

Ethernet-TCP/IP:

Hindernisse, Lösungen und Chancen für ein neuartiges Steuerungsnetz

o. Prof. Dr.-Ing. D. Spath; Dipl.-Ing. R. Landwehr; Dipl.-Ing. Chr. Gönninger

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk)

Universität Karlsruhe (TH)

Kaiserstraße 12, 76128 Karlsruhe

Ethernet-TCP/IP: Restrictions, Solutions and possibilities for a novel automation Network

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.

1 Einleitung

Seit dem Übergang von fest verdrahteten Schütz- und Relaissteuerungen hin zu Frei- oder Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) Ende der 60er Jahre ergaben sich im Bereich der industriellen Automatisierungstechnik keine derart durchgreifenden Veränderungen mehr [1,2]. Alle Versuche, die klassische SPS-Technologie weiterhin zu verbessern, brachten lediglich Teilerfolge, die nicht mit den ständig steigenden Anforderungen der Automatisierungstechnik Schritt halten konnten. Doch der dramatische Wandel, der sich seit ca. zweieinhalb Jahren auf dem Automatisierungsmarkt abzeichnet, verspricht einen Paradigmenwechsel. Nach dem Durchbruch von Standardhardware und -software aus dem Massenmarkt „Office-PC“ in das bis dato von herstellereigenen, hardwareorientierten Systemen dominierte Angebot an Automatisierungsgeräten ergaben sich neue Chancen für Anwendungen und Anbieter. Preisgefüge werden aufgebrochen, Innovationen entstehen [3].

2 Problemstellung

Heterogene Rechnernetze, in denen unter einem Netzwerk der Leitebene verschiedene Arten von Feldbussen und SA-Bussen existieren, lassen sich nur durch aufwendige Hard- und Softwareanpassungen vertikal durchgängig vernetzen.

Wenn Rechner mit vollständig inkompatiblen Protokollen Daten austauschen sollen, müssen Gateways eingesetzt werden. Die kommt häufig vor, wenn z.B. Maschinen mit herstellereigenen Kommunikationsmechanismen an TCP/IP angekoppelt werden sollen. Gateways transformieren die entsprechenden Kommunikationsfunktionen (teilweise mit viel Rechenaufwand) und gewährleisten nur so die Interoperabilität.

Bild 1 zeigt einen aktuellen Stand der typischen Verwendung von Ethernet, Feldbussen und S/A-Bussen in produzierenden Unternehmen:

3 Zielsetzung

Ziel einer integrierten Produktion ist es, Informationen über den Status jedes Steuerungselementes im gesamten Netzwerk verfügbar zu machen. Verschiedene Motivationen fordern eine solche vertikale Vernetzung.

3.1 Motivation von Rechnernetzen

Die Idee, Rechner und damit die Software zu vernetzen, ist so alt wie die Rechnergeschichte selbst. Aus der Kopplung verteilter Rechnersysteme ergeben sich vielfältige Möglichkeiten:

- Kopplung von räumlich getrennten Datenbeständen (Informationsdienste, Datenbanken)

- Redundanzminimierung durch Zugriff auf verteilte Ressourcen
- Verwendung nichtlokaler Ressourcen (Nutzung von Software auf einem entfernten Rechner; Nutzung virtueller Plattenlaufwerke auf Großrechnern)
- Lastausgleich (Einsatz mehrerer Rechner zur Lösung einer Aufgabe in einer angemessenen Zeit)
- Erhöhung der Verfügbarkeit (mehrere Kommunikationswege zwischen zwei Knoten eines Netzes und mehrere Bedienstationen für wichtige Funktionen)
- Erhöhung der Zuverlässigkeit (beim Ausfall eines Rechners wird dessen Arbeitslast auf andere Rechner umgeleitet), Datensicherheit

Diese Potenziale lassen sich unverändert auf die einheitliche, vertikale Vernetzung durch Ethernet – TCP/IP in der Industrieautomation übertragen.

