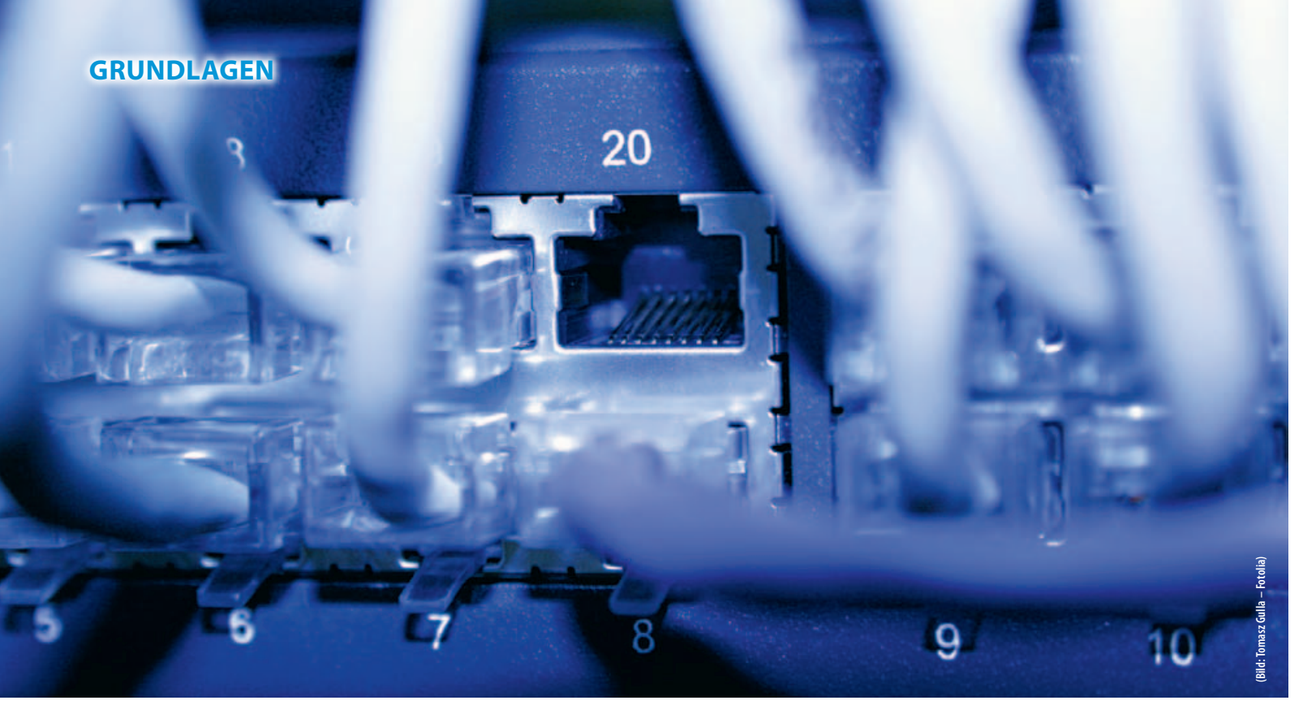

(Bild: Tomasz Gulla – Fotolia)

Echtzeit-Ethernet:

Protokoll-Reigen

Wann darf man Ethernet noch Ethernet nennen? Das ist gerade bei Echtzeit-Ethernet-Derivaten eine interessante Frage. Schon bei konventionellen, Switch-basierten Ethernet-Lösungen wird deutlich, dass eine querverkehrfreie Kommunikation und eine intelligent ausgewählte Switch-Technologie ein akzeptables Echtzeitverhalten wie bei konventionellen Feldbussen erreichen kann. Doch es geht noch mehr – ein Einblick in fortgeschrittene RT-Ethernet-Konzepte.

von Prof. Dr. Jörg Wollert

Aus dem vorhergehenden Beitrag zu Switched Ethernet [1] wurde deutlich, dass Laufzeitbeschränkungen aufgrund des Ethernet-Rahmens unausweichlich sind. Typische Automatisierungszyklen von 10 ms sind problemlos möglich; alles, was kürzere Zykluszeiten ermöglicht, muss erkämpft werden. Das wird schon durch die Betrachtung von minimaler und maximaler Laufzeit eines konventionellen Ethernet-Rahmens deutlich. Mit typisch 122 µs Laufzeit bei 100 Mbit/s, wie in **Bild 1** illustriert, wird eine natürliche Grenze aufgezeigt. Sollen High-Speed-Anwendungen mit Bus-Update-Zeiten im Bereich um die 100 µs erreicht werden, sind zusätzliche Anstrengungen notwendig. Eine Reduzierung der maximalen Telegrammgröße ist beispielsweise unausweichlich, zeigt aber auch das Potenzial auf. Ein minimaler Telegrammrahmen von 64 Byte Länge belegt nur für gut 6 µs den Bus und zeigt damit die untere Grenze eines 100-Mbit/s-Netzwerks auf.

Funktionsweise Echtzeit-Ethernet

Eine konventionelle Internet-Kommunikation über Netzwerkadapter mit TCP/IP-Kommunikation scheidet für High-Speed-Echtzeitnetzwerke kategorisch aus. Das wurde hinreichend diskutiert. Weiche Echtzeiteigenschaften im Sinn von 10 ms Zykluszeit können durch zwei mögliche Strategien erreicht werden (**Bild 2**):

1. Unter Verwendung des verbindungslosen UDP-Protokolls könnte eine Echtzeiterweiterung als Anwendung auf dem Rechner erfolgen. Zwar sind hierdurch keine Laufzeitverbesserungen zu erreichen, aber zumindest bei einer querverkehrfreien Kommunikation kann in einem gewissen Maß Echtzeitverhalten erreicht werden. Ein typischer Vertreter dieser Gattung ist Modbus/TCP. Für harte Echtzeitanwendungen ist diese Strategie nicht hilfreich, aber gerade in der Gebäudeautomation oder der Prozessindustrie kann ein ausreichendes Betriebsverhalten mit Update-Zeiten besser als 200 ms bei einem Jitter von wenigen Millisekunden erreicht werden.

