

Ethernet bis in die Reihenklemme

Dipl.-Ing. Martin Rostan, BECKHOFF Industrie Elektronik Nürnberg

Ethernet right up to the terminal

A new real time Ethernet technology is shown, which overcomes the limitations of existing and upcoming solutions. It is shown that this technology named EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) sets new standards for real-time performance since it communicated the data of 1000 distributed I/Os in 30 µs using twisted pair or fibre optic cable.

The system allows one to combine line, tree and star topology, works with and without switches and thus leads to significantly reduced infrastructure costs. Ethernet and internet technologies are made available down to the electronic terminal level. For master devices standard low cost Ethernet cards (NICs) can be used. As the entire protocol is implemented in hardware, the system performance is independent of the slaves processing power and is suitable for masters that have little processing power available for fieldbus communication purposes.

EtherCAT, real-time-Ethernet, simple line structure, high performance.

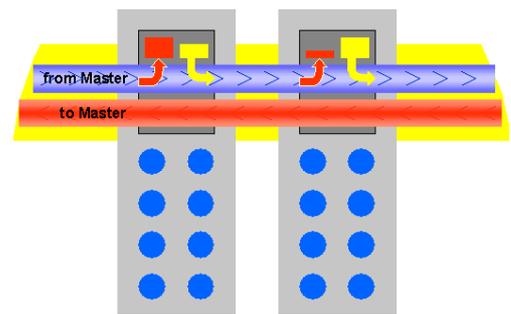
1 Grenzen bisheriger Ethernet Kommunikationsansätze

Es gibt viele verschiedene Ansätze, mit denen Ethernet echtzeitfähig gemacht werden soll: so wird z.B. das Zugriffsverfahren CSMA/CD durch überlagerte Protokollschichten außer Kraft gesetzt und durch ein Zeitscheibenverfahren oder durch Polling ersetzt; andere Vorschläge sehen spezielle Switches vor, die Ethernet Pakete zeitlich präzise kontrolliert verteilen. Diese Lösungen mögen Datenpakete mehr oder weniger schnell und exakt zu den angeschlossenen Ethernet Knoten transportieren – die Zeiten, die für die Weiterleitung zu den Ausgängen oder Antriebsreglern und für das Einlesen der Eingangsdaten benötigt werden, sind jedoch stark implementierungsabhängig. Speziell bei modularen E/A-Systemen kommt hier in der Regel noch ein Sub-Bus hinzu, der wie der Beckhoff K-Bus zwar synchronisiert und schnell sein kann, jedoch prinzipbedingt stets kleine Verzögerungen zur Kommunikation hinzufügt.

Wenn für jeden Teilnehmer individuelle Ethernet Frames Verwendung finden, so ist zudem die Nutzdatenrate prinzipiell sehr gering: Das kürzeste Ethernet Frame ist 84 Bytes lang (incl. Inter Packet Gap IPG). Wenn z.B. ein Antrieb zyklisch 4 Bytes Istwert und Status sendet und entsprechend 4 Bytes Sollwert und Kontrollwort empfängt, so wird bei 100% Buslast (also unendlich kurzer Antwortzeit des Antriebs) nur eine Nutzdatenrate von $4/84 = 4,7\%$ erreicht. Bei durchschnittlich 10 µs Antwortzeit sinkt die Rate schon auf 1,9%. Diese Limitierungen gelten für alle Echtzeit-Ethernet Ansätze, die an jeden Teilnehmer ein Ethernet Frame senden bzw. erwarten – und zwar unabhängig von den verwendeten Protokollen innerhalb des Ethernet Frames.

