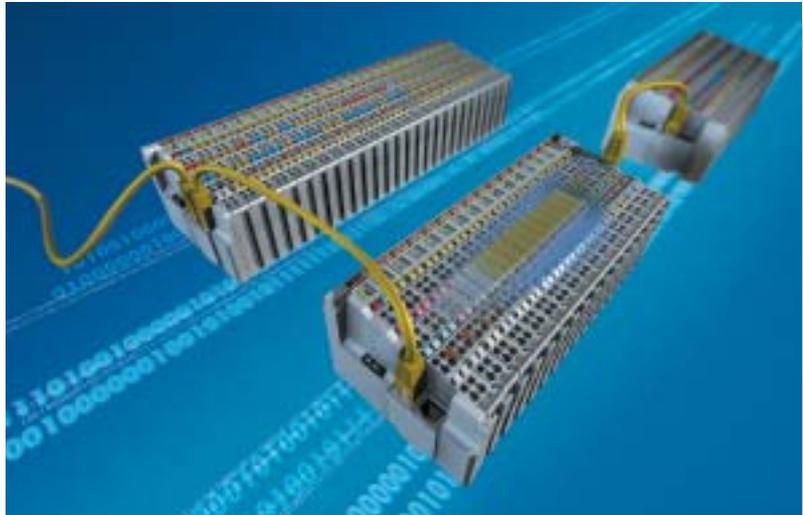


Echtzeit Ethernet

Performance-Maximum

In Hannover war es das Gesprächsthema unter den Automatisierern: Die Echtzeit-Ethernet-Lösung von Beckhoff. EtherCAT oder Ethernet for Control Automation Technology glänzt mit einfachster Verdrahtung, Offenheit und überragender Performance. Produktmanager Martin Rostan erklärt das Konzept.



Es gibt mehrere Ansätze, mit denen Ethernet echtzeitfähig gemacht werden soll: Einige setzen das Zugriffsverfahren CSMA/CD durch überlagerte Protokollschichten außer Kraft und ersetzen es durch ein Zeitscheibenverfahren oder Polling; andere Vorschläge sehen spezielle Switches vor, die Ethernet-Pakete zeitlich präzise kontrolliert verteilen. Diese Lösungen können zwar Datenpakete mehr oder weniger schnell und exakt zu den Ethernet-Knoten transportieren – die Zeiten, die für die Weiterleitung zu den daran angeschlossenen Ausgängen oder Antriebsreglern und für das Einlesen der Eingangsdaten benötigt werden, hängen jedoch stark von der Implementierung ab. Speziell bei modularen E/A-Systemen kommt hier meistens ein Sub-Bus hinzu, der zwar synchronisiert und schnell sein kann, jedoch immer kleine Kommunikationsverzögerungen bedeutet.

Die EtherCat-Technologie überwindet diese prinzipiellen Begrenzungen: Hier wird das Ethernet-Paket nicht mehr in jeder Anschaltung zunächst empfangen, dann interpretiert und die Prozessdaten weiterkopiert. Stattdessen entnimmt die neu entwickelte FMMU (Fieldbus Memory Management Unit) in jeder E/A-Klemme die für sie bestimmten Daten, während das Telegramm das Gerät bzw. das Remote-I/O durchläuft. Gleichzeitig werden die Ein-

gangsdaten im Durchlauf in das Telegramm eingefügt. Dadurch verzögert sich die Telegrammübertragung zum nächsten Knoten nur um wenige Nanosekunden.

