.

### **Standardisierungsbestrebungen**

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt plant SAE AS-2D die Standardisierung von TTEthernet sowie die enge Zusammenarbeit mit anderen Standardisierungsgremien unterschiedlicher Industrien (z.B. ISO, SAE J, IEEE und andere) bis 2012.

### **Fazit**

TTEthernet öffnet erstmalig die zeitgesteuerte Kommunikation über Ethernet-Netzwerken in allen Anwendungsbereichen. Von klassischen Web-Diensten bis zu zeit- und sicherheitskritischen Steuerungssystemen in Flugzeugen stellt das Netzwerk alle dafür notwendigen Dienste zur Verfügung. Selbst bestehende Netzwerke können mittels TTEthernet-fähige Switches und Endgeräte Schritt für Schritt



---

## Skalierbare Echtzeit-Ethernet-Plattform

---

Seite 16

erweitert werden, ohne dass an den bestehenden Anwendungen und Endgeräten Änderungen vorgenommen werden müssen. Die Reduktion der systemweiten Netzwerktechnologie auf die weltweit etablierten und bewährten Ethernet-Standards eröffnet Einsparungspotentiale, die im heutigen Wettbewerb den Vorsprung sichern helfen. TTEthernet hat die erste Bewährungsprobe in extrem anspruchsvollen Luftfahrt- und Automobilapplikationen bestanden und breitet sich sukzessive in vollkommen neue Anwendungsbereiche aus.

### Kontakt

TTTech Computertechnik AG  
Schönbrunner Straße 7  
A-1040 Wien, Österreich  
Tel.: +43 1 585 34 34-0  
Fax: +43 1 585 34 34-90  
E-mail: [office@tttech.com](mailto:office@tttech.com)  
Web: [www.tttech.com](http://www.tttech.com)