

# Verteiltes Steuerungssystem auf Basis horizontaler Sensor-Aktor-Kommunikation über TCP/IP

o. Prof. Dr.-Ing. D. Spath;  
Dipl.-Ing. R. Landwehr;  
Dipl.-Ing. Chr. Gönnheimer  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk), Universität Karlsruhe (TH),  
Kaiserstraße 12, 76128 Karlsruhe

## **Decentral Control System with horizontal communication via TCP/IP**

Ethernet-TCP/IP reaches a new weight of importance in industrial control applications. But for real time applications many adaptations have to be made. This paper gives an overview which restrictions have to be overridden, which solutions exist and what are the further aims.

Ethernet, TCP/IP, Communication, UDP/IP, EMC; ESD, non-hierarchical Control Systems

## **1 Problem- und Prozessbeschreibung**

### **1.1 Dezentralisierung in der Automatisierungstechnik**

Die Globalisierung der Märkte und die Verkürzung von Produktentwicklungszyklen zwingen die Produktionstechnik zu einer verstärkten Automatisierung von Produktionssystemen, die auf Basis von kleinen Einheiten automatisierte Systeme immer mehr zusammenwachsen lässt. Daraus leitet sich der seit Jahren nachvollziehbare Trend zur Dezentralisierung in der Industrieautomation ab.

Die rasante Entwicklung in der Mikroelektronik und der Informationstechnologie ermöglicht bereits heute für Sensoren, Aktoren und Bediengeräte eine Informationsverarbeitung vor Ort. Hierdurch eröffnen sich neue Möglichkeiten zur strukturellen und funktionellen Gestaltung von Steuerungssystemen.

Als Folge einer zunehmenden Dezentralisierung und des dadurch entstandenen zusätzlichen Informationsbedarfs in Maschinen und Anlagen ist ein stetig anwachsendes Datenaufkommen zu verzeichnen. Alternative Konzepte, die das Datenaufkommen dezentraler Automatisierungssysteme verringern können, werden daher zunehmend an Bedeutung gewinnen.

### **1.2 Evolution in der Informationstechnologie**

Als die wichtigsten, treibenden Faktoren für den Evolutionsprozess in der Informationstechnologie gelten:

- Leistungsexplosion und Preisverfall im Hardware-Bereich
- Vernetzung zwischen Systemen
- Fortschritte in der Softwaretechnik
- Abkehr von hierarchischen Strukturen

### **1.3 Betreibermodelle im Anlagenbau**

Auf dem Markt der Anlagentechnik gewinnt der Trend zum Leasen der Anlage zunehmend an Bedeutung. Dabei wird dem Hersteller nur der Produktionswert der Anlage vergütet, gemessen an der Verfügbarkeit. Das Risiko der Verfügbarkeit der Anlage soll damit vom Betreiber auf den Produzenten der Anlage übergehen. Dies senkt das Investitionsrisiko des Betreibers der Anlage.

### **1.4 Informationssysteme im Anlagenbau**

Die oben beschriebenen Trends erfordern somit einen Paradigmenwechsel in der Kommunikation zwischen Automatisierungssystemen. Die heutige Vielfalt an Bussystemen (Feldbusse, Controlbusse, Ethernet, Token Ring etc.) in Automatisierungssystemen kann den notwendigen, durchgängigen Informationsfluss von der Leitebene bis zum Sensor und umgekehrt nicht leisten.

### **1.5 Zusammenfassung**

Zu einer Verbesserung der Kommunikation zwischen vollständig dezentralisierten Steuerungssystemen und des einheitlichen Zugriffs auf die Komponenten der Anlage auch über das Internet kann in der Automatisierungstechnik ein einheitliches Protokoll auf einem einheitlichen Bussystem beitragen.