2 Lösungsansatz: was ist neu an der vorgestellten Technologie?

Mit der EtherCAT Technologie werden diese prinzipiellen Begrenzungen anderer Ethernet Lösungen überwunden: das Ethernet Paket wird nicht mehr in jeder Anschaltung zunächst empfangen, dann interpretiert und die Prozessdaten weiterkopiert. Die neu entwickelten FMMU (Fieldbus Memory Management Unit) in jeder E/A-Klemme entnimmt die für sie bestimmten Daten, während das Telegramm das Gerät durchläuft. Ebenso werden Eingangsdaten im Durchlauf in das Telegramm eingefügt. Die Telegramme werden dabei nur wenige Nanosekunden verzögert.

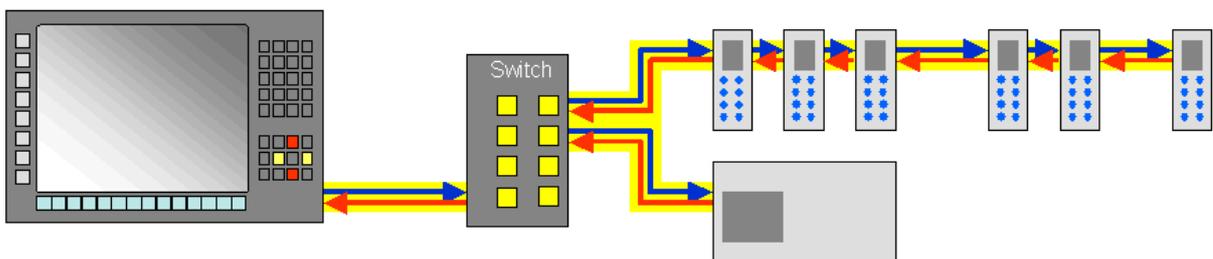


Telegrammbearbeitung im Durchlauf

Da ein Ethernet Frame sowohl in Sende- als auch in Empfangsrichtung die Daten vieler Teilnehmer erreicht, steigt die Nutzdatenrate auf ca. 80% an. Dabei werden die Voll-Duplex Eigenschaften von 100BaseTx vollständig ausgenutzt, so dass effektive Datenraten von > 100 Mbit/s (80% von 2 x 100 Mbit/s) erreichbar sind.

2.1 Ethernet bis in die Klemme

Das Ethernet Protokoll gemäß IEEE 802.3 bleibt bis in die einzelne Klemme erhalten, der Sub-Bus entfällt. Lediglich die Übertragungsphysik wird im Koppler von Twisted Pair bzw. Lichtleiterphysik auf E-Bus gewandelt, um den Anforderungen der elektronischen Reihenklemme gerecht zu werden. Die Signalform innerhalb der Klemmenreihe (E-Bus) eignet sich für kurze Strecken – bis 10 m – auch zur Übertragung auf verdrehter Zweidrahtleitung. Damit kann die Klemmenreihe besonders kostengünstig verlängert werden – wobei der anschließende Wechsel auf Ethernet jederzeit möglich ist.



Voll-Duplex Ethernet im Ring, ein Frame für viele Teilnehmer:
Die EtherCAT System-Architektur steigert den Kommunikations-Wirkungsgrad.

Die FMMU Technologie kann steuerungsseitig durch den TwinCAT Y-Treiber für Ethernet ergänzt werden. Dieser bindet sich transparent in das System ein, so dass er als betriebssystemkonformer Netzwerktreiber und zusätzlich als TwinCAT Feldbuskarte erscheint. Auf der Sendeseite wird über interne Priorisierung und Puffer sichergestellt, dass Ethernet-Frames aus dem Echtzeitsystem immer dann eine freie Sen-

deleitung vorfinden, wenn sie an der Reihe sind. Die Ethernet-Frames des Betriebssystems werden erst danach in den Lücken verschickt, wenn entsprechend Zeit ist.

Auf der Empfangsseite werden alle empfangenen Ethernet-Frames vom TwinCAT I/O-System überprüft und die echtzeitrelevanten herausgefiltert. Alle anderen Frames werden nach der Überprüfung außerhalb des Echtzeitkontextes an das Betriebssystem übergeben.