2. Ein klarer Trend geht heute in Richtung schlanker, IP-freier Echtzeitprotokolle oberhalb der Sicherungs-Schicht. Der Ethernet-Protokollrahmen erlaubt es, über den Ethertype zu bestimmen, welche höheren Protokolle oberhalb Schicht 2 angesprochen werden. IP hat beispielsweise den Ethertype 0x0800, ein VLAN-Telegramm die 0x8100; bei den Echtzeittelegrammen hat heute nahezu jeder Anbieter von Echtzeitlösungen seinen eigenen Ethertype, der dann auch in die eigene Automatisierungswelt verzweigt. Dieses Verfahren wird von nahezu allen Anbietern IP-kompatibler Echtzeit-Lösungen realisiert, z.B. auch von den Firmen Beckhoff bei Realtime-Ethernet (RTE – Ethertype 0x88A4), Siemens bei Profinet (CC-B 0x8892), B&R bei Powerlink (Ethertype 0x88AB) oder Sercos bei Sercos III (Ethertype 0x88CD). Der Vorteil ist offensichtlich, die kritischen Stack-Laufzeiten im TCP/IP-Protokollstapel können unmittelbar umgangen werden. Durch diese Maßnahmen sind in abgeschotteten Netzwerken oder in VLAN-Segmenten Zykluszeiten im Bereich von 10 ms sicher möglich.

Für alles, was eine bessere Performance aufweisen soll, sind zusätzliche Maßnahmen notwendig. Im Wesentlichen können zwei Strategien unterschieden werden.

3. Unter Beibehaltung der typischen Infrastruktur wird die Sicherungsschicht des Ethernet-Protokolls optimiert. Dieses kann in unterschiedlichen Ausprägungen erfolgen. Ein erster Schritt wäre, Treiber zu entwickeln, welche eine auf den Automatisierungsprozess zugeschnittene maximale Datenrahmenlänge aufweisen. Eine Reduktion um den Faktor 10 von 1500 auf 150 Byte würde tatsächlich fast 1/10 Telegrammdauer entsprechen, also gerade einmal knapp 13 µs. Darüber hinaus können spezifische latenzarme Switches mit Cut-Through-Technologie oder Hubs eine weitere Verbesserung des Betriebsverhaltens erreichen. Zykluszeiten um die 200 µs sind mit diesen Maßnahmen durchaus realistisch zu erreichen. Geräte dieser Kategorie können noch kompatibel zu konventioneller Ethernet-Infrastruktur sein.

4. Sollen weitere Optimierungen erfolgen und Zykluszeiten im zweistelligen Mikrosekundenbereich erreicht werden, sind spezialisierte Lösungen mit eigener Hardware die geeignete Wahl. Hierbei handelt es sich in der Regel um FPGAs oder ASICs, die in Form eines Bitstream-Prozesses den Ethernet-Protokollrahmen bearbeiten. So sind mit geringster Latenz die kurzen Reaktionszeiten zu erreichen. In der Regel verzichten optimierte Systeme auf Infrastrukturkomponenten wie Switches oder Hubs, die zu einer zusätzlichen Zeitverzögerung beitragen würden. Ein prominenter Vertreter dieser Gattung ist EtherCAT der Firma Beckhoff. Hier benutzt nur die Master-Anschaltung eine Standard-Ethernet-Schnittstelle. Die Slaves bearbeiten ausschließlich den Bitstream. Auch Profinet in der Conformance Class C (IRT) nutzt einen Kommunikationsprozessor, der spezifische Echtzeit-Ethernet-Funktionen bereitstellt.

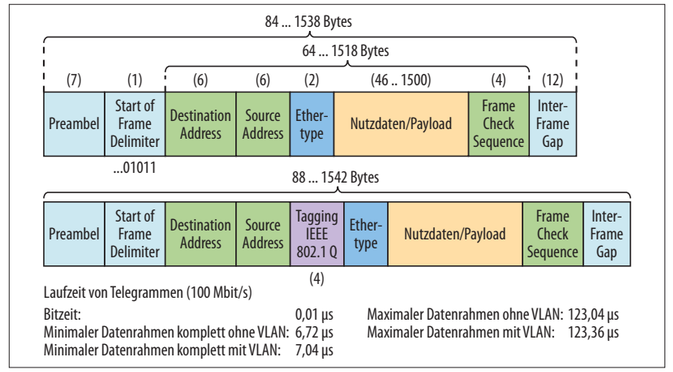

Bild 1: Aufbau und Laufzeit von Ethernet-Telegrammen.

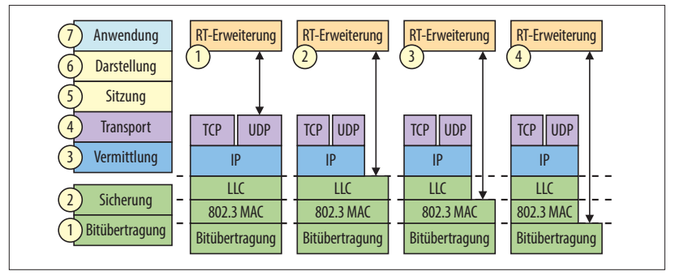

Bild 2: Strategien für Echtzeit-Ethernet.

RTC	Einsatz	Reaktionszeit
1	Menschliche Überwachungsfunktion	100 ms
2	normale Automatisierungsfunktion	<10 ms
3	Motion-Control-Anwendungen	<1 ms Jitter <1 µs

Tabelle 1: IEC-61784-2-Echtzeitklassen

Um diesen verschiedenen Ausprägungen gerecht zu werden, werden auch innerhalb der internationalen Feldbusnorm IEC 61784-2 unterschiedliche Kategorien von Echtzeitklassen definiert, wie sie aus **Tabelle 1** ersichtlich sind. Um die hier angepeilte Echtzeitklasse RTC 3 zu erreichen, kommen nur Systeme der Kategorie 3 und im Besonderen der Kategorie 4 in Frage.