Ethernet in jede Klemme – FMMU macht's möglich

Das Ethernet-Protokoll bleibt bis in die einzelne Klemme erhalten, der Sub-Bus entfällt. Lediglich die Übertragungsphysik wird im Koppel-Modul von Twisted Pair bzw. LWL auf die Pegel des innerhalb der Klemmenreihe verwendeten E-Busses gewandelt. Dessen Signalform eignet sich bis 10 m auch zur Übertragung auf verdrehter Zweidrahtleitung. Damit lässt sich die Klemmenreihe besonders kostengünstig verlängern – wobei der anschließende Wechsel auf Ethernet jederzeit möglich ist. Steuerungseitig ergänzt der TwinCat Y-Treiber für Ethernet die FMMU-Technologie. Dieser bindet sich transparent in das System ein, so dass er als betriebssystem-konformer Netzwerktreiber und zusätzlich als TwinCat-Feldbuskarte erscheint. Auf der Sendeseite sorgen die interne Priorisierung und Puffer dafür, dass Ethernet-Frames aus dem Echtzeitsystem immer dann eine freie Sendeleitung vorfinden, wenn sie an der Reihe sind. Die Ethernet-Frames des Betriebssystems werden erst in den Lücken verschickt, wenn entsprechend Zeit ist.

Empfangseitig überprüft das TwinCat I/O-System alle empfangenen Ethernet-Frames und filtert die echtzeit-relevanten heraus. Alle anderen Frames werden nach der Überprüfung außerhalb des Echtzeitkontextes an das Betriebssystem übergeben.

Für die Hardwareanschaltung in der Steuerung kommen handelsübliche Standard Netzwerk-Interface-Karten (NIC) zum Einsatz. Auf der gleichen Architektur basieren auch die von Beckhoff angebotenen Karten, die bis zu vier Ethernet-Kanäle auf einem PCI-Steckplatz bündeln. Bei allen Interface-Karten erfolgt dabei der Datentransfer zum PC per DMA (Direct Memory Access). Dadurch wird keine CPU-Performance für den Netzwerkzugriff abgezweigt.

Offen nach allen Seiten – auch für andere Protokolle

Da die Ethernet-Funktionen des Betriebssystems vollständig erhalten



Martin Rostan ist bei Beckhoff Produktmanager für Feldbusysteme

bleiben, können alle betriebssystem-konformen Protokolle parallel auf dem selben physikalischen Netzwerk betrieben werden. Dies umfasst nicht nur Standard IT-Protokolle wie TCP/IP, HTTP, FTP oder SOAP, sondern auch praktisch alle Industrial Ethernet Protokolle wie Modbus TCP, ProfiNet oder Ethernet/IP.

Das EtherCat-Protokoll wird dank eines speziellen Ether-Types direkt im originären Ethernet-Frame (IEEE 802.3) transportiert, auf dem z. B. auch TCP/IP aufsetzt. Es kann aus mehreren Sub-Telegrammen bestehen, die jeweils einen Speicherbereich des bis zu 4 Gigabyte großen logischen Prozessabbildes bedienen. Die datentechnische Reihenfolge ist dabei unabhängig von der physikalischen Reihenfolge der Ethernet-Klemmen im Netz. Broadcast, Multicast und Querkommunikation zwischen Slaves sind möglich. Die Übertragung direkt im Ethernet-Frame wird stets dann eingesetzt, wenn EtherCat-Komponenten zusammen mit TwinCat im gleichen Subnetz wie der Steuerungsrechner betrieben werden.

Der Einsatzbereich von EtherCat ist jedoch nicht auf TwinCat als Steuerungssystem beschränkt: EtherCat UDP verpackt das EtherCat Protokoll in UDP/IP-Datagramme. Daher können beliebige Steuerungen mit einem Ethernet-Protokollstack EtherCat-Systeme ansprechen. Selbst die Kommunikation über Router hinweg in andere Subnetze ist möglich.

Allerdings hängt hier die Leistungsfähigkeit des Systems von den Echtzeiteigenschaften der Steuerung und ihrer Ethernet Protokollimplementierung ab. Die Antwortzeiten des EtherCat-Netzwerks an sich werden jedoch nur minimal eingeschränkt: lediglich in der ersten Station muss das UDP-Datagramm entpackt werden.