Als Hardware in der Steuerung kommen sehr preiswerte handelsübliche Standard Netzwerk-Interface-Karten (NIC) zum Einsatz. Der Datentransfer zum PC erfolgt per DMA (Direct Memory Access)– es wird also keine CPU Performance für den Netzwerkzugriff abgezweigt.

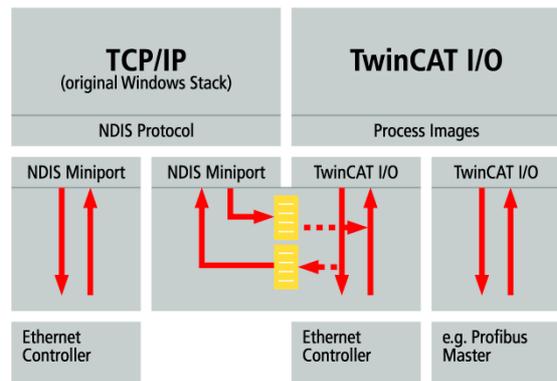
Da die Ethernet Funktionalität des Betriebssystems vollständig erhalten bleibt, können alle betriebssystemkonformen Protokolle parallel auf dem selben physikalischen Netzwerk betrieben werden. Dies umfasst nicht nur Standard IT Protokolle wie TCP/IP, HTTP, FTP oder SOAP, sondern auch praktisch alle Industrial Ethernet Protokolle wie Modbus TCP, ProfiNet oder Ethernet/IP.