Die vorhergehenden Ausführungen machen deutlich, dass hier nicht mehr von „dem" Ethernet gesprochen werden kann – ein Grund, sich mit den detaillierten Funktionsweisen der Bussysteme auseinanderzusetzen, um die Leistungsfähigkeit der führenden Echtzeit-Ethernet-Derivate aus neutraler Sicht zu bewerten. Da die Anwendungsfälle 1 und 2 bereits in einem vorhergehenden Artikel behandelt worden sind, kann man sich hier auf die wirklichen High-Speed-Netzwerke der Echtzeitkategorie 3 beschränken. Neben den hier detaillierter erläuterten Bussystemen Powerlink, EtherCAT und Profinet haben Sercos III im europäischen Umfeld, aber auch Ethernet IP für den US-amerikanischen Markt und CC-Link IE für den asiatischen bzw. japanischen Markt eine gewisse Dominanz erreicht.

Powerlink

Die österreichische Firma B&R (Bernecker & Rainer Industrie Elektronik) ist der erste Anbieter von optimierter Ethernet-Technologie für High-Speed-Ethernet-Lösungen. Im Herbst 2001 wurde Powerlink V1 der Öffentlichkeit vorgestellt. 2002 erfolgte die Offenlegung der Spezifikation und 2003 wurde der Standard in der EPSG (Ethernet Powerlink Standardization Group), einer Hersteller-offenen Organisation, der Allgemeinheit verfügbar gemacht. Powerlink der ersten Generation nutzte konventionelle Ethernet-Anschaltungen mit einem optimierten Schicht-2-Protokollstapel, einem überlagerten Master-Slave-System und Hubs als Sternkoppler

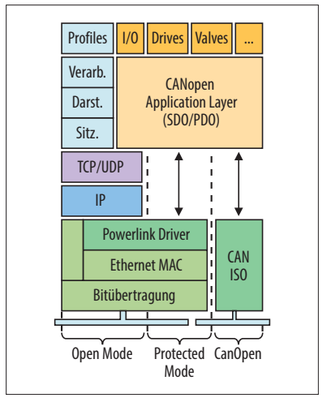

Bild 3: Powerlink-Protokollstapel – CANopen ist das Bindeglied zu anderen Systemwelten.

zur Optimierung der Durchlaufverzögerungen im Sternkoppler. Die Anschaltung der Slaves erfolgte in einer proprietären Weise; ebenfalls war die Kommunikation zu den Slaves B&R-spezifisch.

Powerlink-Protokolle

Mit Powerlink V2 und der Bemühung um eine Hersteller-offene Implementierung wurden zunehmend offene Standards in der Protokollumsetzung eingeführt. Hierzu gehört eine IEEE802.3-konforme Adressierung der Slaves, eine Integration der TCP/IP-Kommunikation für den Austausch asynchroner Daten und im Besonderen die Nutzung von CANopen als Anwendungs-Layer (**Bild 3**). Powerlink wird damit offen für die CANopen-Profile und bietet ein alternatives High-Speed-Kommunikationsmedium zu der konventionellen CAN-Anschaltung.

Powerlink bietet zwei unterschiedliche Betriebsmodi. Im „Protected Mode“ wird ein dediziertes Echtzeit-Netzwerk aufgebaut. Es erfolgt ein topologischer Sternaufbau, wobei die Synchronisation durch den Master erfolgt. Das System bildet eine mechanische Einheit, wobei Zykluszeiten kleiner 1 ms erreichbar sind.

Im sogenannten „Open Mode“ ist keine Segmentierung notwendig. Sehr wohl erfolgt aber eine Synchronisation der Teilnehmer über eine konventionelle IEEE-1588-Infrastruktur. Die erreichbaren Performance-Werte sind unterhalb des Protected Mode angesiedelt, lassen aber mit entsprechenden RT-Gateways eine durchgängige Kommunikation über ein ausgedehntes heterogenes Netzwerk zu.

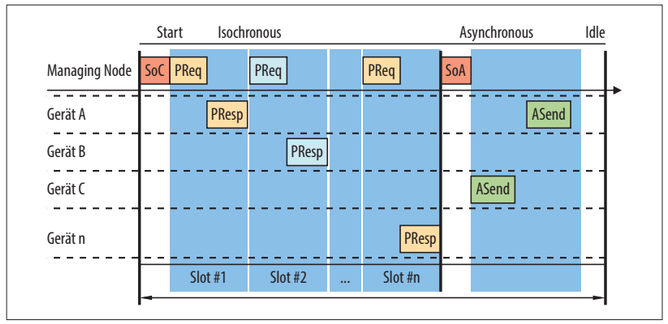

Bild 4: Powerlink nutzt Synchronisations-Broadcasts und Slave Polling.

Powerlink-Kommunikation

Ein Powerlink-Netzwerk wird durch einen Master, den sogenannten Managing Node, arbitriert. Ein Kommunikationszyklus besteht aus einem isochronen und einem asynchronen Abschnitt (**Bild 4**). Im isochronen Abschnitt erfolgt eine exakt während des Engineering determinierte Echtzeitkommunikation. Der Zyklus wird mit einem Synchronisations-Broadcast gestartet. Aufgrund der extrem kurzen Hub-Durchleitezeiten (typ. 500 ns) trifft die Nachricht quasi gleichzeitig bei allen Slaves an. Danach pollt der Master die Slaves. Nach der Echtzeitkommunikation wird mit einem SoA-Broadcast (Start of Asynchronous Communication) die asynchrone Kommunikationsphase eingeleitet. Hier kann eine konventionelle IP-Kommunikation mit den Feldgeräten durchgeführt werden. In der Echtzeitphase ist die Hub-Durchleitezeit und der Interframe Gap – also der kleinste Abstand zwischen zwei Ethernet-Paketen – von 0,96 µs bei 100 Mbit/s oder 96 ns für Gigabit Ethernet zeitbestimmend.