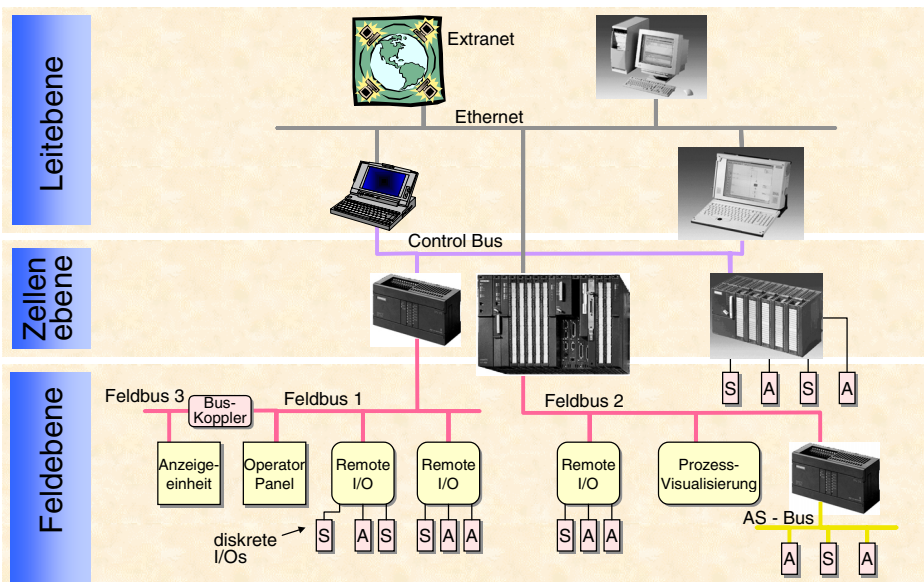


Bild 1: Aktuelle Übersicht, Vernetzung in produzierenden Unternehmen

4 Stand der Technik

Ethernet-TCP/IP hat sich mit rasanter Geschwindigkeit in der industriellen Steuerungstechnik verbreitet und ist auf dem besten Weg, sich in diesem Bereich als Standard-Feldbussystem zu etablieren.[4]

Aus drei Gründen ist Ethernet bisher das erfolgreichste Protokoll: Es ist kostengünstig, schnell und einfach für den Anwender zu handhaben.

Die lokalen Rechnernetze (LANs), die in der Industrie bisher nur Bürorechner oder Leitrechner miteinander verbunden haben, treten den Vergleich mit den eigens für den Automatisierungsmarkt entwickelten Feldbussen an. Doch verschiedene Limitationen wie EMV und Echtzeit stehen einer schnellen Einführung von flächendeckendem Ethernet in der Automatisierungstechnik noch im Weg. An industrielle, lokale Netzwerke werden gegenüber den in der Büro-, Verwaltungs- oder Leitebene eingesetzten lokalen Netzwerken zusätzliche Anforderungen gestellt: Diese beziehen sich auf Störfestigkeit, auf elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), auf industriegerechte Installation (Kabel und Stecker) und auf Echtzeitfähigkeit. Im Vergleich zu den eigens für diesen industriellen Einsatz entwickelten Feldbussen wurden diese Anforderungen bei der Entwicklung von Ethernet nicht berücksichtigt.

4.1 Ethernet in der Automatisierung

Ethernet wurde 1975 von der US Firma Rank Xerox entwickelt und von IEEE genormt. Bei diesem Protokoll (Buszugriff nach CSMA/CD) sind alle Stationen gleichberechtigt. Es sind Mechanismen und Einrichtungen nötig, um im Falle einer Kollision am Bus zu reagieren.

Was in der Bürokommunikation schon lange üblich ist, soll auch zunehmend in der Automation eine Rolle spielen. Die „Automation Research Corporation“ (ARC) hat Anfang 1999 sogar die Fünfjahres-Prognose gewagt, dass Ethernet sich über alle Vernetzungsebenen in der Automatisierungstechnik ausbreiten wird, also über alle Kommunikationspartner vom Sensor bis zum Leitreechner (vgl. Bild 2).