Mehr Freiraum für innovative MSR-Konzepte

Auf Grund der FMMU in der Klemme und des DMA-Zugriffs auf die Netzwerkkarte im IPC erfolgt die gesamte Protokollbearbeitung in Hardware und ist damit völlig unabhängig von der Laufzeit von Protokollstacks, von CPU-Performance oder Software-Implementierung. Dies sorgt für neue Dimensionen in der Netzwerk-Performance: Die Update-Zeit für 1000 verteilte E/As liegt bei 30 µs – einschließlich Klemmen-Durchlaufzeit. Mit einem einzigen Ethernet-Frame lassen sich bis zu 1486 Bytes Prozessdaten austauschen – das entspricht fast 12000 digitalen Ein- und Ausgängen bei nur 300 µs Übertragungszeit. Für die Kommunikation mit 100 Servoachsen benötigt ein EtherCat-System 100 µs. In dieser Zeit erhalten alle Achsen ihre Sollwerte, Steuerdaten und melden ihre Istpositionen und Stati. Durch das Distributed Clock-Verfahren können die Achsen dabei mit einer Abweichung von deutlich weniger als einer Mikrosekunde synchronisiert werden.

Diese extreme Performance ermöglicht Steuerungs- und Regelungskonzepte, die mit klassischen Feldbussystemen nicht realisierbar sind. So kann beispielsweise neben der Geschwindigkeitsregelung jetzt auch die Stromregelung verteilter Antriebe über Ethernet erfolgen. Die enorme Bandbreite erlaubt es, zu jedem Datum z. B. auch Status-Informationen zu übertragen.

Gute Statik erlaubt Architektur- und Medienmix

Mit EtherCat steht eine Kommunikationstechnologie zur Verfügung, die der überlegenen Rechenleistung moderner Industrie-PCs entspricht. Das Bussystem ist nicht mehr der Flaschenhals im Steuerungskonzept. Verteilte E/As lassen sich damit schneller erfassen, als dies mit den meisten lokalen E/A-Schnittstellen

KOMPAKT

1000 verteilte E/As in 30 µs, 200 analoge E/As in 50 µs und 100 Achsen in 100 µs wahlweise über verdrehte Zweidrahtleitung (Twisted Pair) oder LWL übertragen. Zusammen mit der FMMU und dem variablen Architekturmodell hat Beckhoff mit EtherCAT eine Kommunikationslösung mit harten Echtzeiteigenschaften unter Ethernet (IEEE 802.3) entwickelt. Damit wäre sogar die Vision realisierbar, Ethernet kostengünstig an jeden Sensor zu bringen, nicht nur bis zum Remote-I/O. Für eine breite Akzeptanz soll dabei die Offenlegung der Technologie sorgen. Für Offenheit sorgt die Implementierung auf Basis des in der IEEE 802.3 definierten Ether-Frames. Darauf setzen Ethernet-Protokolle wie TCP/IP auf – und künftig nun auch EtherCAT.

EtherCAT
Hartes Echtzeit-Ethernet

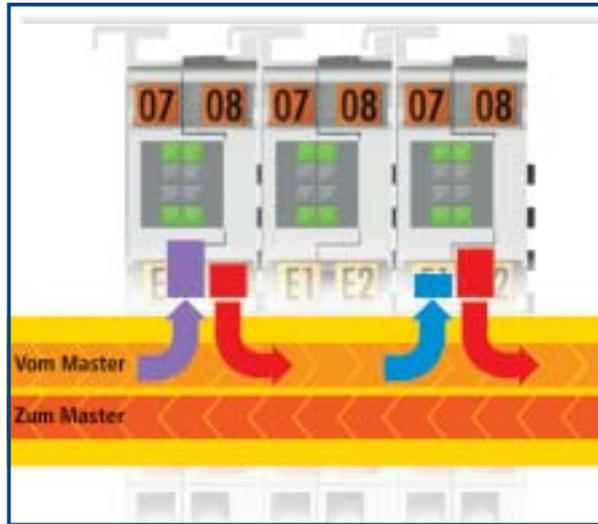
750

möglich ist. Das EtherCat-Technologieprinzip ist skalierbar und nicht an die Baudrate von 100 Mbaud gebunden – eine Erweiterung auf Gbit-Ethernet ist möglich.