3 Systemeigenschaften

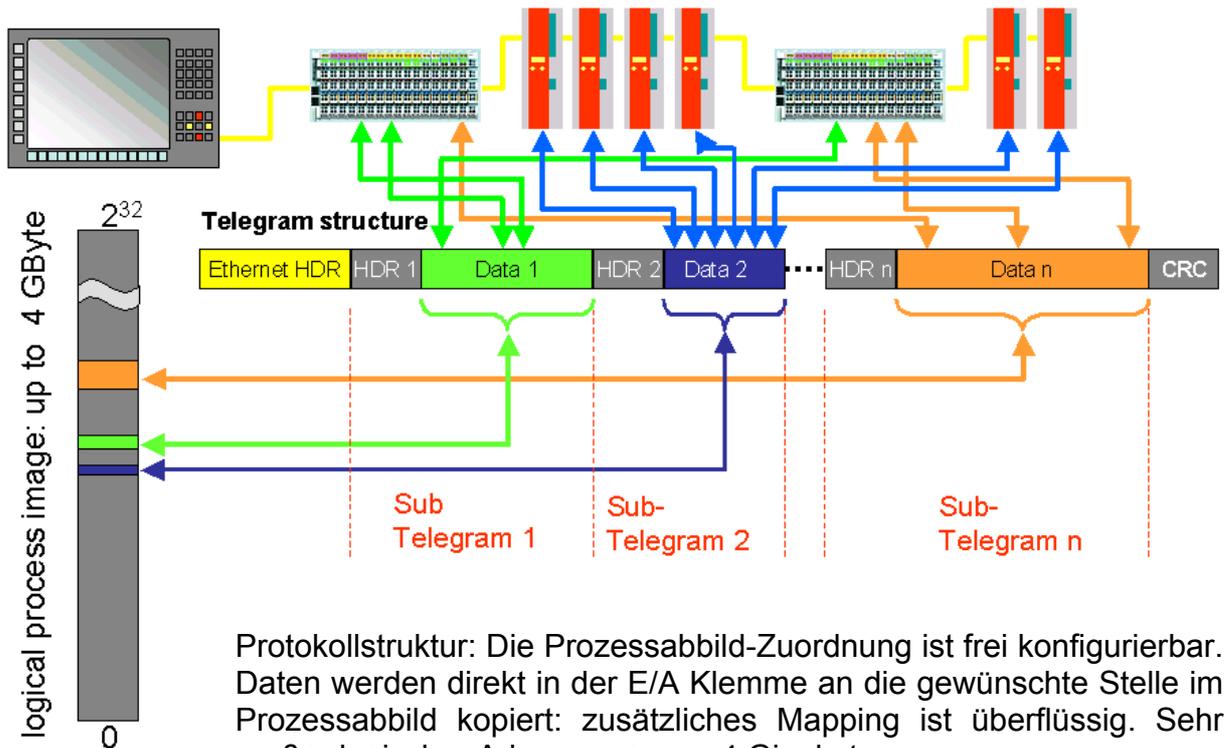
3.1 Protokoll

Das für Prozessdaten optimierte EtherCAT Protokoll wird dank eines speziellen Ether-Types direkt im Ethernet-Frame transportiert. 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, es kann wahlfrei adressiert werden. Broadcast, Multicast und Querkommunikation zwischen Slaves sind möglich. Die Übertragung direkt im Ethernet-Frame wird stets dann eingesetzt, wenn EtherCAT-Komponenten im gleichen Subnetz wie der Steuerungsrechner betrieben werden.

Der Einsatzbereich von EtherCAT ist jedoch nicht auf ein Subnetz beschränkt: EtherCAT UDP verpackt das EtherCAT Protokoll in UDP/IP Datagramme. Hiermit kann jede Steuerung mit Ethernet Protokoll-Stack EtherCAT Systeme ansprechen. Selbst die Kommunikation über Router hinweg in andere Subnetze ist möglich. Selbstverständlich hängt die Leistungsfähigkeit des Systems in dieser Variante 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.



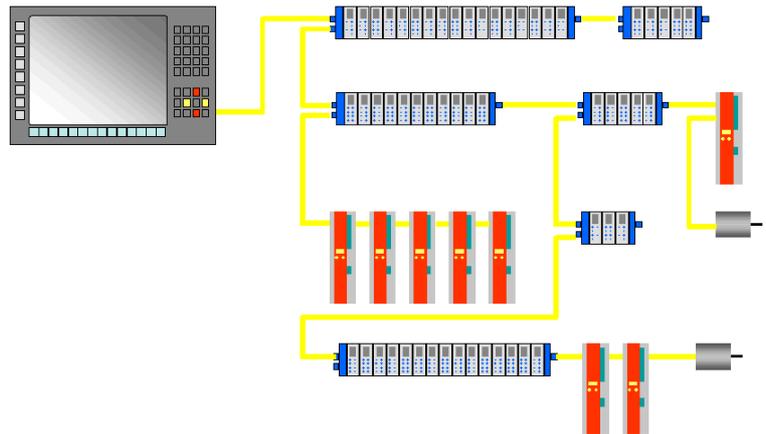
TwinCAT Y-Treiber:
betriebssystemkonform



3.2 Topologie

Linie, Baum oder Stern: EtherCAT unterstützt nahezu beliebige Topologien. Die von den Feldbussen her bekannte Bus- oder Linienstruktur wird damit auch für Ethernet verfügbar. Besonders praktisch für die Anlagenverdrahtung ist die Kombination aus Linie und Abzweigen bzw. Stichleitungen: die benötigten Schnittstellen sind auf den Kopplern vorhanden, zusätzliche Switches werden nicht benötigt. Natürlich kann aber auch die klassische Switch-basierte Ethernet Sterntopologie eingesetzt werden.

Die maximale Flexibilität bei der Verdrahtung wird durch die Auswahl verschiedener Leitungen vervollständigt. Flexible und sehr 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.



Maximale Flexibilität bei der Verdrahtung: mit und ohne Switch, Linien und Baumtopologien, frei wähl- und kombinierbar.

Die Fast Ethernet Physik erlaubt eine Leitungslänge von 100 m zwischen zwei Teilnehmern, die E-Bus Leitung ist für Abstände bis 10m vorgesehen. Für jede Leitungsstrecke kann die Signalvariante individuell ausgewählt werden. Da bis zu 65535 Teilnehmer angeschlossen werden können, ist die gesamte Netzausdehnung nahezu unbeschränkt.