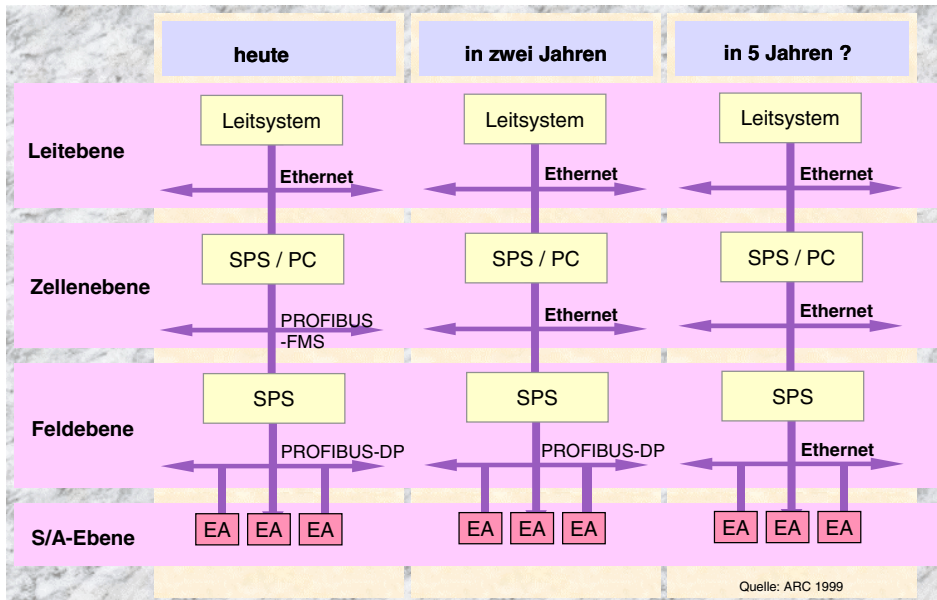


Bild 2: Vision der industriellen Kommunikation nach Automation Res. Corp. [5]

4.2 Industrial Ethernet vs. Ethernet

Industrial Ethernet ist dem gängigem Ethernet sehr ähnlich, es wurde nur leicht den harten Anforderungen der Fabrikebene angepasst. Anders als beim Ethernet für die Bürowelt hat das Industrial Ethernet eine quasi „eingebaute“ Redundanz und Störungsempfindlichkeit, so dass alle Netzwerkteilnehmer verbunden bleiben, trotz der rauen Industrieumgebung denen sie meist ausgesetzt sind.

4.3 Echtzeit

Bei vielen Industriellen Anwendungen ist die „Echtzeitfähigkeit“ ein kritischer Faktor und bestimmt die Wahl der Steuerungsplattform und der Kommunikationssysteme. Es ist wichtig zu erkennen, dass die Definition des Begriffes „Echtzeit“ nicht allgemein, sondern nur im Zusammenhang mit einer bestimmten Anwendung gültig ist [4]. Der Prozess gibt vor, was im Bereich der Echtzeit liegt. Ein Steuerungssystem ist damit echtzeitfähig, wenn es in allen Betriebsbedingungen rechtzeitig und richtig auf alle möglichen auftretenden Ereignisse reagiert.

Dies gilt im Speziellen für dezentrale Steuerungssysteme, in denen Ethernet-TCP/IP als Kommunikationssystem (Bus) eingesetzt wird. Verschiedene Verzögerungseinflüsse treten dann nur durch die nicht vorhersehbare Überlastung des Busses auf. Ausgewählte Netzwerkbausteine (wie Switches) und die hohen Übertragungsraten von Ethernet versprechen hier Besserung.