Linie, Baum oder Stern: EtherCat unterstützt nahezu beliebige Topologien. Besonders praktisch für die Anlagenverdrahtung ist die Kombination aus Linie und Stichleitungen: die benötigten Schnittstellen sind auf den Kopplern vorhanden, zusätzliche Switches werden nicht benötigt. Ebenso lässt sich aber auch die klassische Switch-basierte Stern-Topologie einsetzen. Die Flexibilität bei der Architektur wird durch die Auswahl verschiedener Leitungen vervollständigt. Preiswerte Standard Ethernet Patch-Kabel übertragen die Signale wahlweise auf Ethernet-Art (100Base-TX) oder in der E-Bus-Signaldarstellung. Kunststoff-Lichtwellenleiter (POF) ergänzen das System für spezielle Anwendungsfälle. Die gesamte Bandbreite der Ethernet-Vernetzung – wie verschiedenste Lichtleiter und Kupferkabel – kann in der Kombination mit Switches oder Mediumsetzern zum Einsatz kommen.

Distributed Clock sorgt für kleinen Jitter

Die Fast Ethernet Physik erlaubt eine Leitungslänge von 100 m zwischen zwei Teilnehmern, die E-Bus-Leitung ist für Abstände bis 10 m vorgesehen. Für jede Leitungsstrecke kann die Signalvariante individuell ausge-



Jede E/A-Klemme entnimmt über die FMMU während des Telegrammdurchlaufs die für sie bestimmten Daten und schreibt ihre Werte in den Protokollrahmen

wählt werden. Da bis zu 65535 Teilnehmer angeschlossen werden können, ist die gesamte Netzausdehnung nahezu unbeschränkt.

Der exakten Synchronisierung kommt immer dann eine besondere Bedeutung zu, wenn räumlich verteilte Prozesse gleichzeitige Aktionen erfordern. Das kann z. B. in Applikationen der Fall sein, wo mehrere Servo-Achsen gleichzeitig koordinierte Bewegungen ausführen. Der leistungsfähigste Ansatz zur Synchronisierung ist der exakte Abgleich verteilter Uhren – wie in der IEEE 1588 beschrieben (s. a. IEE 07/2002, Seite 52). Im Gegensatz zur vollsynchronen Kommunikation, deren Qualität bei Kommunikationsstörungen sofort leidet, verfügen verteilte abgegliche Uhren über ein hohes Maß an Toleranz gegenüber möglichen, störungsbedingten Verzögerungen im Kommunikationssystem.

Beim EtherCat basiert der Datenaustausch vollständig auf einer reinen Hardware-Maschine. Da die Kommunikation eine logische (und dank voll-duplex Fast Ethernet auch physikalische) Ringstruktur nutzt, kann die Master-Uhr den Laufzeitversatz zu den einzelnen Slave-Uhren einfach und exakt ermitteln – und umgekehrt. Auf Basis dieses Wertes werden die verteilten Uhren nachgeführt, und es steht eine hochgenaue netzwerkweite Zeitbasis zur Verfügung, deren Jitter deutlich unter einer Mikrosekunde liegt.

