

# Netzwerk-Architekturen für den industriellen Einsatz

H.-H. Dirxen, Düsseldorf

**Mit dem Einsatz von neuen Netzwerk-Technologien, beispielsweise dem so genannten Rapid Spanning Tree Standard (IEEE 802.1w) kann das einzelne Ethernet-LAN für höchst zuverlässige, deterministische, selbst-reparierende und vermaschte Netzwerke eingesetzt werden. Sie bieten die Zuverlässigkeit und Redundanz, die heute im industriellen Bereich benötigt werden. Das Mesh-Netzwerk ist fehlersicher mit mehrfach redundanten Datenwegen, die im Fehlerfall im 100-ms-Bereich automatisch umschalten.**

## 1 Entwicklung

In den frühen 70er Jahren experimentierten Robert Metcalfe und David Boggs vom Xerox Palo Alto Research Center mit den ersten Ethernet-Systemen auf dem Markt. Zu dieser Zeit war es Xeroxs primäre Motivation, ein System aufzubauen, in dem sich ein Laserdrucker und eine große Anzahl von Computern ein einziges Ethernet-Netzwerk teilen. Um die Ethernet-Offenheit zu garantieren, überzeugte Metcalfe das Unternehmen, die neue Ethernet-Technologie zu lizenzieren und für jedermann preisgünstig zugänglich zu machen. 1979 bildeten die Digital Equipment Corporation (DEC), Intel und Xerox ein Konsortium, um einen offenen Ethernet-Standard zu verfolgen. Dieser neue Standard erlaubte DEC mehr Computer, Intel mehr Chips und Xerox mehr Drucker zu verkaufen. Das Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) erkannte, dass diese Technologie kein internationaler Standard werden konnte, solange sie von einer einzelnen US-Firma kontrolliert und beherrscht wurde. So wurde das „802“-Komitee gebildet, um einen formalen, internationalen Standard für alle LAN-Technologien (Local Area Network) zu entwickeln. Weil das IEEE nicht gerade jedes individuelle LAN standardisieren wollte, definierte es einen Satz von Regeln, der einen einfachen Datentransfer zwischen zwei LAN-Technologien erlaubt. Als offener Standard hat das Ethernet die Fähigkeit, eine große Palette von herstellernneutralen Netzwerk-Komponenten zu verbinden. Heute ist es die populärste Physical Layer LAN-Technologie. Die meisten verkauften Computer werden mit integrierten Ethernet-Schnittstellen ausgerüstet und garantieren so einen großen Markt für Ethernet-basierende Systeme und eine preisgünstige und konkurrenzfähige Technologie.

### Autor

Dipl.-Ing Hans-Hermann Dirxen ist Marketing Manager der Invensys Systems GmbH, Düsseldorf.

## 2 Bus-Topologie

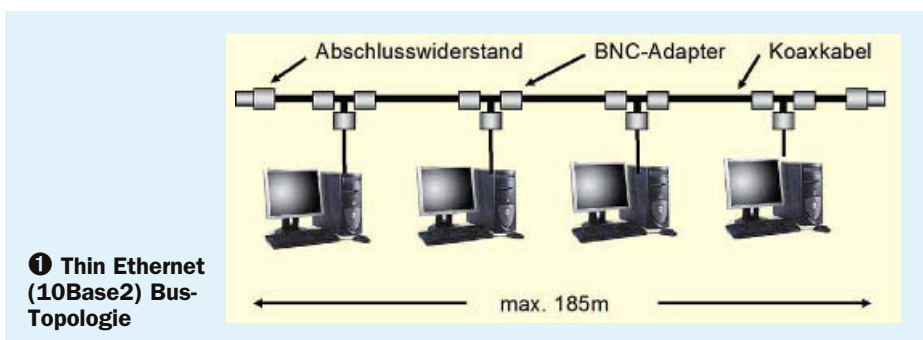
Die zwei Original-Ethernet-Standards 10-Base5, das Thick Ethernet, und der Standard 10Base2, das Thin Ethernet, benutzen eine Bus-Topologie. Diese Topologie ist ein einziges Koaxkabel, bezogen auf ein Segment, der so genannte Ethernet-Node oder -Knoten, an dem alle Teilnehmer (Geräte) mit BNC-Verbindern zusammengefügt werden. Beide Enden des Koaxkabels müssen mit Abschlusswiderständen terminiert werden (Bild 1). In einer einzelnen Collision Domain oder einem Node kann auf dem Bus nur eine Datenübertragung (Paket) zur gleichen Zeit übertragen werden. Das Protokoll Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection (CSMA/CD) wird benutzt, um zu bestimmen, wann ein Gerät ein Datenpaket übertragen darf. Carrier Sense verlangt vom Gerät, zuerst zu hören und dann zu senden. Wenn ein anderer Teilnehmer gerade überträgt, muss das Gerät, das übertragen möchte, mit seiner Übertragung warten. Multiple Access meint, dass jedes Gerät jederzeit auf das Netzwerk zugreifen kann. Das CSMA-Protokoll deutet also an, dass der Ethernet-Bus ein gemeinsam genutzter Bus ist, bei dem alle übertragenen Pakete von allen Geräten am Netzwerk „gesehen“ werden. Wurde ein Paket empfangen, das nicht für dieses Gerät bestimmt war, so wird es ignoriert. Anderenfalls wird das empfangene Paket aufgenommen. Collision Detection erkennt Geräte, die zur gleichen Zeit versuchen zu übertragen. Ist erst einmal eine Kollision er-