## **2 Stand der Technik**

### **2.1 COM/DCOM**

Das Component Object Model (COM) ist eine Technologie von Microsoft. Mit COM ist es möglich, verteilte Anwendungen zu entwickeln. Diese Anwendungen können auf einem oder mehreren Rechnern innerhalb eines Netzwerkes verteilt sein. Sind Teile der Anwendungen auf mehreren Rechnern lokalisiert, spricht man von Distributed Component Object Model (DCOM).

Aufbauend auf der COM/DCOM-Technologie wurden die folgenden, weiteren Anwendungen geschaffen:

- Object Linking and Embedding (OLE) ist die Bezeichnung einer Infrastruktur für die Kommunikation von Büroapplikationen. Dadurch wird z. B. das Einbetten einer Grafik in Textdokumente ermöglicht.
- ActiveX-Steuerelemente, welche auch auf OLE basieren, können Softwaremodule für andere Anwendungen zugänglich machen. Diese Steuerelemente werden ähnlich wie Java-Applets genutzt, d. h. sie werden in eine HTML-Seite eingebettet und finden insbesondere innerhalb eines Browsers Verwendung.
- OLE for Process Control (OPC), welches seinerseits auf OLE aufbaut, ist eine offene Schnittstelle, über die PC-basierte Softwarekomponenten Daten aus-

tauschen. Dadurch ist die Kommunikation von Büroapplikationen mit Feldgeräten der Automatisierungsebene möglich.

## **2.2 OPC (OLE for Process Control)**

Der Einsatz von Software spielt in der Automatisierungstechnik eine immer bedeutendere Rolle. In der Bedienung, Visualisierung, Archivierung oder Steuerung, ist der Trend zu reinen, meist PC-basierten Softwarelösungen unübersehbar. In den letzten Jahren hat OPC, ein neuer Kommunikationsstandard in der Automatisierungsindustrie, Einzug gehalten und wird immer mehr für Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) und Human Machine Interface (HMI) -Systeme eingesetzt.

## **2.3 Vergleich von DCOM und CORBA**

Die Ansätze von COM/DCOM und CORBA sind objektorientiert und gehen von einem mehrschichtigen Objektmodell aus. Das Verhalten der Objekte wird durch Schnittstellen festgelegt, welche durch eine spezielle Interface-Beschreibungssprache definiert sind. Die Aufrufe werden mittels Client- und Server-Stubs ausgeführt, wobei das übertragene Datenformat einer speziellen Transfersyntax unterliegt und zwischen Client und Server ein spezielles Protokoll vereinbart ist. Da die Aufrufe orttransparent erfolgen, existiert in beiden Modellen ein Verzeichnisdienst, welcher die Referenzen der aufzurufenden Objekte enthält. Prinzipbedingt gibt es somit Gemeinsamkeiten zwischen den beiden Ansätzen.

Das jedoch bedeutendste Unterscheidungsmerkmal ist die Tatsache, dass COM/DCOM eine Implementierung spezialisiert auf Windows-Betriebssysteme ist, wohingegen CORBA ein von der OMG definierter Standard für verteilte Anwendungen ist, unabhängig vom Hersteller des Betriebssystems und für zahlreiche Sprachen erhältlich. Bei COM/DCOM steht die Wiederverwendung binärer Komponenten im Mittelpunkt, während bei CORBA die Verteilung von Objekten in einem Netzwerk fokussiert wird.

## **2.4 Ethernet in der Automatisierungstechnik**

Immer mehr Steuerungshersteller erkennen die Potenziale des Einsatzes von Ethernet in der Industrieautomation und brachten in den letzten 16 Monaten zahlreiche Ethernet-Steuerungstechnik-Komponenten auf den Markt. Das Bürokommunikationsnetzwerk Ethernet ermöglicht somit ein durchgängiges Netz von der Leitebene über die Steuerung bis zum Sensor und Aktor.