Doch die hohe Datenübertragungsrate von Ethernet sollte nicht überschätzt werden. Begriffe wie Gigabit suggerieren nahezu unendliche Möglichkeiten. Der immense Datenoverhead von

Ethernet-TCP/IP drückt die Effizienz der Datenübertragung auf bis zu 1%, wenn Datenpakete mit geringer Nutzdatenkapazität übertragen werden. [6]

4.4 Switches und Switched Ethernet

Im Mittelpunkt der Diskussionen um den flächendeckenden Einsatz von Ethernet steht die Echtzeitfähigkeit von Ethernet. In diesem Zusammenhang wird das Switched-Ethernet als Lösung genannt. Kern dieser Technologie ist der sogenannte Switch, ein Gerät für die Aufteilung eines Ethernet-Netzwerks in verschiedene Teilnetze. Die Daten gelangen nur in andere Netzsegmente, wenn sich der Zielteilnehmer außerhalb des Teilnetzes des Absenders befindet. Dadurch, dass die Daten nicht mehr im gesamten Netz veröffentlicht werden, wird das Netz stark entlastet. Die allerdings bedeutendere Funktion eines Switches liegt in der Vermeidung von Kollisionen.

Beim herkömmlichen Ethernet teilen sich mehrere bis sehr viele Stationen das Medium (Shared Ethernet). Jede Station kann senden, nachdem sie sich davon überzeugt hat, dass das Medium frei ist. Durch zeitgleiches Senden und durch die endliche Laufgeschwindigkeit auf dem Medium können Kollisionen von Datenpaketen zustande kommen. Ein Switch ist im Grunde eine intelligente Verteilstation. Er teilt ein Netzwerk in Netzsegmente (Teilnetze) zum Zweck der Lasttrennung. Das heißt, dass die Daten eines Netzsegments nicht in andere Segmente gelangen und somit nicht das Gesamtnetz belasten. Die Funktion wird realisiert, indem ein Switch ein eingegangenes Paket im Gegensatz zum Hub nur auf dem Port aussendet, an dem die Zielstation angeschlossen ist (vgl. Bild 3).