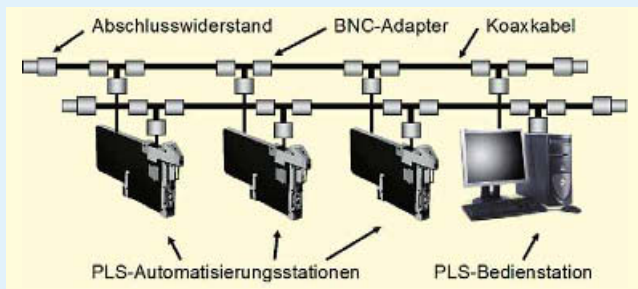
kannt, dann stoppen beide Teilnehmer ihre Übertragung, warten eine individuelle Zeit ab und starten einen neuen Übertragungsversuch, solange bis die Übertragung gelungen ist.

Für die Verlängerung des Netzkabels oder zur Zusammenschaltung von mehreren Segmenten (Nodes) werden Repeater eingesetzt. Diese arbeiten auf der physikalischen Schicht (Physical Layer) des Open System Interconnection (OSI) Modells. Sie nehmen das ankommende Signal (Ethernet Frame) grundsätzlich von dem einen Kabel-Segment auf und verstärken es auf das andere Kabel. Repeater senden jede Übertragung eines Gerätes, ob gut oder schlecht, wobei dies von jedem anderen Gerät am Netzwerk mitgehört wird. Auch die Kollisionen werden von allen anderen Geräten gehört. Leider können die Repeater die Kabel-Segmente nicht unbegrenzt verlängern, da das CSMA/CD-Protokoll eine kurze Antwortzeit benötigt, um korrekt arbeiten zu können. Ist das Kabel-Segment zu lang, so ist auch die Antwortzeit für das Protokoll zu lang. Dies limitiert die Anzahl der Repeater auf vier oder weniger zwischen zwei Ethernet Nodes.

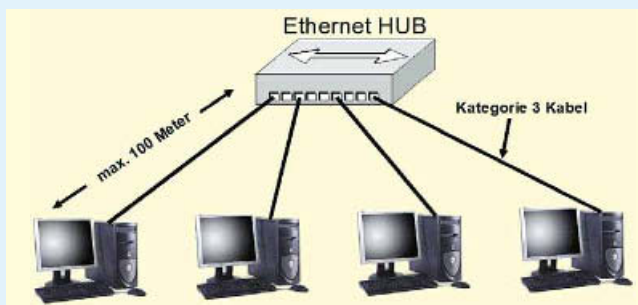
Das Koaxkabel ist sehr zuverlässig und einfach zu handhaben, aber es verbindet eine Collision Domain. Sie kann Performance- und Fehlererkennungs-Probleme generieren, die das gesamte Netzwerk stören. Sollte z. B. zu viel Verkehr auf dem Bus sein, so werden fast nur Datenkollisionen auftreten. Deshalb ist es keinem Gerät möglich, seine Daten erfolgreich zu übertragen. Sollte ein Abschlusswiderstand an einem Ende des Kabels fehlen, wird das Netzwerk unzuverlässig oder arbeitet nicht mehr. Bei einem Kabelbruch oder einer Änderung der Konfiguration (der Bus muss z. B. getrennt werden, um ein neues Segment hinzuzufügen) wird das gesamte Netzwerk gestört. Die Fehlersuche beim Kabelbruch benötigt die Eliminierungsmethode, wobei jedes Gerät und die Kabel zwischen den Geräten einzeln zu prüfen sind. Dies ist eine ermüdende und Zeit raubende Prozedur.