Der Begriff Ethernet ist die Bezeichnung für eine weit verbreitete, standardisierte Kommunikationsinfrastruktur mit verschiedenen Kommunikationsmedien und Datenübertragungsraten. Als Medium stehen Koaxialkabel, Zweidrahtleitungen, Lichtwellenleiter oder Funkverbindungen zur Verfügung, die Übertragungsraten haben sich im Laufe der letzten zehn Jahre in mehreren Schritten mit jeweiliger Verzehnfachung von 10 MBit/s (klassisches Ethernet) auf mittlerweile 10 GBit/s (10 GBit Ethernet) erhöht. Dazwischen liegen das Fast-Ethernet mit 100 MBit/s und das Gigabit Ethernet (1 GBit/s).

## **2.5 Vorteile von TCP/IP**

Durch den Einsatz von Ethernet in der Automatisierungstechnik wird eine vollständige, durchgängige Vernetzung von der Leit- über die Zellen- zur Feldebene erreicht,

so dass ein einheitlicher Durchgriff vom System auf die im Feld verteilten installierten Geräte gewährleistet wird. Für den Anwender bedeutet dies, dass er sich in der Automatisierung nicht länger mit unzähligen Produktvarianten und herstellerspezifischen Lösungen abfinden und sich nicht um deren Kompatibilität kümmern muss.

Bedingt durch den Wegfall proprietärer Technologien seitens der Hersteller hat der User eine größere Auswahl von Produkten, da er sich nicht mehr für eine herstellereigene Lösung entscheiden muss. Dies macht sich ebenfalls in den Anschaffungs- und Wartungskosten bemerkbar.

Aufgrund der großen Verbreitung von Ethernet in der Office-Welt als Standardkommunikationsmedium und der damit verbundenen günstigen Hardwarekosten der Peripherie (zum Beispiel Netzwerkkarte, Kabel) wird dieses Bussystem auch für die Industrie interessant. Es bietet sich die Möglichkeit, die teuren Speziallösungen durch preiswerte Ethernetkomponenten zu ersetzen. Aufgabe der Steuerungsentwicklung ist es, die erforderlichen Hard- und Softwarestandards, wie auch zum Beispiel TCP/IP und HTTP als Basis für die Automation anzuwenden und weiterzuentwickeln.

## 2.6 SOAP

Motiviert von dieser Problematik wurde das Simple Object Access Protocol (SOAP) entwickelt. An der vom World Wide Web Consortium (W3C) veröffentlichten Spezifikation von SOAP 1.1 sind unter anderem Hersteller wie Microsoft und IBM beteiligt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass dieser Protokollstandard eine größere, firmenübergreifende Unterstützung erhalten wird.

Eines der Leitmotive von SOAP ist, nicht eine neue Technik zu entwickeln, sondern die vorhandene Technik besser auszunutzen. SOAP stützt sich auf zwei bereits etablierte und weit verbreitete Protokolle und zwar auf HTTP und die Extensible Markup Language (XML).

SOAP ist eine Protokollspezifikation, welche einen einheitlichen Weg beschreibt, wie RPCs ausgeführt werden. Hierzu wird HTTP als Transportprotokoll verwendet und XML als Format für die zu serialisierenden Daten.

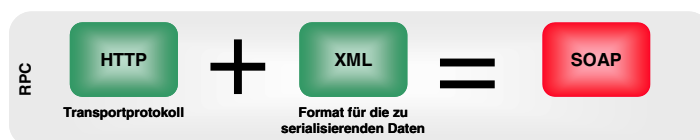


Abbildung 1: Aufbau des Simple Access Protocols

## 2.7 XML

Die Extensible Markup Language (XML), welche in den Jahren 1996 und 1997 von einem Expertenteam des W3C ausgearbeitet wurde, hat in den letzten Jahren ein großes Interesse hervorgerufen und hat sich aufgrund einer enormen Akzeptanz in der Industrie zu einer wichtigen Sprache, insbesondere im Zusammenhang mit Internettechnologien, herausgebildet.