Zur weiteren Optimierung wurde 2012 durch die EPSG das Poll Response Chaining eingeführt (**Bild 5**), bei dem der Master alle seine Daten per Poll Response Broadcast auf den Bus legt und die Slaves in der festgelegten Reihenfolge antworten. Bei vielen Teilnehmern ist hierbei eine signifikante Geschwindigkeitszunahme zu erreichen.

Powerlink Performance

Eines der wichtigsten Argumente für Ethernet-basierte Systeme ist die Steigerung der Performance und die Durchgängigkeit durch Unterstützung der TCP/IP-Protokollfamilie. Betrachtet man die Benchmarks der einzelnen RT-Ethernet-Hersteller, dann kann man erstaunliche Dinge feststellen. Jede Nutzerorganisation findet eine Konstellation, bei der ihr Bussystem dem des Wettbewerbers überlegen ist. Doch häufig werden Äpfel mit Birnen verglichen. Insgesamt kann man festhalten, dass für jedes RT-Ethernet-System Anwendungsfälle gefunden werden, bei dem es besonders geeignet oder besonders ungeeignet ist. Hier kann dem Anwender nur empfohlen werden, ganz genau hinzuschauen, um dann das System zu verwenden, welches für die spezifische Problemstellung bzw. Systemlösung geeignet ist.

Powerlink ist dann gut geeignet, wenn mittlere Datenmengen (knapp 100 Byte) an hierarchisch flach gegliederte Automatisierungssysteme verteilt werden. Daisy-Chaining ist für Powerlink-Systeme immer ungeeignet; Sternstrukturen unterstützen das positive Betriebsverhalten. Da immer ein Request-Response-Paar mit jeweils einem eigenen Ethernet Frame für die Kommunikation pro Slave erforderlich ist, ist der Overhead bei der Übertragung weniger Bytes extrem ungünstig. Bei der Übertragung von typisch 100 Byte je Slave kann ein günstiges Betriebsverhalten attestiert werden. Bei sehr wenigen Teilnehmern ist eine Zykluszeit von 200 µs mit einem Jitter kleiner 1 µs auch in praktischen Anwendungen möglich. Als Faustformel benötigt ein Powerlink-System etwa 500 µs pro 10 Slaves – quasi unabhängig, ob 1 oder 100 Byte transportiert werden.

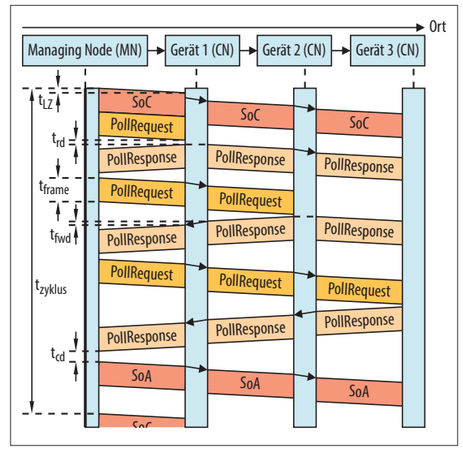

Bild 5: Powerlink nutzt ein Master Polling, wobei der Ethernet Frame gerade bei kleinen Nutzdatenmengen für einen großen Overhead sorgt.

EtherCAT

Beckhoff Automation GmbH ist der zweite Pionier im Bereich der Echtzeit-Ethernet-Realisierung. Während B&R weitgehend konventionelle Ethernet-Technologie einsetzt, geht Beckhoff 2003 einen revolutionären Weg, indem der Ethernet-Telegrammrahmen von den Slaves in einem Bitstream-Prozess bearbeitet wird. Dieses Summenrahmenprotokoll vermeidet den üblichen großen Overhead bei kleinen Nutzdatenmengen und schafft ein extrem performantes System, das gerade kleinere Datenmengen extrem schnell und effizient übertragen kann. Durch die hohe Effizienz kann auf den bei Automatisierungssystemen üblichen Backplane-Bus verzichtet werden, da jeder Teilnehmer, auch die kleinste IO-Klemme, ein Busteilnehmer sein kann. Auch EtherCAT ist ein Hersteller-offener Standard, der die Spezifikation für die Mitglieder der ETG (EtherCAT Technology Group) zur Verfügung stellt. Mit mehr als 2600 Mitgliedern ist die ETG die größte Feldbusorganisation weltweit.

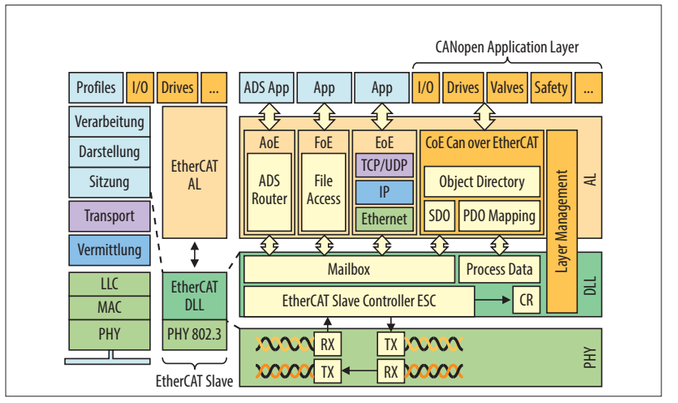

Bild 6: Beckhoff-Slaves haben einen sehr schlanken Protokoll-Stack, der quasi beliebige andere Protokolle tunneln kann.

EtherCAT-Protokolle

Beckhoff bevorzugt aus vielen Gründen einen stark zentralen Automatisierungsansatz mit einem leistungsstarken Master und vergleichsweise dummen Slaves. Das zeigt sich auch in der Protokollimplementierung. Beckhoff-Master sind in der Regel PC-basierte Embedded-Systeme mit einem Windows-Betriebssystem. Die Schnittstelle nach außen bildet dann auch alle PC-verfügbaren Protokolle ab. Ein Beckhoff-Master ist damit auch immer ein EtherCAT-Ethernet Gateway. Beckhoff-intern steht für den Datenaustausch das Bussystem-übergreifende ADS-System über TwinCat als Middleware zur Verfügung.