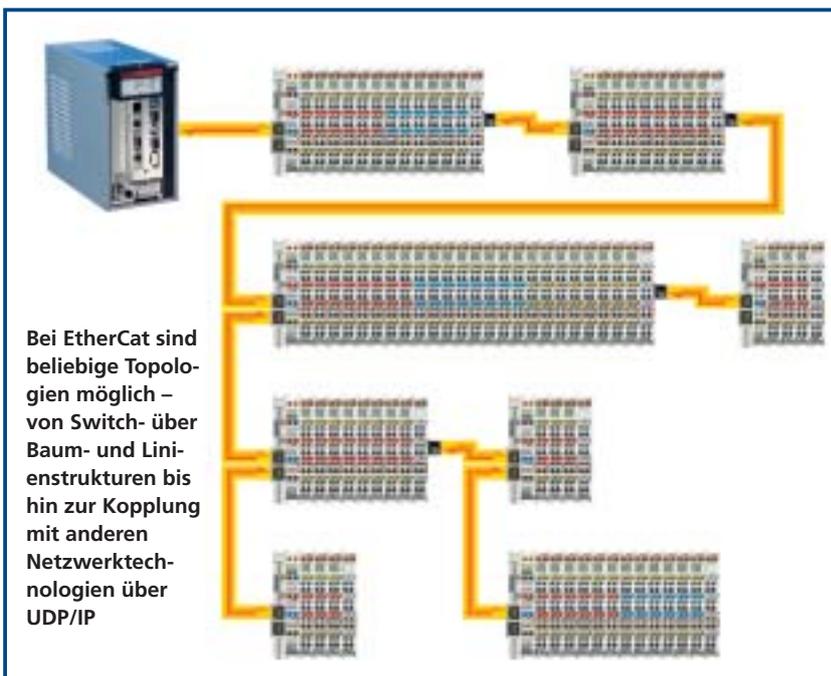
Hochauflösende verteilte Uhren liefern zudem exakte Informationen zum lokalen Zeitpunkt der Datenerfassung. Steuerungen berechnen beispielsweise häufig Geschwindigkeiten aus nacheinander gemessenen Positionen. Speziell bei sehr kurzen Abtastzeiten führt hier schon ein kleiner zeitlicher Jitter in der Wegerfassung zu großen Geschwindigkeitssprüngen. Beckhoff führt mit EtherCat konsequenterweise auch neue, erweiterte Datentypen ein:

- Timestamp Data Type
- Oversampling Data Type

Dabei wird ein Messwert mit der lokalen Zeit mit einer Auflösung von bis zu 10 ns verknüpft – die Bandbreite von Ethernet macht das möglich. Damit hängt die Genauigkeit einer Geschwindigkeitsberechnung nicht mehr vom Jitter des Kommunikationssystems ab und wird um Größenordnungen besser.

Hot Connect, Diagnose und Co.

Viele Applikationen erfordern eine Änderung der E/A-Konfiguration während des Betriebes. Beispiele sind Bearbeitungszentren mit wechselnden, sensor-bestückten Werkzeugsystemen oder Transfereinrich-



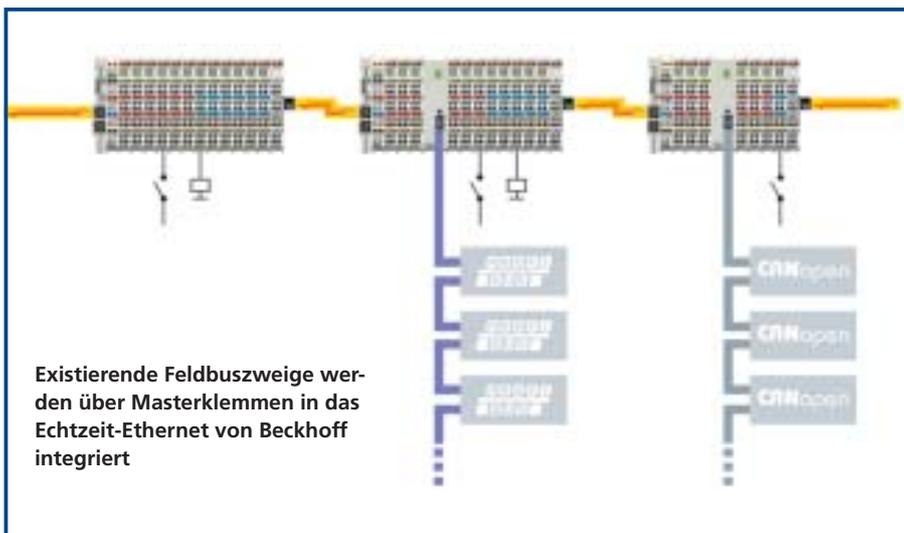
Bei EtherCat sind beliebige Topologien möglich – von Switch- über Baum- und Linienstrukturen bis hin zur Kopplung mit anderen Netzwerktechnologien über UDP/IP