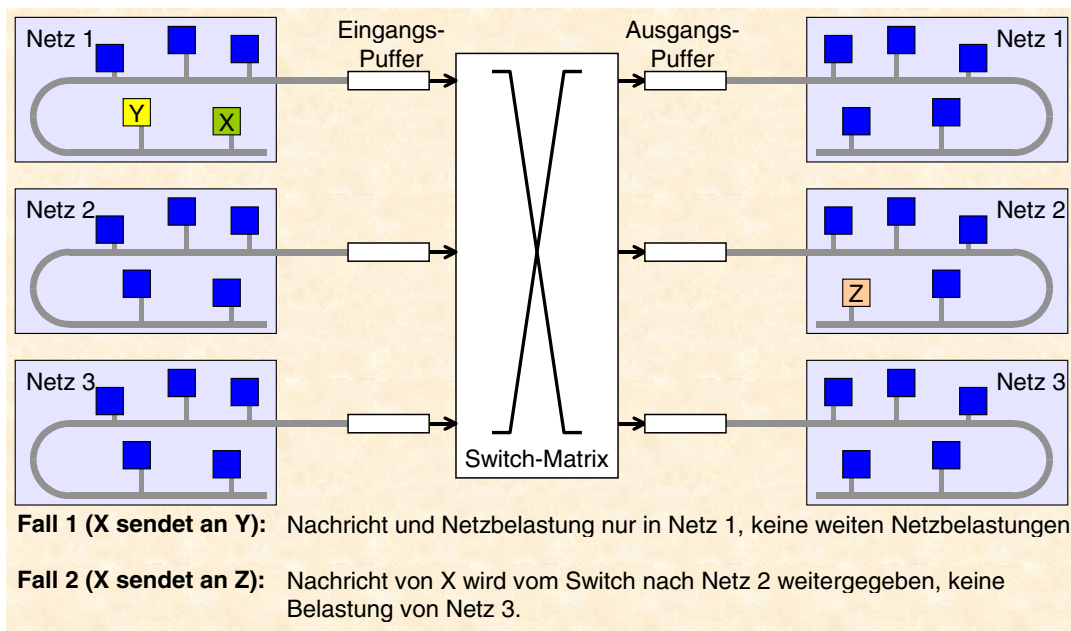


Bild 3: Funktionsprinzip eines Switches mit Beispiel

Die pure Verwendung von Switches in Rechnernetzen garantiert noch keine Echtzeit. Die Switches senken nur das Kommunikationsaufkommen in den einzelnen Subnetzen und vermeiden Kollisionen.

4.5 Limitation und Nutzen von Ethernet-TCP/IP

Heutzutage ist die vertikale Vernetzung in der Automatisierungstechnik sehr heterogen. Als physical Layer aus dem ISO/OSI-Modell werden beispielsweise RS232, RS485, Ethernet und weitere anwenderspezifische Lösungen eingesetzt. Für die eigentliche Übertragung kommen neben diversen Feldbussen und TCP/IP auch proprietäre Protokolle in Frage.

Aus historischen Gründen und aufgrund technischer Limitierungen ist ein flächendeckender Einsatz von Ethernet und TCP/IP für die meisten Anwender nicht vorstellbar.

Bei einer solchen Einführung von Ethernet in der Automatisierungstechnik stellt sich jedoch die Frage, wie dieses Netz über die bisher etablierten Anwendungen hinaus genutzt werden kann. Welche zusätzlichen Möglichkeiten ergeben sich aus einer solchen redundanten Hardwarevernetzung mit TCP/IP, die mit konventionellen Technologien unmöglich waren?

4.6 Vorteile und Anwendungen von Ethernet für die Industrieautomation

Seit der CIM-Diskussion hat sich Ethernet kontinuierlich weiter entwickelt; ca. 85% aller LANs (lokalen Rechnernetzwerke) und WANs (weitreichende flächendeckende Rechnernetzwerke) basieren auf dem Ethernet. Ethernet ist damit das Netzwerk Nummer eins in der LAN Landschaft weltweit.

4.6.1 Eigenschaften von Ethernet-TCP/IP

Ethernet bietet wichtige Eigenschaften, die für Ihre Anwendung wesentliche Vorteile bieten können:

- Schnelle Inbetriebnahme durch einfachste Anschlussstechnik
- Hohe Verfügbarkeit, da bestehende Anlagen ohne Rückwirkung erweitert werden können
- Nahezu unbegrenzte Kommunikationsleistung, da bei Bedarf skalierbare Leistung durch Switching-Technologie zur Verfügung steht
- Vernetzung unterschiedlichster Anwendungsbereiche, wie Büro oder Fertigung
- Unternehmensweite Kommunikation durch die Kopplungsmöglichkeit über WAN (Wide Area Network) wie ISDN oder Internet
- Investitionssicherheit durch die ständige kompatible Weiterentwicklung.

Hieraus resultieren die Vorteile von Ethernet-TCP/IP in der Industrieautomation:

4.6.2 Vorteile von Ethernet-TCP/IP in der Industrieautomation

- TCP/IP bis an die Maschine
 - Erweiterte und einfacher zu realisierende Diagnose- und Wartungseigenschaften
 - Teleservice (auch visuell durch Live-Streaming)
 - Offenheit der Steuerungen
 - Redundante Steuerungsnetzwerke
- Das für den Verteidigungsfall vom DoD entwickelte TCP/IP sorgt selbständig für die Übermittlung aller Daten, auch bei Kollision

5 Zusammenfassung und Ausblick

Für die weitere Verbreitung von Ethernet-TCP/IP in der Industrieautomation wird am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik vor allem in vier Richtungen weiter geforscht und entwickelt:

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Modellieren in der Produktion“ [7,8] wurde die Basis für ein BMBF-Leitprojekt geschaffen. Die 3-D-Projektierung von Steuerungsnetzwerken und deren Komponenten mittels Virtual Reality wird im Rahmen des BMBF Leitprojektes iViP weiter entwickelt.[9]

Die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) wird im SFB-Teilprojekt „EMV-gerechte Planung von SPS-Steuerungssystemen in Fertigungsanlagen“ behandelt. Hierbei richtet sich ein Augenmerk auf Ethernet-TCP/IP in der Produktion.