XML geht aus der zwischen den Jahren 1978 bis 1986 entwickelten Standard Generalized Markup Language (SGML) hervor, welche von der International Organization for Standardization (ISO) in der ISO 8879 umgesetzt wurde. Da SGML jedoch aufgrund der Komplexität und der damaligen Computertechnologie keine große Akzeptanz und Verbreitung erreicht hatte, wurde sie zu XML modernisiert. Die Zielsetzung

dabei war es, aufgrund der Modifikationen, einen ähnlichen Durchbruch zu erzielen, den die Hypertext Markup Language (HTML) wenige Jahre vorher bei der enormen Verbreitung des Internets erreicht hatte.

Die Hauptmerkmale von XML, welche auch ein Grund für den enormen Erfolg dieser Sprache waren, sind folgendermaßen gekennzeichnet:

- XML basiert auf der Textform, d. h. die Darstellung der Informationen erfolgt wie auch in HTTP und HTML mit dem ASCII-Zeichensatz. Dadurch ist XML einfach lesbar und transparent. Des weiteren ist eine gute Portabilität gewährleistet, da die Textform in diesem Aspekt binären Strukturen überlegen ist.
- In XML wird der Inhalt eines Dokumentes von seiner Formatierung getrennt. Es steht nicht im Mittelpunkt, wie Daten dargestellt werden, sondern welche Bedeutung sie haben. Ein reines XML-Dokument ist also im Gegensatz zu einer HTML-Seite darstellungsneutral. Mittels einer Transformation kann der Inhalt eines XML-Dokumentes jedoch in den unterschiedlichsten, gewünschten Formatierungen dargestellt werden.
- Das Format von XML ist sehr flexibel und erweiterbar. Es können auf unzweideutige Weise beliebige und benutzerdefinierte Elemente hinzugefügt werden.
- Die Struktur eines XML-Dokumentes kann eindeutig spezifiziert und standardisiert werden, woraus folgt, dass XML-Dokumente validierbar sind. Dadurch ist eine zuverlässige maschinelle Verarbeitung gewährleistet.

### **3 Neuer Lösungsansatz**

XML bietet einen frei erweiterbaren Standard, um Daten jeglicher Art strukturiert zu beschreiben. XML wird über das Protokoll des WorldWideWebs (HTTP) übertragen und kann daher im Gegensatz zu CORBA und COM Firewalls durchdringen.

Das Simple Object Access Protocol (SOAP) bietet die Möglichkeit, Daten und Funktionsaufrufe über Betriebssystemgrenzen hinweg mittels TCP/IP und HTTP zu übertragen. Das Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe entwickelt Software und Hardware in diesem Bereich.

## **4 $\mu$ -Webcontroller**

### **4.1 Motivation**

Der Ansatz einer vollständigen, vertikalen Integration von der Leit- bis in die Feldebene setzt eine leistungsfähige und zugleich kostengünstige Anbindung auch der kleinsten Steuerungselemente wie Sensoren und Aktoren an Ethernet voraus. Dies erfordert die Entwicklung geeigneter Interfaces, welche die Sensorinformationen in TCP/IP verpackt im Netzwerk bereitstellen, bzw. für einen Aktor bestimmte TCP/IP-Pakete einlesen und entpacken.

Hierzu werden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe geeignete  $\mu$ -Webcontroller und Webserverhaltungen entwickelt.

Im Folgenden wird ein ausgewählter Hardwareansatz vorgestellt, welcher sich durch seine geringen Abmessungen und niedrigen Herstellungskosten besonders zur Integration auch in einfachste Sensor/Aktor-Komponenten eignet.