tungen mit intelligenten, flexiblen Werkstückträgern. Die Protokollstruktur des EtherCat-Systems trägt diesen Anforderungen Rechnung: Die Hot Connect Funktion erlaubt es, Teile des Netzwerkes on the fly an- und abzukoppeln, umzukonfigurieren und so flexibel auf wechselnde Ausbaustufen zu reagieren. Die Erfahrungen mit Feldbusystemen zeigen, dass Verfügbarkeit und Inbetriebnahmezeit entscheidend von der Diagnosefähigkeit abhängen. Nur eine schnell und präzise erkannte und eindeutig lokalisierbare Störung lässt sich kurzfristig beheben. Deshalb wurde besonderer Wert auf eine vorbildliche Diagnose gelegt. Bei der Inbetriebnahme gilt es zu prüfen, ob die Ist-Konfiguration der E/A-Klemmen mit der Soll-Konfiguration übereinstimmt. Auch die Topologie sollte der Konfiguration entsprechen. Durch die einge-

möglicht die genaue Lokalisierung kritischer Netzwerkabschnitte. Schleichende oder wechselnde Fehlerquellen wie EMV-Einflüsse, fehlerhafte Steckverbindungen oder Kabelschäden werden erkannt und lokalisiert, auch wenn sie die Selbstheilungsfähigkeit des Netzwerkes noch nicht überfordern.

Für Migration und Offenheit ist gesorgt

Neben den Ethernet-Klemmen mit E-Bus-Anschluss lassen sich auch sämtliche Beckhoff-Komponenten mit dem bisherigen K-Bus anschließen. Das Programm umfasst entsprechende Buskoppler. Damit sind Kompatibilität und Durchgängigkeit zum bestehenden System gewährleistet, bestehende und zukünftige Investitionen werden geschützt. Die EtherCat Technologie ist



baute Topologie-Erkennung, bis hinunter zu den einzelnen Klemmen, kann nicht nur diese Überprüfung beim Systemstart stattfinden – auch ein automatisches Einlesen des Netzwerkes ist möglich (Konfigurations-Upload). Bitfehler in der Übertragung werden durch die Auswertung der CRC-Prüfsumme zuverlässig erkannt: Das 32 Bit CRC-Polynom weist eine minimale Hamming-Distanz von vier auf. Neben der Bruchstellenerkennung und -lokalisierung erlauben Protokoll, Übertragungsphysik und Topologie des EtherCat-Systems eine individuelle Qualitätsüberwachung jeder einzelnen Übertragungsstrecke. Die automatische Auswertung der entsprechenden Fehlerzähler er-

nicht nur vollständig Ethernet-kompatibel, sondern durch besondere Offenheit gekennzeichnet: Das Protokoll verträgt sich mit weiteren Ethernet-basierten Diensten und Protokollen auf dem gleichen physikalischen Netz – in der Regel sogar nur mit minimalen Einbußen bei der Performance. Beliebige Ethernet-Geräte können innerhalb des EtherCat-Strangs via Hub-Klemme angeschlossen werden. Geräte mit Feldbus-Schnittstelle werden über EtherCat-Feldbus-Masterklemmen integriert. Die UDP-Protokollvariante lässt sich auf jedem Socket-Interface implementieren. Schließlich ist vorgesehen, die Technologie nach Abschluss der Entwicklungsarbeiten offen zu legen. (ku) □