Industrielle Kommunikations-Netzwerke werden typischerweise nicht mehr modifiziert, nachdem sie installiert worden sind. Deswegen ist die Nutzung von Koaxkabel-Netzwerken kein Hindernis für den Einsatz. Wenn aber hier ein Fehler auftritt, wird das gesamte Netzwerk gestört. Durch dieses Problem besitzt die Single-Bus-Topologie einen so genannten Single Point of Failure. Zur Lösung wird typi-





② Redundantes Industrie-Ethernet (10Base2-Netzwerk)



③ Stern-Topologie (10BaseT)

scherweise ein zweites separates, redundantes Netzwerk eingesetzt (Bild ②). Tritt dann ein Fehler und damit eine Netzwerkstörung auf, schaltet das System einfach auf das Backup-Netzwerk um.

### 3 Stern-Topologie

Ein besonderer Fortschritt im Ethernet-Standard wurde durch die Einführung des Standards IEEE 802.3i (10BaseT) gemacht (Bild ③). Er erlaubt Ethernet-Übertragungen mit 10 Mbit/s über einfache Kabel der Kategorie 3 (nicht abgeschirmte Kabel mit verdrehten Adern). Die weit verbreitete Nutzung von nicht abgeschirmten Kabeln mit verdrehten Adern (Telefonkabel) in existierenden Gebäuden generierte eine hohe Nachfrage für die 10BaseT-Technologie. Aber 10BaseT erlaubt nur Distanzen von 100 m zwischen einem Ethernet-Hub und einem Endgerät. Außerdem verhält es sich sehr anfällig bei elektrischem Rauschen auf dem Kabel – im Gegensatz zum traditionellen Koaxkabel. Abgeschirmte Kabel mit verdrehten Adern sind besser geeignet bei Umgebungen mit elektrischen Störungen. Ethernet mit abgeschirmten Kabeln und verdrehten Adern zu nutzen, ist nicht offiziell in einem Standard definiert.

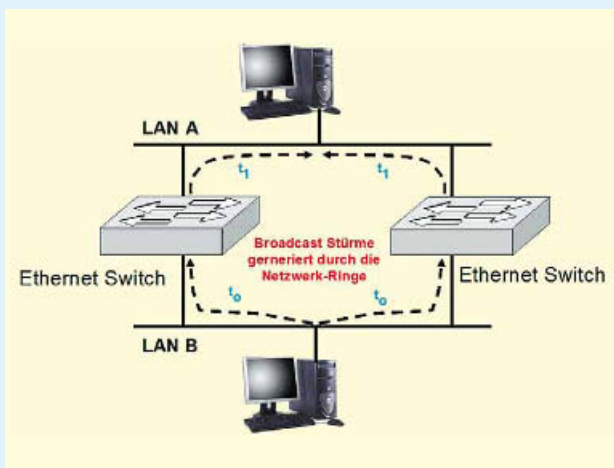
Die Einführung des Standards IEEE 802.3j (10BaseFL) eliminierte einige der 10BaseT-Mängel. Der Standard ist im Grunde 10BaseT, das mit Lichtwellenleitern arbeitet. Aber es überbrückt Distanzen von bis zu 2000 m und ist komplett geschützt gegenüber äußeren elektrischen Einflüssen. Das macht 10BaseFL extrem attraktiv für Bereiche mit elektromagnetischen Einflüssen. Lichtwellenleiter sind sehr schwierig abzugreifen und bieten so auch ein gewisses Maß an Sicherheit. Mit einer max. Länge von 2000 m ist das 10BaseFL sehr gut geeignet für die Kommunikationsverbindung zwischen zwei Gebäuden mit großen Distanzen.