## 4.2 Hardwarekonzept des $\mu$ -Webcontrollers

Der Hardwareaufbau besteht aus einem Mikrocontroller, welcher einen externen Ethernet-Controller steuert. Für den Aufbau wurde ein 8 Bit CMOS Flash Controller gewählt, welcher über eine RISC (Reduced Instruction Set Computer)-CPU verfügt und mittels In-Circuit-Serial-Programming (ICSP) programmiert werden kann. Für Ein- oder Ausgabeoperationen stehen mehrere analoge und digitale Ports zur Verfügung. Der verwendete Ethernet-Controller überträgt und empfängt Ethernet-Frames nach der Norm IEEE 802.3. Die Übertragung erfolgt über Twisted-Pair Leitungen mit einer Datenrate von 10 bzw. 100 MBit/s.

Die folgende Abbildung zeigt das Hardwarekonzept des  $\mu$ -Webcontrollers.

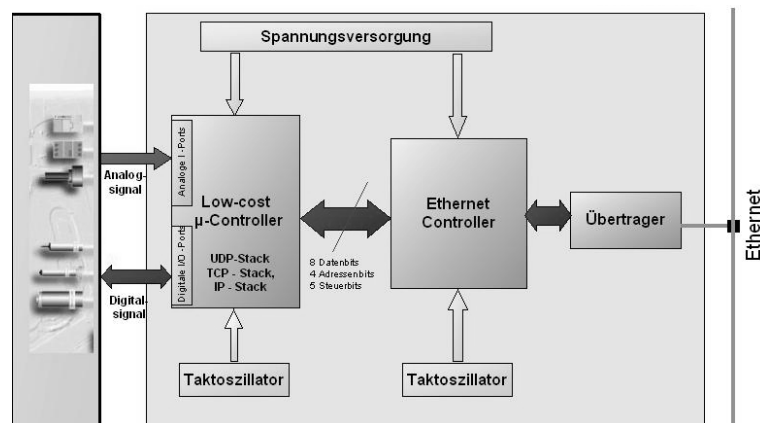


Abbildung 2: Hardware des  $\mu$ -Webcontrollers

## 4.3 Programmierung und Software

Wie bereits beschrieben, verfügt der Mikrocontroller zum Ablegen der Programme über einen Flash-Speicher, der mittels In-Circuit-Serial-Programming (ICSP) beschrieben werden kann. Dies unterstützt neben einer einfachen Programmierung auch jederzeit entsprechende Programmupdates.

Der Ethernet-Controller überwacht den Ethernet-Datenverkehr und analysiert die Ethernet-Pakete hinsichtlich der Empfangsadresse. Ist die Meldung an den Controller adressiert oder handelt es sich um eine sogenannte Broad- oder Multicastmeldung, also eine Meldung für mehrere Teilnehmer, so wird das empfangene, im Speicher stehende Paket von den Ethernet-Rahmendaten getrennt, die dann wieder gelöscht werden. Die verbleibenden Informationen beinhalten die Nutzdaten, eingebettet in das verwendete Protokoll aus Layer 3 des ISO/OSI –Modells, hier das IP-Protokoll.

Der Ethernet-Controller löst daraufhin einen Interrupt aus, der vom Programm im Flash des Mikrocontrollers erkannt wird. Darauf folgt die Weiterleitung der Nutzdaten. Die IP-Rahmendaten werden im Mikrocontroller ausgewertet und gespeichert. Übrig bleiben die Nutzdaten, welche dem Protokoll des Layers 4 entsprechen.

Die Hardware verfügt über einen integrierten UDP- sowie einen TCP-Stack. Die Nutzdaten werden aus dem UDP- bzw. TCP-Frame extrahiert. In ihnen sind die eigentlichen Steuerungsinformationen in Form von Befehlen abgebildet, welche Ein- und Ausgänge beeinflussen bzw. verarbeiten.

Die Bereitstellung der Nutzdaten auf dem Ethernet beim Sendevorgang erfolgt durch „Verpacken“ der Daten in UDP- bzw. TCP-Frames im Mikrocontroller. Diese werden

wiederum in einen IP-Frame gepackt, welcher an den Ethernet-Controller weitergegeben wird. Dort wird diesem IP-Paket selbständig ein Ethernet-Header vorangestellt und das Gesamtpaket auf den Ethernetbus ausgegeben. Im Falle einer Kollision auf dem Netz übernimmt der Controller die Wiederholung des Sendevorgangs.