Eine Vernetzung über Ethernet-TCP/IP von Steuerungskomponenten macht den Einsatz von neuen Protokollen wie SOAP oder Biztalk möglich. Diese Protokolle wurden für Plattform übergreifende Kopplungen von Anwendungen geschrieben und können im Bereich der Industrieautomation ebenso wirksam eingesetzt werden.

Die vier genannten Forschungsrichtungen sollen in Folgenden detailliert vorgestellt werden:

5.1 3-D-Projektierung und Simulation von Automatisierungsnetzwerken

Am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik wird seit 1997 ein Konzept entwickelt, das das Projektieren unterstützen und vereinfachen soll [10].

5.1.1 VR zum Projektieren von Steuerungsaufgaben

Das steuerungstechnische Modell der Anlage wird simultan zur geometrischen Aufteilung der Anlage entworfen und festgelegt. Damit können die Verknüpfungen nicht nur am 3-D-Modell im VR visualisiert werden, sondern auch simuliert werden [11]. So kann die Anlage mit dem echten Steuerungscode getestet werden, ohne dass die reale Anlage fertig gestellt ist. Ziel der laufenden Entwicklung in diesem Bereich ist die Konzeption und Entwicklung eines Software-Werkzeugs, das die Prozesskette der SPS-Projektierung nachhaltig verbessert. Die dazu verwendete VR-Methodik und das 3-D-Modell sollen dazu beitragen, die Qualität der entstehenden Software zu erhöhen.[12]

Diese Entwicklung wird derzeit vom BMBF im Rahmen des Projektes iViP (Integrierte Virtuelle Produktentwicklung) gefördert. Die Ergebnisse entstehen in den Teilprojekten 4.3 und 5.1 und werden von den Industriepartnern in diesen Teilprojekten validiert [9,11]. Das Bild 4 zeigt ein schematisches Vorgehen beim grafisch interaktiven Zusammenstellen der Geometrie und Logik der Anlage.

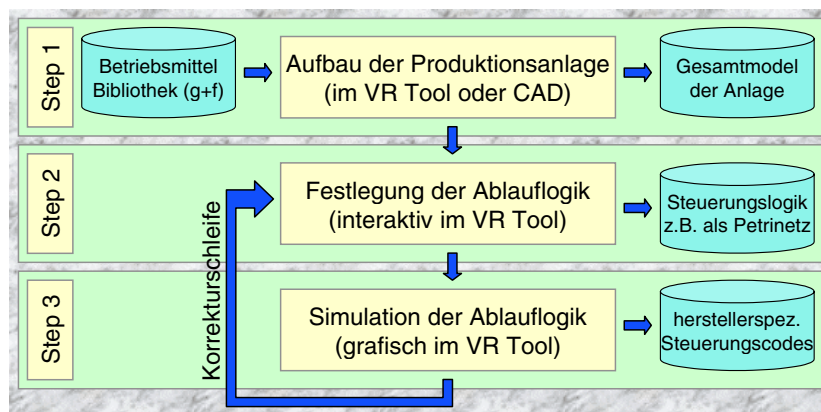


Bild 4: Vorgehensweise bei der grafisch-interaktiven Steuerungsprogrammerstellung

5.1.2 Aktueller Stand

Das am Institut entwickelte Tool unterstützt derzeit die Virtual-Reality-Umgebungen von Tecnomatix (eMWorkplace). Für Geometrie und Funktionalität der steuerungstechnischen Komponenten werden jeweils anwendungsspezifische Formate benutzt. Diese sollen langfristig durch ein durchgängiges Datenformat (3-D-CAD-Modell = VR-Modell) ersetzt werden. Bild 5 zeigt anhand von zwei Screenshots die Aufgaben beim 3-D-Projektieren: Aufbau der Anlage und Verschalten der Sensoren und Aktoren. Mit der Simulation (nicht im Bild) kann dann die erstellte Logik überprüft werden.