Auf der EtherCAT-Seite hat Beckhoff zwei wesentliche Kommunikationsmechanismen eingeführt. Für den schlanken Echtzeit-Datenaustausch (**Bild 6**) wird über den EtherCAT Slave Controller eine CANopen-Kommunikation initiiert. Über das sogenannte CoE (CAN over EtherCAT) kann eine PDO/SDO-Kommunikation durchgeführt werden, wobei durch Beckhoff auch die einschlägigen CANopen-Profile unterstützt wer-

Intensivseminar Industriekommunikation 4.0

Prof. Dr.-Ing. Jörg Wollert

Mit dem Übergang der industriellen Produktion zu „Industrie 4.0“ ändern sich die Anforderungen an industrielle Kommunikation. Die in heutiger Technik üblichen Lösungen mit Feldbussen reichen nicht mehr aus; vielmehr zieht die Forderung nach einer universellen Vernetzung aller Geräte u.U. den Übergang zu anderen Verfahren und Standards der Kommunikation nach sich.
Wer heute ein Projekt beginnt, eine Steuerung entwickelt oder ein industrielles Gerät entwirft, sollte diese zukünftigen Anforderungen schon jetzt berücksichtigen.
Was sich ändern wird, präsentiert der bekannte Elektronik-Autor Prof. Dr.-Ing. Jörg Wollert in einem zweitägigen Intensivseminar, bei dem u.a. folgende Fragen behandelt werden:

- ➜ Kann ich meinen etablierten Feldbus weiterverwenden?
- ➜ Wie erreiche ich eine durchgängige Kommunikation von der Feld- bis zur Unternehmensebene?
- ➜ Wie unterscheiden sich die verschiedenen Echtzeit-Ethernet-Systeme?
- ➜ Alles in die Cloud?
- ➜ Wie kann ich meine Anlage gegen Cyber-Angriffe absichern?

Was: Intensivseminar Industriekommunikation 4.0
Wann: 11./12.02.2015
Wo: Haar bei München
Info: **www.training-for-professionals.de**

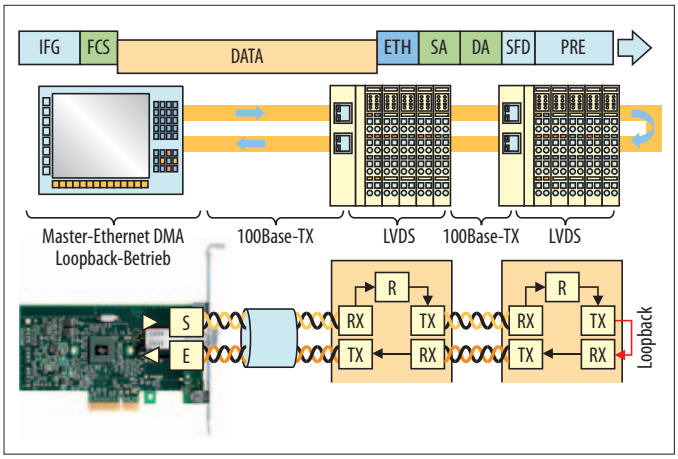

Bild 7: EtherCAT nutzt den Ethernet-Rahmen als Summenrahmen, der im Durchlauf bearbeitet wird.

den. Für den asynchronen Datenaustausch steht darüber hinaus ein Mailbox-System zur Verfügung, über das andere Protokolle wie z.B. Ethernet (EoE – Ethernet over EtherCAT) oder Filetransfer (FoE – File Access over EtherCAT) getunnelt werden können. EtherCAT-Geräte können so quasi jedes beliebige Protokoll transportieren und als transparentes Gateway in den (Beckhoff-) PC genutzt werden.

EtherCAT-Kommunikation

Das Besondere an der EtherCAT-Kommunikation ist die Verwendung des Ethernet-Protokollrahmens als Summenrahmen (**Bild 7**). Der Bus Master ist in der Regel auch der Steuerungs-Master, der das Prozessabbild der Steuerung hält. Ein EtherCAT-Telegramm ist ein Stück Prozessabbild, welches im Loopback-Betrieb vom Master an sich selbst gesendet wird (Ethernet Destination = Source!). Die Master-Anschaltung beschränkt sich dann auch auf eine konventionelle, Polling-fähige Ethernet-Karte; die Slave-Anschaltung erfolgt durch ein spezifisches ASIC, welches von verschiedenen Herstellern angeboten wird.

Die Slaves wissen durch den Engineering-Vorgang, an welcher Stelle innerhalb des Telegramms ihre Eingangs- und Ausgangsdaten stehen, und können so quasi im Durchlauf das Lesen und Schreiben vornehmen. Da nur Bits gezählt werden müssen, ist kaum Rechenleistung erforderlich und es können auch sehr schlanke Slaves erstellt werden. Die Durchlaufverzögerung in einem EtherCAT-Slave-Knoten liegt bei weniger als 100 ns.