Des Weiteren muss hierzu der CS8900A durch den PIC entsprechend initialisiert werden. Unter anderem muss der PIC dem Ethernet-Controller die MAC-Adresse über den Datenbus mitteilen, die dort im Speicher abgelegt wird. Erst dann kann der CS8900A an ihn adressierte Ethernet-Pakete empfangen oder eigene senden.

Zum Monitoring und zur Diagnose bzw. Fernzugriffszwecken auf Sensor/Aktor-Komponenten kann in das Programm zusätzlich ein HTTP-Stack integriert werden, um beispielsweise eine HTML-Seite abzulegen, die direkt in einem Webbrowser relevante Informationen benutzergerecht darstellt.

Ein weiterer Schritt ist die XML-Implementierung, um dessen Funktionen in Verbindung mit HTTP, auch als SOAP bezeichnet, zu nutzen.

Die folgende Abbildung zeigt den Hardwareaufbau und verdeutlicht die Größe des  $\mu$ -Webcontrollers.

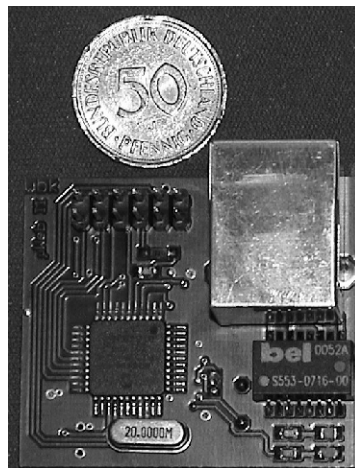


Abbildung 3: Aufbau des  $\mu$ -Webcontrollers

## 5 Ethernet und EMV im Fabrikumfeld

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 425 werden an der Universität Karlsruhe im Teilbereich „EMV in der Fabrik“ die Auswirkungen elektromagnetischer Störungen auf verteilte Steuerungssysteme in Fertigungsanlagen untersucht und grundlegende Methoden zur Gestaltung störffester Systeme entwickelt.

Ziel der Untersuchungen ist die Steigerung der Funktionszuverlässigkeit und effektiven Nutzbarkeit moderner Produktionsanlagen durch die Verbesserung der elektromagnetischen Verträglichkeit.

Innerhalb des Teilprojektes „EMV von verteilten Steuerungssystemen in Fertigungsanlagen“ wurden Störfestigkeitsmessungen an ausgewählten Bussystemen durchgeführt. Dazu wurden zwei SPS-Steuerungen über Feldbussysteme sowie Ethernet miteinander vernetzt. Die Steuerungen wurden auf einen zyklischen Austausch von Datenpaketen programmiert, aus denen entsprechende Signalmuster am Ausgang generiert wurden. Die Ausgangssignale wurden auf Fehler überwacht und beim Auftreten des Fehlers die Frequenz und Feldstärke des Störsignals geloggt.

Der erste Teil der Messungen wurde in Anlehnung an die EN 61000-4-6 mit einer Koppelzange durchgeführt, in der die Netzwerkleitungen der kommunizierenden SPS-Systeme mit unterschiedlichen Feldstärken gestört wurden. Die Messungen erfolgten im Bereich von 150 kHz bis 80 MHz mit sinusförmigem Störsignal. Dieses war zu 80 % mit 1 kHz Amplitudenmoduliert. Abweichend von der oben genannten Prüfnorm wurde die Generatorleistung dabei über den gesamten Frequenzsweep konstant gehalten. Die Angabe der Störfestigkeit erfolgt deshalb als dimensionsloser Faktor.