Wie schon erklärt, wurde das Original-Ethernet als Bus-Topologie über Koaxkabel als Punkt-zu-Multipunkt-Verbindung entwickelt. Auf der anderen Seite bilden die verdrehten Adern und Lichtwellenleiter aus der Sicht des OSI Physical Layer eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung. Diese brauchen einen Multi-Port-Repeater, den Ethernet-Hub, als Verbindung von mehreren Geräten (Bild ③) gleichzeitig. Der Ethernet-Hub arbeitet als Physical Layer des OSI-Modells.

Logischerweise erscheint so die Stern-Topologie als Bussystem. Wenn ein Gerät sendet, überträgt der Ethernet-Hub das Datenpaket an die anderen Teilnehmer. Damit ist es weiterhin möglich, dass Kollisionen auftreten. Ethernet-Hubs besitzen allerdings automatische Trennungen, die spezielle Ports umgehen können, die offen oder fehlerhaft sind. Diese Möglichkeit isoliert einen Fehler solange, bis er behoben ist. Das bedeutet, dass im Fehlerfall einzelne Geräte einfach abgetrennt werden können, bis das Netzwerk wieder funktionsfähig ist. Gewöhnlich zeigt der Ethernet-Hub durch eine LED-Anzeige, welcher Teilnehmer ein Problem hat und erlaubt dem Service eine schnelle Fehlerbeseitigung. Das zeitaufwändige Suchen nach dem Ort des Problems wird eliminiert und macht das Stern-Netzwerk fehlersicherer gegenüber dem linearen Koaxkabel-Netzwerk, in dem beim Auftrennen einer Verbindung der gesamte Datenverkehr gestört ist. Somit ist es sehr unwahrscheinlich, dass irgendein Gerät das gesamte Netzwerk lahm legen kann. Ist aber der Ethernet-Hub gestört, wird auch das gesamte Netzwerk gestört sein. Der Hub ist mithin auch ein Single Point of Failure im Industrie-Netzwerk.

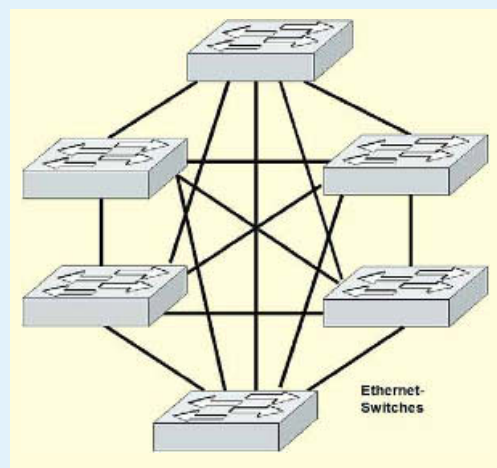
Folglich setzt auch das Industrie-Ethernet-Stern-Netzwerk ein zusätzliches zweites Stern-Netzwerk als Redundanz ein. Wie schon beim industriellen Ethernet-Koaxkabel-Netzwerk wird im Fehlerfall einfach auf das Backup-Netzwerk umgeschaltet.

Durch das Stern-Netzwerk werden mehr Kabel als im Koax-Netzwerk benötigt, die aber viel



4 Netzwerk-Ring

5 Vermaschtes Netzwerk (Mesh)



einfacher zu installieren, zu verwalten und zu warten sind. Die Nutzung von abgeschirmten Kabeln mit verdrehten Adern oder der Einsatz von Lichtwellenleitern schützt gegen äußere elektro-magnetische Einflüsse. Da das Abtrennen eines Gerätes keinen Einfluss auf das restliche Netzwerk hat, ist ein einfaches Umstecken eines Gerätes an eine andere Stelle im Netzwerk möglich. Stern-Topologien können zu einer Baumstruktur erweitert werden, wobei ein Hub mit einem anderen Hub verbunden wird.