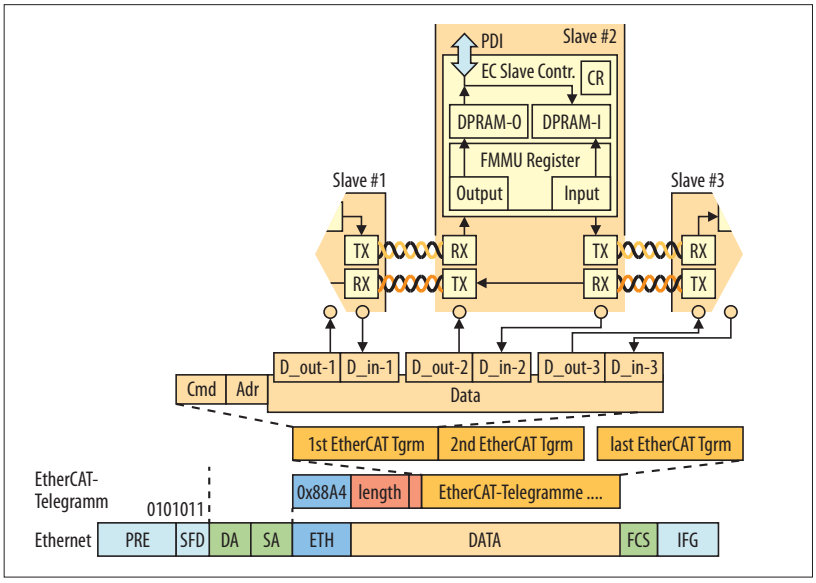

Bild 8: Die Slave-FMMU übernimmt die Zuordnung der Prozessdaten zum Slave.

Betrachtet man eine konventionelle Busanschaltung, so kann man bei einer genauen Analyse feststellen, dass die Kopiervorgänge von der Feldbuskarte in das Prozessabbild und zurück der Performance-bestimmende Faktor sind. Auch hier greift das EtherCAT-Protokoll an. Das Mapping der Prozessdaten der IO-Klemmen in das Prozessabbild erfolgt nicht im Master, sondern in den jeweiligen Slaves (**Bild 8**). Kernstück ist hierbei die sogenannte FMMU (Fieldbus Memory Management Unit), die für den Bitstream-Prozess im Slave verantwortlich ist und quasi on-the-fly die Prozessdaten austauscht (**Bild 9**). Der Master erhält dann schon das aufgefrischte Prozessabbild in der richtigen Zuordnung.

EtherCAT Performance

EtherCAT ist seit gut zehn Jahren Benchmark bei den Echtzeit-Ethernet-Derivaten. Die zuvor beschriebenen Mechanismen und der Verzicht auf eine Laufzeit-beeinflussende Infrastruktur sowie die effiziente Übertragung auch kleiner Datenmengen ermöglichen einen Datenaustausch, bei dem nicht mehr das Bussystem, sondern der Master der begrenzende Faktor ist. Bei einer für Beckhoff typischen PC-Architektur-basierten SPS sind Zykluszeiten von 50 µs selbst mit einem Intel-Atom-Prozessor möglich. Hochleistungs-CPUs können bei kleinen Datenmengen auch auf Zeiten kleiner 20 µs kommen. Für die praktische Anwendung bedeutet dies, dass 1000 digitale Werte verteilt auf 100 Knoten in etwa 30 µs gepollt werden können.

Als einziges deterministisches Bussystem ist EtherCAT damit in der Lage, 200 verteilte Analogwerte mit einer Sample-Rate von 20 kHz und mit 16 bit zu scannen. Mit der XFC- (Extreme Fast Control) Technologie, die exakte Zeitstempel und ein Oversampling ermöglicht, sind damit auch Abtastraten von

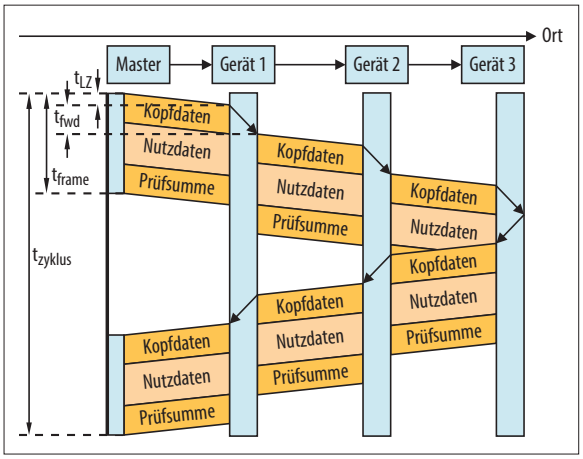

Bild 9: EtherCAT bearbeitet den Ethernet-Rahmen als Summenprotokoll „on-the-fly".

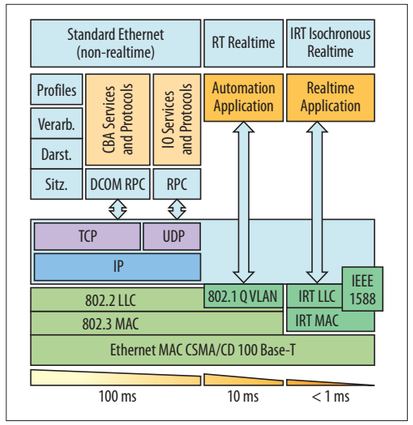

Bild 10: Profinet nutzt eine anwendungsangepasste dreistufige Echtzeitskalierung.

200 kHz realistisch, was EtherCAT auch für Messtechnikaufgaben prädestiniert. Da der EtherCAT-Bus selbsttaktend ist, sind auch alle Busteilnehmer bis auf wenige Nanosekunden genau synchronisiert. Zusätzliche zeitgebende Verfahren wie IEEE 1588 sind zwar möglich, aber nicht notwendig. Hierdurch sind auch hochpräzise Zeitmessungen und Synchronisationsaufgaben systembedingt möglich.

Die Domäne von EtherCAT ist ganz klar die zyklische Übertragung von Daten in kurzen Zykluszeiten. Verbunden mit einem leistungsstarken Master können sehr kurze Zykluszeiten realisiert werden.

Herausfordernd kann die EtherCAT-Kommunikation werden, wenn mehr als ein Ethernet-Datenrahmen in einem Zyklus für die Übertragung des Prozessabbilds oder des Querverkehrs (x over EtherCAT) notwendig ist. In diesem Fall addieren sich Interframe Gap und Overhead und die Performance bricht

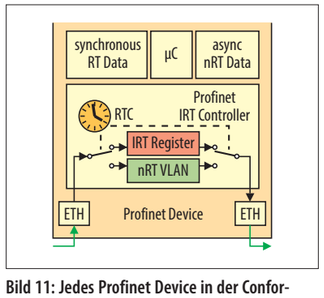

Bild 11: Jedes Profinet Device in der Conformance Class C hat einen integrierten Kommunikationsprozessor mit optimiertem Cut-Through Switch.

ein. Wie alle Bussysteme kann damit auch EtherCAT in einem ungünstigen Betriebsverhalten gefahren werden. Das ist jedoch bei einer geeigneten konstruktiven Planung problemlos vermeidbar.