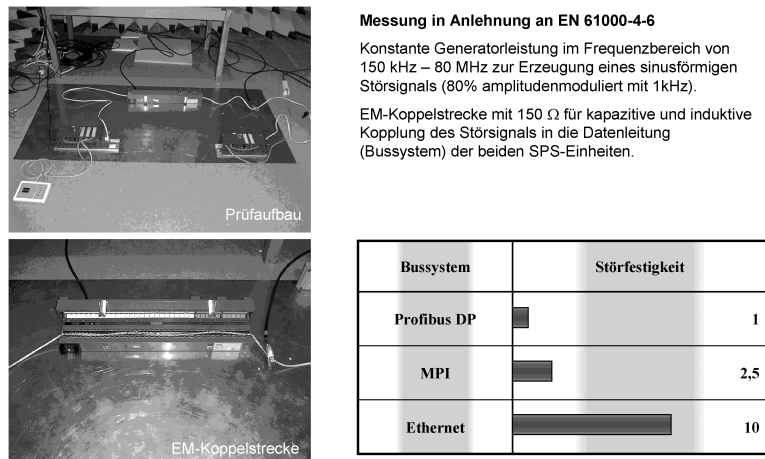


Abbildung 4: Störfestigkeitsmessungen mit Koppelzange

Das mit Ethernet-vernetzte Steuerungssystem zeigt bei dieser Art der Störeinkopplung im Vergleich zu den herkömmlichen Feldbussystemen wie Profibus oder MPI (Multi-Point-Interface) eine deutlich höhere Störfestigkeit. Es konnte bei den Messungen mit unterschiedlichen Kabeltypen eine durchschnittliche Erhöhung der Störfestigkeit um den Faktor 2,5 beim Einsatz eines MPI-Netzwerkes anstelle einer Profibus-Vernetzung festgestellt werden. Beim Einsatz eines Ethernet-Netzwerkes stellte sich eine Erhöhung um einen Faktor >10 heraus.

Um das Störverhalten im Bereich von 80 MHz bis 1 GHz näher zu untersuchen, wurde die Koppelzange durch eine Strip-Line ersetzt, die eine Störfestigkeitsmessung der Vernetzung in einem sehr homogenen Störfeld erlaubt. Diese Art der Störfestigkeitsprüfung findet häufig im Kfz-Bereich Anwendung. Der Verlauf der Netzleitung innerhalb der Strip-Line wurde aus Gründen der Reproduzierbarkeit gekennzeichnet.

## 6 Zusammenfassung

Moderne Produktionsanlagen benötigen eine Möglichkeit zum Monitoring und zur Fernwartung von einem entfernten Rechner. Dies macht einen informationstechnischen Durchgriff vom Leitreechner bis zum Sensor bzw. Aktor des Prozesses erforderlich. Die fehlende vertikale Integration der einzelnen, kleinsten Komponenten der Steuerungssysteme, der Aktoren und Sensoren, kann durch eine durchgängige Verwendung von Ethernet/TCP/IP überbrückt werden.

Grundlegende Untersuchungen am Institut im Bereich von Industrial Ethernet (=Ethernet + TCP/IP) beinhalten zum Einen die Verwendung von Switched Ethernet für quasi-echtzeitfähige Netze und zum Anderen die Ethernet-Schnittstellen auf der Applikations-Ebene des ISO/OSI Modells. Hierzu werden möglichst neutrale und offene Umsetzungen auf der Basis von XML (SOAP) definiert.



Der Ansatz einer vollständigen, vertikalen Integration von der Leit- bis in die Feldebene setzt eine leistungsfähige und zugleich kostengünstige Anbindung auch der kleinsten Steuerungselemente wie Sensoren und Aktoren an Ethernet voraus. Hierzu werden am Institut geeignete  $\mu$ -Webcontroller und Webserverhaltungen entwickelt.

Die Verwendung von Ethernet-TCP/IP bietet zusätzlich große Vorteile in der fehlertoleranten Übertragung der Steuerungsdaten. Dies ermöglicht hohe Verfügbarkeiten der Steuerungsnetze im EMV-belasteten Umfeld.