#### 4 Kollisionen

Durch das Hinzufügen von zusätzlichen Geräten an das Netzwerk oder durch das Übertragen von größeren Datenmengen einzelner Teilnehmer, können häufiger Kollisionen auftreten, die eine Verschlechterung der Netzwerk-Performance hervorrufen. Die einfachste Methode zur Minimierung der Kollisionen ist die Festlegung von Bandbreiten. Je höher die Übertragungsgeschwindigkeit, desto schneller ist das Netzwerk wieder frei für die nächste Übertragung. Heutige Ethernet-Übertragungsgeschwindigkeiten besitzen eine Bandbreite von 10 Mbit/s bis zu 10 Gbit/s. Die schnelleren Standards sind Fast Ethernet (IEEE 802.3u, 100BaseT) mit 100 Mbit/s, Gigabit-Ethernet (IEEE 802.3z) mit 1000 Mbit/s und Gigabit-Ethernet (IEEE P802.3ae) mit 10 Gbit/s.

Eine andere Methode zur Minimierung der Kollisionen ist die Segmentierung des Netzwerks, sodass sich weniger Geräte um eine Übertragung bewerben. So genannte Bridges isolieren den Netzwerk-Verkehr durch selektives Filtern von Datenpaketen zwischen den Segmenten und erlauben nur das Übertragen von Paketen für das Segment. Dies minimiert die Kollisionen und steigert bedeutsam den Durchsatz in jedem Segment und über das gesamte Netzwerk. Die Bridge erkennt das Ziel- und das Quellen-Segment. Sind die Segmente identisch, so wird das Paket fallen gelassen. Sind die Segmente unterschiedlich, so wird das Paket zum richtigen Segment weitergeleitet. Zusätzlich werden keine schlechten

oder fehlerhaften Pakete weitergeleitet. Solche Multi-Port-Bridges werden auch Ethernet-Switches genannt.

Das CSMA/CD-Ethernet wurde als Halb-Duplex-Protokoll entwickelt, sodass nur ein Gerät zu einer Zeit Daten übertragen kann. Ein Voll-Duplex-Protokoll erlaubt einem Gerät, jederzeit Übertragungen zu jedem anderen Gerät durchzuführen. Dadurch entsteht eine kollisionsfreie Umgebung. Das Voll-Duplex-Protokoll verdoppelt also die Übertragungsrate dadurch, dass ein Gerät zur gleichen Zeit Daten senden und empfangen kann: Wenn ein Voll-Duplex-Gerät mit 10 Mbit/s sendet und zur gleichen Zeit mit 10 Mbit/s empfängt, bedeutet dies eine effektive Übertragungsrate von 20 Mbit/s. Für das Ethernet mit Voll-Duplex-Protokoll wird das normale CSMA/CD-Protokoll übergangen, um zwei Geräten die Kommunikation über eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zu erlauben. Die Geräte an einem Stern-Netzwerk kommunizieren in einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung immer über Switches und niemals direkt miteinander. Aber Switches können zusätzlich zu den verdrehten Kabeln oder Lichtwellenleitern auch separate Leitungen für das Senden und Empfangen von Daten verwenden. Das Voll-Duplex-Protokoll für das Ethernet würde 1997 mit der Release des Standards IEEE 802.3x möglich.

Die Netzwerk-Segmentierung mit großer Bandbreite und Voll-Duplex-Protokoll verbesserte die deterministische Performance des Ethernet-Netzwerks. Aber all diese Verbesserungen helfen nicht beim Problem des Single Point of Failure. Mit den Switches als Single Point of Failure benötigen die industriellen Ethernet-Stern-Netzwerke immer noch den Einsatz eines separaten zweiten Netzwerks als redundantes Backup.

#### 5 Vermaschte Topologie (Mesh)

Die Stern-Topologie eliminiert den Single Point of Failure auf einen gemeinsamen Draht. Aber wenn ein Switch/Hub ausfällt, wird das Netzwerk gestört. Um dies zu beseitigen, wird ein zweiter zusätzlicher Backup-Switch zwischen den Segmenten benötigt.