Profinet

Profinet ist der gesetzte Nachfolger des Industriestandards Profibus. Durch den sich nach 2000 abzeichnende Trend zu Ethernet-basierten Feldbussen und den ersten erfolgreichen Industrieimplementierungen von B&R und Beckhoff wurde auch bei Siemens verstärkt an einer echtzeittauglichen Lösung auf der Basis des IEEE-802.3-Standards gearbeitet.

Ziel war auf der einen Seite die Entwicklung einer neuen durchgängigen Systematik für Automatisierungssysteme und auf der anderen Seite eine deutliche Steigerung der Performance etablierter Feldbussysteme, allen voran

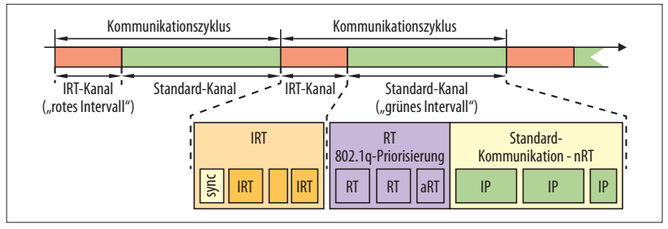

Bild 12: Profinet IRT hat einen priorisierten Kommunikationszyklus für alle Profinet-Ausprägungen.

Profibus. Mit CBA (Component Based Automation) wurde in einem ersten Schritt der Weg hin zu intelligenten verteilten Automatisierungskomponenten beschritten. Ein zweiter Schritt ist der effiziente Austausch von zyklischen Prozessdaten.

Profinet Conformance Classes

Aufgrund der gesammelten Erfahrungen der Wettbewerber und der sich neu stellenden Anforderungen hinsichtlich Internetfähigkeit von Protokollen und Datenaustausch hat sich Siemens zu einer dreistufigen Skalierung der Kommunikation entschlossen (**Bild 10**). Die Sicherungsschichten sind angepasst an die spezifischen Anforderungen innerhalb der Kommunikationsaufgaben. Eine Kompatibilität im Datenaustausch ist immer sichergestellt.

➜ Die Conformance Class A (CC-A) wird auch als Non-Realtime bezeichnet. Hier handelt es sich bei dem Kommunikationssystem ausschließlich um konventionelles Ethernet mit dem TCP/IP-Protokoll. Für die Kommunikation zu den Komponenten wird eine RPC-Aufrufschnittstelle implementiert; die Verwendung von Webschnittstellen für Gerätebeschreibungen und Administratoroberflächen ist Teil des Gesamtkonzepts. Auf die anfänglich präferierte DCOM-Technologie musste aufgrund der Änderung der Microsoft-Software-Welt verzichtet werden. Für einfache Visualisierungsanwendungen, Programmierung und Systemadministration ist diese Art der Kommunikation mehr als hinreichend und vor allem bewährt. Nichtdeterministische Zykluszeiten langsamer als 100 ms sind so mit diesem Standardmittel möglich.

➜ Um zumindest für die Automatisierungswelt vergleichbare Zykluszeiten vorzuhalten, ist die Conformance Class B (CC-B) oder auch Realtime Class implementiert. Auch die CC-B nutzt konventionelles Ethernet, reichert dieses aber mit fortschrittlichen Technologien an. Zur Optimierung der Performance in den Steuerungsrechnern und Devices wird die Automatisierungsanwendung unter Verzicht des TCP/IP-Protokollstapels direkt über einen eigenen Ethertype 0x8892 angesprochen. Darüber hinaus wird das Profinet-RT-Netzwerk durch einen konsequenten Einsatz von IEEE802.1q-Switches und die damit verbundene VLAN-Technologie querverkehrfrei gehalten. Allein durch diese Maßnahmen ist eine Zykluszeit von typisch 5 ms bis 10 ms bei einem Jitter von unter 10 % zu erreichen.

➜ High-Speed-Kommunikation im Sinn dieses Artikels ist erst ab Conformance Class C (CC-C), dem sogenannten Isochronous Realtime, möglich. Wie alle anderen Anbieter kommt auch Siemens nicht mehr an einer Hardware-Unterstützung vorbei. Durch optimierte Switch-Technologie, exakte Zeitsynchronisation über IEEE 1588 und leistungsstarke Kommunikationsprozessoren wird eine Kommunikation möglich, die Zykluszeiten in einem Vielfachen von 31,25 µs zulässt und weitgehend Jitter-frei ist.

Die Stärke der Profinet-Technologie ist die Durchgängigkeit des Engineering und des Betriebs der Kommunikationsgeräte aller Conformance-Klassen in einem Netzwerk. Verbunden mit Infrastrukturkomponenten wie Gateways und Proxies ermöglicht Profinet tatsächlich eine durchgängige Kommunikation über verschiedene Geräteklassen und Hierarchieebenen der Automatisierungspyramide.

Profinet-IRT-Kommunikation

Harte Echtzeit, also entsprechend der Echtzeitkategorie 3, kann bei Profinet nur in der Conformance Class C erreicht werden. Wie bei allen anderen Feldbusanbietern kann nicht auf einen Kommunikationsprozessor verzichtet werden. Aufgrund der Kompatibilität zu den anderen Conformance Classes wird jedoch ein etwas anderer Weg beschritten. Jedes IRT Device hat einen leistungsfähigen Kommunikationsprozessor und Switch-Funktionalität (**Bild 11**). Über IEEE-1588-Funktionalität sind alle IRT Devices synchronisiert. Die Echtzeituhr auf der Basis der IEEE-1588-Uhrzeit nimmt das Scheduling der Echtzeitdaten vor. Zu Zykluszeiten mit einem Vielfachen von 31,25 µs wird das IRT-Register bearbeitet (**Bild 12**); nach Durchlauf der Echtzeitdaten wird auf die VLAN-Switch-Register zur weiteren Prozessbearbeitung zugegriffen. Hierdurch arbeitet ein Profinet-IRT Device wie ein vorausschauender Cut-Through Switch.