3.3 Distributed Clocks

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 im neuen Standard IEEE 1588 beschrieben. Im Gegensatz zur vollsynchrone Kommunikation, deren Synchronisationsqualität 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 ja vollständig auf einer reinen Hardware-Maschine. Da die Kommunikation eine logische (und dank Vollduplex Fast Ethernet auch physikalische) Ringstruktur nutzt, kann die Mutter-Uhr den Laufzeitversatz zu den einzelnen Tochter-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 beträgt.

Hochauflösende verteilte Uhren dienen aber nicht nur der Synchronisierung, sondern können auch exakte Informationen zum lokalen Zeitpunkt der Datenerfassung liefern. Steuerungen berechnen beispielsweise häufig Geschwindigkeiten aus nacheinander gemessenen Positionen. Speziell bei sehr kurzen Abtastzeiten führt schon ein kleiner zeitlicher Jitter in der Wegerfassung zu großen Geschwindigkeitssprüngen. Konsequenterweise werden mit EtherCAT auch neue, erweiterte Datentypen eingeführt (Timestamp + Oversampling Data Type). Mit dem Messwert wird die lokale Zeit mit einer Auflösung von bis zu 10 ns verknüpft - die große Bandbreite von Ethernet macht das möglich. Damit hängt dann die Genauigkeit einer Geschwindigkeitsberechnung nicht mehr vom Jitter des Kommunikationssystems ab. Sie wird um Größenordnungen besser als diejenige von Messverfahren, die auf jitterfreier Kommunikation basieren.

3.4 Performance

Mit EtherCAT werden neue Dimensionen in der Netzwerk-Performance erreicht. Dank FMMU in der Klemme und DMA Zugriff auf die Netzwerkkarte im Master erfolgt die gesamte Protokollbearbeitung in Hardware und ist damit unabhängig von der Laufzeit von Protokollstacks, von CPU Performance oder Software-Implementierung. Die Update Zeit für 1000 E/As beträgt nur 30 µs – einschließlich Klemmen-Durchlaufzeit. Mit einem einzigen Ethernet-Frame können bis zu 1486 Bytes Pro-

zessdaten ausgetauscht werden – das entspricht fast 12000 digitalen Ein- und Ausgängen. Für die Übertragung dieser Datenmenge werden dabei nur 300 µs benötigt.

Für die Kommunikation mit 100 Servoachsen werden nur 100 µs benötigt. In dieser Zeit werden alle Achsen mit Sollwerten und Steuerdaten versehen und melden ihre Ist-Position und Status. Durch das Distributed Clock Verfahren können die Achsen dabei mit einer Abweichung von deutlich weniger als einer Mikrosekunde synchronisiert werden.

Die extrem hohe Performance der EtherCAT Technologie ermöglicht Steuerungs- und Regelungskonzepte, die mit klassischen Feldbussystemen nicht realisierbar waren. So kann beispielsweise nicht nur die Geschwindigkeitsregelung, sondern neu auch die Stromregelung verteilter Antriebe über das Ethernet System erfolgen. Die enorme Bandbreite erlaubt es, zu jedem Datum z. B. auch Status-Informationen zu übertragen. 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 werden schneller erfasst, als dies mit den meisten lokalen E/A-Schnittstellen möglich ist. Das EtherCAT Technologieprinzip ist skalierbar und nicht an die Baudrate von 100 MBaud gebunden – eine Erweiterung auf GBit Ethernet ist möglich.

3.5 Diagnose

Die Erfahrungen mit Feldbussystemen zeigen, dass die Verfügbarkeit und Inbetriebnahmezeiten entscheidend von der Diagnosefähigkeit abhängen. Nur eine schnell und präzise erkannte und eindeutig lokalisierbare Störung kann kurzfristig behoben werden. Deshalb wurde bei der Entwicklung des EtherCAT Systems besonderer Wert auf vorbildliche Diagnoseeigenschaften gelegt.