Durch den zusätzlichen Switch entsteht ein Netzwerk-Ring (Bild 4). Wenn solch ein Ring vorhanden ist, sehen manche Switches im Netzwerk die Geräte auf beiden Seiten. Dieser Zustand verwirrt die grundsätzlichen Bridge-Weiterschalt-Algorithmen und erlaubt die Weitergabe von doppelten Frames. Das führt zu einer Explosion von Datenverkehr auf dem Netzwerk (so genannte Broadcast-Stürme) und verschlechtert die Netzwerk-Performance. Damit das Netzwerk richtig funktioniert, darf nur ein aktiver Weg zwischen zwei Geräten existieren. Um Netzwerk-Ringe zu verhindern, aber trotzdem ein redundantes Netzwerk aufbauen zu können, wird das Spanning Tree Protokoll (STP) 802.1d eingesetzt. Es erlaubt den Switches und den Geräten in jeder gewünschten Art und Weise miteinander verbunden zu sein und sortiert automatisch die Ring-Konfigurationen aus. Ein Nachteil des STP ist die schlechte Reaktionszeit von ca. 30 s auf einen Fehler. Diese Zeit zur Überbrückung des Fehlers ist für industrielle Ethernet-Netzwerke in Echtzeit-Anwendungen nicht akzeptabel. Zur Vermeidung dieser Limitierung wurde das Rapid Spanning Tree Protokoll (RSTP) entwickelt und im IEEE-Standard 802.1w spezifiziert. Obwohl die RSTP-Umschaltzeit manchmal mit 3...5 s angegeben wird, kann sie richtiger Planung des Netzwerkes unter 1 s liegen.

Mit RSTP und einem Single-Ethernet-Netzwerk lässt sich eine funktionale Redundanz aufbauen. Dieses redundante Switched-Ethernet-Netzwerk kann den gesamten Bereich vom einfachen Ring bis hin zum vermaschten Netzwerk (Mesh) abdecken. In einer vermaschten Netzwerk-Topologie hat jedes Geräte im Netzwerk redundante Kommunikationswege (Bild 5).

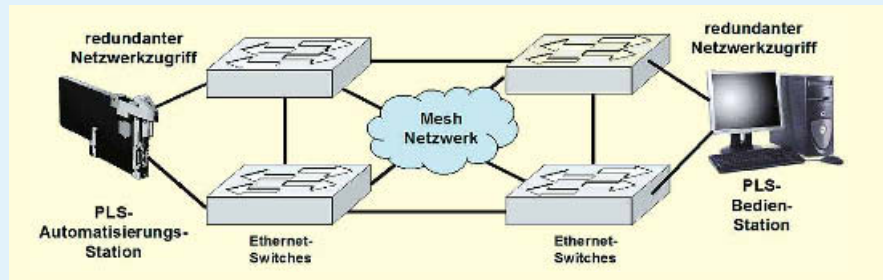
Sollte im vermaschten Netzwerk irgendein Kabel, ein Switch oder eine andere Komponente ausfallen, so können die Daten über alternative Wege automatisch weitergeleitet werden. Industrielle-Mesh-Netzwerke werden so aufgebaut, dass kein Single Point of Failure entstehen kann. Es wird ein Netzwerk eingesetzt, das den hohen Grad an Fehler-sicherheit erfüllt, die industrielle Ethernet-Netzwerke mit Echtzeit-Anwendungen benötigen.

## 6 Redundanter Netzwerkzugriff

Die Mesh-Topologie bietet eine ausgezeichnete Netzwerk-Redundanz mit Umschaltzeiten unter 1 s. Endgeräte in kritischen Industrieanwendungen, wie zum Beispiel Prozessleitsystem-Stationen, müssen auch redundante Schnittstellen zum Netzwerk aufweisen können (Bild 6). Ohne den redundanten Netzwerkzugriff wird das Gerät zum Single Point of Failure. Der redundante Netzwerkzugriff muss automatisch und transparent für die Anwendung sein. Wenn ein Netzwerkfehler auftritt, muss das Gerät automatisch den Fehler erkennen und auf den alternativen Backup-Kommunikationsweg umschalten können.