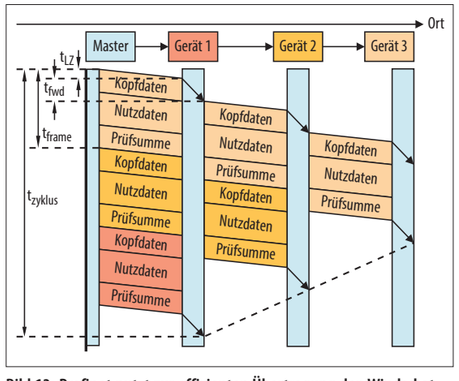

Bild 13: Profinet nutzt zur effizienten Übertragung den Windschatten-Effekt.

Der IRT-Kanal ist damit garantiert, die Bearbeitung der weiteren Telegramme, sowohl RT als auch konventionelles TCP/IP, ist der VLAN-Switch-Funktion überlassen. Es wird schnell deutlich, dass für kürzeste Zykluszeiten kaum Platz für zusätzliche Telegramme ist. Ein entsprechendes Engineering ist damit für High-Speed-Anwendungen notwendig.

Minimale Zykluszeit (MZ)	EtherCAT	Sercos III	Powerlink	Profinet IRT
Vom Hersteller definierte Mindest-Zykluszeit	12,5 µs	31,25 µs	200 µs	250 µs
Theoretische MZ bei 1 Knoten und 16 Byte Nutzdaten	8,2 µs	14,9 µs	43 µs	9,8 µs
Theoretische MZ bei 5 Knoten und 16 Byte Nutzdaten	15,9 µs	18,9 µs	173,1 µs	36,7 µs
Theoretische MZ bei 50 Knoten und 16 Byte Nutzdaten	118,5 µs	120,6 µs	2960 µs	339,1 µs
Theoretische MZ bei 5 Knoten und 100 Byte Nutzdaten	49,5 µs	51,6 µs	218,7 µs	58,3 µs

Tabelle 2: Minimale Zykluszeiten verschiedener RTC3-Echtzeit-Ethernet-Bussysteme.

Profinet Performance

Im Vergleich zu EtherCAT hat Profinet IRT einen größeren Overhead, da jeder Slave einen eigenen Ethernet-Rahmen erhält (**Bild 13**). Jedoch wird nicht auf eine Antwort gewartet, sondern der Master versendet alle Slave-Aufrufe als Burst und wartet auf die Antworten. Die minimale Zykluszeit wird sinnvollerweise mit 156,25 µs angegeben, da die Laufzeit der Ethernet Frames Berücksichtigung finden muss.

Vergleich

Echtzeit-Ethernet der Leistungsklasse 3 gibt es nur mit Hardware-Unterstützung. Erfreulich ist der tatsächlich erreichbare Speed-up im Vergleich zu den etablierten Feldbussystemen wie z.B. Profibus. Die Geschwindigkeitszuwächse der Ethernet-Derivate erreichen schnell den Faktor 10 bis 100 (**Tabelle 2**). Doch Geschwindigkeit ist nur ein Aspekt bei dem Einsatz von Ethernet. Das Thema Durchgängigkeit und Integration von IP ist ein weiterer Meilenstein. Hierbei unterscheiden sich die Strategien der Hersteller und Interessenvereinigungen wesentlich.

Während Beckhoff konsequent auf Determinismus und kürzeste Zykluszeiten Wert legt, steht bei Siemens Durchgängigkeit, Migrationsfähigkeit und Engineering im Vordergrund. Powerlink hat von allem etwas, bleibt aber in der Gesamt-Performance deutlich hinter den Marktführern zurück. Das spielt für viele Anwendungsfälle aber nur eine untergeordnete Rolle, da nicht in allen Bereichen Ultra-High Speed erforderlich ist. Auch zeigt sich bei der Betrachtung der theoretischen Performance-Werte, dass Profinet IRT gegenüber EtherCAT gerade bei großen Datenmengen aufholt. Wie oben beschrieben, kann man günstige oder ungünstige Szenarien finden, bei denen das eine oder andere Bussystem mehr oder weniger glücklich abschneidet. Insgesamt kann man festhalten, dass alle Systeme für hochpräzise Antriebstechnik hinreichende Performace-Werte aufweisen.

Im Bereich Messtechnik bleibt Beckhoff mit EtherCAT jedoch unangefochten an der Spitze der Leistungsskala. Kein anderes Bussystem kann aktuell kleine Datenmengen in kürzeren Zykluszeiten deterministisch übertragen. *mh*

Literatur

[1] *Wollert, J.F.*: Echtzeit Ethernet. *Elektronik embedded* 2014.

[2] *Wollert, J.F.*: Abschlussbericht UWIfac Ultrawideband Interface for Factory Automation. FKZ 1774X08, 04.2013 – Gefördert vom BMBF

[3] *Wollert, J.F.*: Ethernet in der Automation, Anwendungsmöglichkeiten, Trends, Optimierungspotentiale. Seminar für das VDI Wissensforum 20.-21.6.2013 Frankfurt/Main.

[4] *Gevatter u.a.* (Hrsg.): Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik. Springer-Verlag (2006), ISBN 3-540-21207-8 (Abschnitte Bussysteme/Echtzeitsysteme/Wireless S.475–653)

[5] ETG: Industrial Ethernet Technologies: Overview. 2014.

[6] EPSG: Industrial Ethernet Facts: Systemvergleich – die 5 wesentlichen Systeme. 2nd Edition 2013.