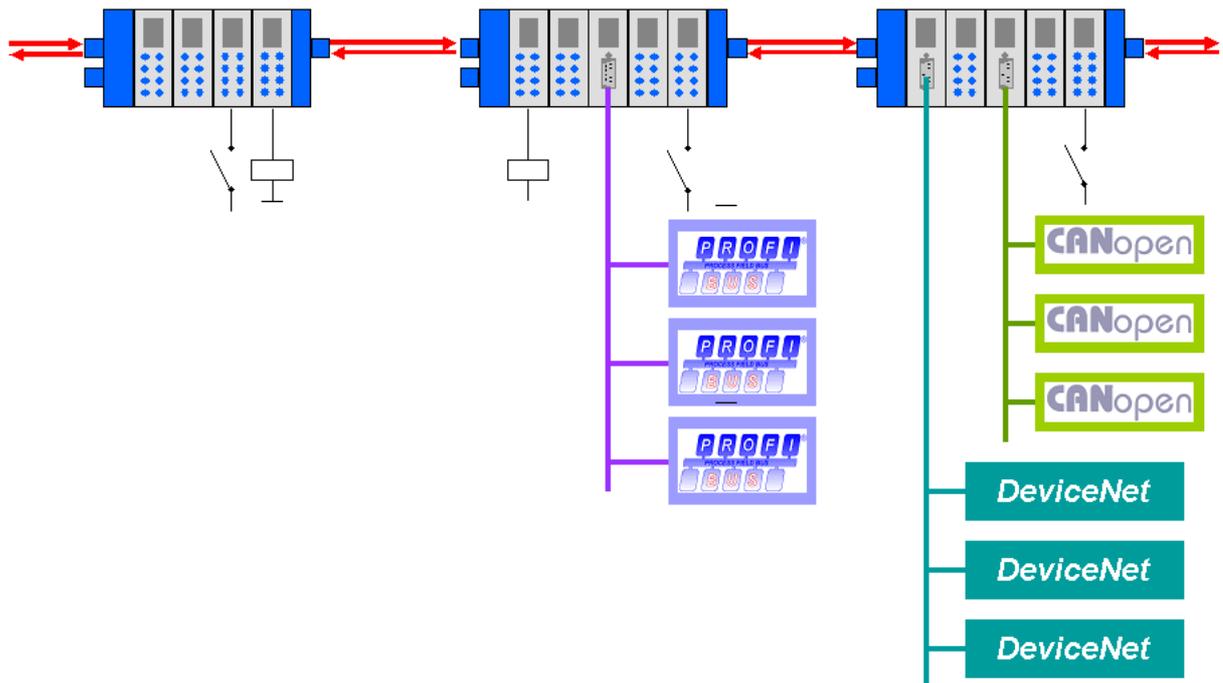
Bei der Inbetriebnahme gilt es zu prüfen, ob die Ist-Konfiguration der E/A- Klemmen mit der Soll-Konfiguration übereinstimmt. Auch die Topologie sollte der Konfiguration entsprechen. Durch die eingebaute Topologie-Erkennung bis hinunter zu den einzelnen Klemmen kann nicht nur diese Überprüfung beim Systemstart 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 4 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 ermöglicht die exakte 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.

3.6 EtherCAT statt PCI

Mit der fortschreitenden Verkleinerung der PC-Komponenten wird die Baugröße von Industrie-PCs zunehmend von der Anzahl der benötigten Steckplätze bestimmt. Die

Bandbreite von Fast Ethernet zusammen mit der Datenbreite der EtherCAT Kommunikations-Hardware (FMMU-Chip) ermöglicht hier, neue Wege zu gehen: klassisch im IPC vorgesehene Schnittstellen werden in intelligente Schnittstellenklemmen am EtherCAT ausgelagert. Über einen einzigen Ethernet Port im PC können dann neben den dezentralen E/As, Achsen und Bediengeräten auch komplexe Systeme wie Feldbus-Master, schnelle serielle Schnittstellen, Gateways und andere Kommunikations-Interfaces angesprochen werden. Selbst weitere Ethernetgeräte mit beliebigen Protokollvarianten lassen sich über dezentrale Hub-Klemmen anschließen. Der zentrale IPC wird kleiner und damit kostengünstiger, eine Ethernet-Schnittstelle genügt zu kompletten Kommunikation mit der Peripherie.