Die zu definierenden SOAP-Schemata ermöglichen sowohl eine einheitliche, horizontale Kommunikation auf Unternehmensebene als auch vertikale Kommunikation innerhalb des Unternehmen. Am Institut werden verschiedene Möglichkeiten entwickelt, ein Steuerungsnetz auf der Basis von Ethernet und TCP/IP dezentral zu steuern.

## 7 Quellen

- [1] Furrer, Frank J. Ethernet - TCP für die Industrieautomation : Grundlagen und Praxis, 2.Aufl., Heidelberg : Hüthig, 2000, ISBN 3-7785-2779-7
- [2] Johnson, Howard, W.: Fast Ethernet – Dawn of a New Network, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, N. J. 07458, USA, 1996, ISBN 0-13-352643-7
- [3] Ferrero, Alexis: The Eternal Ethernet, Addison – Wesley Longman. Inc. Reading, USA, 1999, ISBN 0-201-36056-X
- [4] Breyer, Robert; Riley Sean: Switched and Fast Ethernet, MacMillan Computer Publishing, Emeryville, USA 2nd Edition, 1999, ISBN 1-56276-426-8
- [5] <http://www.sfb425.uni-karlsruhe.de>
- [6] Martin, James; Leben, Joe: TCP/IP Networking – Architecture, Administration, and Programming, PTR Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, USA, 1994, ISBN 0-13-642232-2
- [7] Comer, Douglas: Internetworking with TCP/IP, Volume 1: Principles, Protocols, and Architecture. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 3.Auflage, 1995, ISBN: 0-13-216987-8
- [8] Wollert, Jörg: Echtzeiteigenschaften für Automatisierungsanwendungen mit Ethernet und TCP/IP, Tagungsband / SPS IPC Drives Nürnberg 2000, S. 124 - 132. 11. Fachmesse und Kongress 28. – 30. November 2000. Hrsg.: G.Brandenburg. Heidelberg : Hüthig. ISBN: 3-7785-2836-X
- [9] IEEE Std 802.3-1993 (Forth Edition, 1993-07-08): Carrier-Sense with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications, IEEE, N.J., 1993, ISBN: 1-55937-324-5
- [10] Spath, D., Gönnheimer, C., Landwehr, R.: Elektromagnetische Beeinflussung von Steuerungssystemen im industriellen Umfeld“, Hardwarelösung zur Vermeidung von Störeinkopplungen, EMV-ESD Elektromagnetische Verträglichkeit, Jahrgang 11, 09/2000, ISSN 0938-6420
- [11] Spath, D., Gönnheimer, C., Landwehr, R.: Ethernet-TCP/IP: Hindernisse, Lösungen und Chancen für ein neuartiges Steuerungsnetz, SPS/IPC/Drives - Elektrische Automatisierung – Systeme und Komponenten, Hüthig Verlag Heidelberg, ISBN 3-7785-2836-X
- [12] Spath, D.; Gönnheimer, C.; Landwehr, R.: EMV in der Automatisierungstechnik, SPS/IPC/Drives - Elektrische Automatisierung – Systeme und Komponenten, Hüthig Verlag Heidelberg, ISBN 3-7785-2836-X
- [13] Spath, D.; Gönnheimer, C.; Landwehr, R.: “Wenn der Antrieb den Feldbus nervt“, Fabriken stärker elektromagnetisch beeinflusst / Ethernet zeigt Potenzial EMV zu erhöhen, Zeitschrift Produktion, 10/2001, Verlag moderne Industrie
- [14] Spath, D., Relevanz von XML für aktuelle Trends des e-Manufacturing, XML in Action 2001, Kongressband zum internationalen Kongress vom 23.-25.04.2001, München
- [15] Spath D.; Gönnheimer, C.; Landwehr, R., Roboteransteuerung mit SOAP, XML in Action 2001, Kongressband zum internationalen Kongress vom 23.-25.04.2001, München