Während die augenblickliche Liste der Standards und Netzwerkprotokolle, so auch TCP/IP, ausgezeichnete End-to-End-Fehlererkennungen und Fehlerbearbeitung vorweisen können, bieten sie dennoch keinen redundanten Netzwerkzugriff. Es gibt eine Standardisierung für einen redundanten Netzwerkzugriff durch die Foundation Fieldbus Organisation für High Speed Ethernet HSE. Dieser Ansatz ist aber nicht transparent. Ein transparenter, redundanter Netzwerkzugriff erlaubt jeder älteren Applikation, sich in ein Mesh-Netzwerk integrieren zu lassen.

Invensys Foxboro lieferte Ende 2004 die ersten I/A-Series-Prozessleitsysteme mit der neuen Mesh-Netzwerk-Architektur an die Kunden aus. Diese Technologie eliminierte die Collision-Domain-Probleme und brachte dem System eine neue flache Systemarchitektur mit einer Übertragungsrate bis zu 1 Gbit/s. Das bedeutete eine Steigerung der maximalen Anzahl von Prozess-Stationen und eine enorme Verbesserung der Netzwerk-Performance.



6 Industrielle Geräte mit redundantem Netzwerkzugriff

## 7 Fazit

Mit der Einführung der Standard-Ethernet-Technologie, wie Rapid Spanning Tree (IEEE 802.1w), Voll-Duplex (IEEE 802.3x) und High Speed Ethernet (IEEE 802.3u, 802.3z, 802.3ae) können die Ethernet-LANs jetzt als hoch verfügbare, deterministische, selbst-reparierende, redundante und vermaschte (mesh) Netzwerke aufgebaut werden. Gekoppelt mit den Geräten, die transparente und redundante Netzwerkzugriffe vorweisen können, wird das Ethernet zu einem High-Performance-Netzwerk mit redundanten Kommunikationswegen und Umschaltzeiten im 100-ms-Bereich. Basierend auf dem offenen Standard (OSI) reduziert dieses Ethernet-Netzwerk die Life-Cycle-Kosten durch die Migration von einem teuren proprietären Netzwerk zum Low-Cost-Standard-Netzwerk, das einfach zu handhaben ist. Dieses neue Netzwerk bietet eine Infrastruktur für den Einsatz zwischen den Echtzeit-Applikationen der Produktionsanlagen und den Geschäftsprozessen der Unternehmensleitreechner.

### Literatur

- [1] Seifert, R.: The Switch Book: The Complete Guide to LAN Switching Technology. John Wiley & Sons, Danvers, MA, June 2000.

- [2] Spurgeon, Ch. E.: Ethernet The Definitive Guide. O'Reilly & Associates, Inc., Sebastopol, CA, Feb 2000.

- [3] Gala, M.; Pozzuoli, M.: Redundancy in Substation LANs with the Rapid Spanning Tree Protocol (IEEE 802.1w). RuggedCom, Inc., Concord Ontario Canada.

- [4] Mackay, St.: Foundation Fieldbus High Speed Ethernet (HSE) and TCP/IP. IDC Technologies, Perth, Australia, 2003.

- [5] Gendreau, R.: The Ethernet Mesh. Invensys Systems Foxboro, MA 02035, 2004.

- [6] IEEE Std. 802.1D, IEEE standard for local and metropolitan area networks. Common specifications—Media access control (MAC) Bridges, 1998 Edition (ISO/IEC 15802-3:1998).

- [7] IEEE Std. 802.1w-2001, Part 3: Media Access Control (MAC) Bridges – Amendment 2 – Rapid Reconfiguration [Amendment to IEEE Std 802.1D, 1998 Edition (ISO/IEC 15802-3:1998) and IEEE Std 802.1t-2001].

- [8] IEEE Std. 802.3-2002 Edition (Incorporating IEEE Std 802.3, 1998 Edition, IEEE Std 802.3ac – 1998, IEEE Std 802.3ab – 1999, and IEEE Std 802.3ad – 2000) Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications.

- [9] [www.parc.xerox.com/about/history/default.html](http://www.parc.xerox.com/about/history/default.html)

- [10] [www.ieee.org/organizations/history\\_center/legacies/metcalfe.html](http://www.ieee.org/organizations/history_center/legacies/metcalfe.html)