Feldbusgeräte (z.B. Profibus, CANopen, DeviceNet, AS-Interface etc.) werden durch dezentrale Feldbus-Masterklemmen integriert.

3.7 Integration von Standard Busklemmen

Neben den neuen EtherCAT-Busklemmen mit E-Bus Anschluss lassen sich auch sämtliche Komponenten mit K-Bus Anschluss aus dem bestehenden Busklemmen Programm über entsprechende Koppler anschließen. Damit sind Kompatibilität und Durchgängigkeit zum bestehenden System gewährleistet, bestehende und zukünftige Investitionen werden geschützt.

4 Einsatzfelder, erste Praxiserfahrungen

Im Verbund mit schnellen Maschinensteuerungen lässt sich die überragende Performance von EtherCAT natürlich besonders gut darstellen. Es steht ein Bussystem zur Verfügung, das Zugriffsgeschwindigkeiten wie bei lokalen E/A bietet. Mit EtherCAT lässt sich nicht nur der Lageregelkreis, sondern auch der Geschwindigkeitsregelkreis - oder gar der Stromregelkreis - über den Bus schließen – kostengünstige Antriebsregler sind die Folge. EtherCAT bringt damit die Leistungsfähigkeit der schnellen PC-

basierten Steuerungstechnik voll zur Geltung. Die IPCs werden dabei klein und kostengünstig, da auf Steckplätze verzichtet werden kann: Erweiterungskarten werden ebenfalls über EtherCAT angesprochen.

Doch EtherCAT eignet sich nicht nur für extrem schnelle Anwendungen. Da die Protokollbearbeitung komplett in Hardware erfolgt, stellt die Technologie nur geringe Anforderungen an die Master-Anschaltung: ein handelsüblicher Ethernet Controller genügt. Der Master muss lediglich zyklisch oder bei Bedarf EtherCAT Frames abschicken – Mapping, Adressierung, Knotenüberwachung etc. erfolgt in den Slave-ASICs. Das Eingangs-Prozessabbild kommt vollständig sortiert und damit fertig aufbereitet für die Steuerungsapplikation im Master an. Bei einfachen zyklischen Applikationen bis 1486 Byte Prozessabbildgröße ist lediglich ein einziges Telegramm im Master zu bearbeiten – und das besteht fast ausschließlich aus den Prozessdaten. Größere Prozessabbilder werden auf mehrere Frames aufgeteilt.

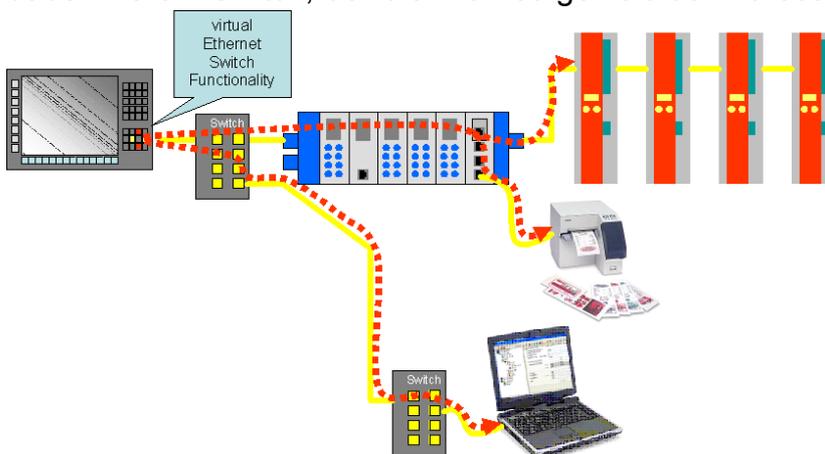
EtherCAT dürfte damit diejenige Feldbus-Technologie sein, die für die geringsten Anforderungen im Master sorgt.

Erste Praxiserfahrungen in einer Pilotanlage unterstreichen die Vorteile des Systems.

5 Offenheit und Offenlegung

Die EtherCAT Technologie ist nicht nur vollständig Ethernet kompatibel, sondern *by design* durch besondere Offenheit gekennzeichnet: Das Protokoll verträgt sich mit weiteren Ethernet-basierten Diensten und Protokollen auf dem gleichen physikalischen Netz – in der Regel sogar mit minimalen Einbußen bei der Performance. Beliebige Ethernetgeräte können innerhalb des EtherCAT-Strangs via Hub-Klemme angeschlossen werden. Geräte mit Feldbusschnittstelle werden über EtherCAT Feldbus Master-Klemmen integriert. Die UDP Protokollvariante lässt sich auf jedem Socket-Interface implementieren.

EtherCAT Geräte können zusätzlich über einen TCP/IP Stack verfügen und damit nach aussen wie ein Standard Ethernet Teilnehmer auftreten. Der Master fungiert dabei wie ein Switch, der die Frames gemäß der Adressinformation zu den entsprechenden Teilnehmern weiterleitet. Statt Switch Ports werden lediglich die automatisch im Hochlauf vergebenen EtherCAT Adressen verwendet.



Entsprechend funktionieren auch die Hub- bzw. Switch Klemmen: beliebige Ethernet Geräte können angeschlossen

werden, die Ethernet Frames werden durch das EtherCAT Protokoll getunnelt, wie es im Internet üblich ist (z.B. VPN, PPPoE (DSL) etc.). Das EtherCAT Netzwerk ist da-

bei für das Ethernet Gerät voll transparent, und die Echtzeiteigenschaften werden nicht beeinträchtigt.

Es ist vorgesehen, die EtherCAT Technologie nach Abschluss der Entwicklungsarbeiten offenzulegen. Hersteller von Automatisierungskomponenten und Systemen sind eingeladen, an dieser Technologie zu partizipieren. Auch die internationale Normung wird angestrebt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Überragende Performance, einfachste Verdrahtung und Offenheit für andere Protokolle kennzeichnen EtherCAT. Wo herkömmliche Feldbussysteme an ihre Grenzen kommen, setzt EtherCAT neue Maßstäbe: 1000 E/A s in 30 μ s, wahlweise verdrehte Zweidrahtleitung (Twisted Pair) oder Lichtleiter, und dank Ethernet und Internet Technologien optimale vertikale Integration. Mit EtherCAT kann die aufwändige Ethernet Sterntopologie durch eine einfache Linienstruktur ersetzt werden – teure Infrastrukturkomponenten entfallen. Wahlweise kann EtherCAT aber auch klassisch mit Switches verkabelt werden, um andere Ethernet Teilnehmer zu integrieren. Wo andere Echtzeit-Ethernet Ansätze spezielle Anschaltungen in der Steuerung erfordern, kommt EtherCAT mit äußerst kostengünstigen Standard Ethernet Karten (NICs) aus.

Ethernet bis in die Reihenklemme wird durch EtherCAT technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll. Volle Ethernet Kompatibilität, Internet Technologien auch in einfachsten Geräten, maximale Nutzung der großen Ethernet Bandbreite, hervorragende Echtzeiteigenschaften bei niedrigen Kosten sind herausragende Eigenschaften dieses neuen Netzwerkes. Als schneller Antriebs- und E/A-Bus am Industrie-PC oder auch in Kombination mit kleiner Steuerungstechnik wird EtherCAT vielfältige Einsatzmöglichkeiten finden.

www.ethercat.de