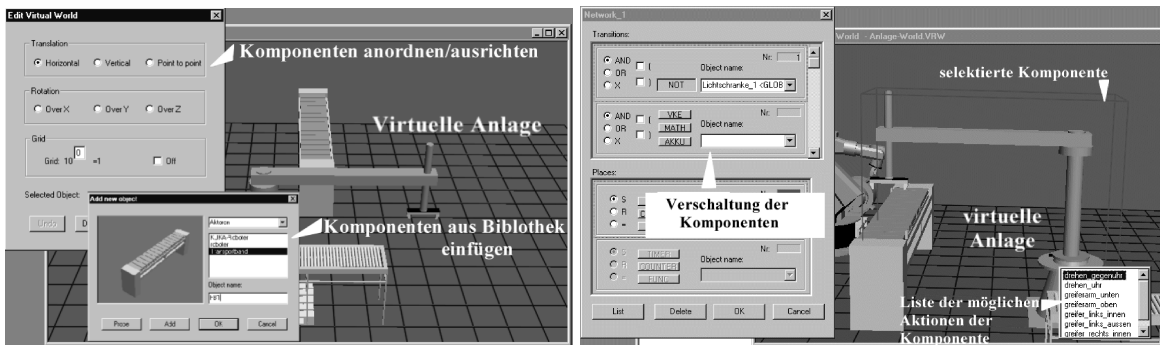


Bild 5: Komponenten werden aus der Betriebsmittel-Bibliothek eingefügt und Aktoren und Sensoren werden verschaltet

5.1.3 Netzwerkprojektierung mit dem 3D-Planungstool

Wenn mit der bereits beschriebenen Technologie des durchgängigen Einsatzes von Ethernet-TCP/IP in der Industriearbeit das Netz zur Steuerung wird, dann müssen zukünftig die Netzteilnehmer auf ihre Aufgabe programmiert werden. Dabei müssen die Topologie des Netzes und die einzelnen in Frage kommenden Kommunikationspartner dem kleinsten Teilnehmer im Netz bekannt gemacht werden. Dies kann mittels der in Kap. 5.1.1 und 5.1.2 beschriebene Software geschehen.

5.2 Einsatz von Industrial Ethernet zur Erhöhung der Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Wegen des rasanten Anwachsens der systemintern zu verarbeitenden Informationsdichten, der stetig steigenden Anzahl an Sensoren und Aktoren sowie des Trends zum Einsatz von IPCs anstelle konventioneller SPS-Steuerungen erhöht sich die Auftrittswahrscheinlichkeit elektromagnetischer Störungen. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, werden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 425 im Teilbereich „EMV in der Fabrik“ am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk) die Auswirkungen elektromagnetischer Störungen auf verteilte Steuerungssysteme in Fertigungsanlagen untersucht und grundlegende Methoden zur Gestaltung störfester Systeme geschaffen. Dem liegt eine Systemplanung neben dem Einsatz konventioneller Entstörmittel auch durch geeignete Systemkonfigurationen und Anordnungen der Systemkomponenten zu Grunde.

Ziel der Forschungsarbeiten ist ein Leitfaden „EMV-gerechte Planung von SPS-Steuerungssystemen in Fertigungsanlagen“ unter der besonderen Berücksichtigung des Industrial Ethernet. Ansätze hierzu finden sich in [13].

5.3 Remote Procedure Calls über XML (SOAP) [14]

Web-Anwendungen sind inzwischen auch für Microsoft ein zentrales Thema: Mit der Version 1.0 von SOAP (Simple Object Access Protocol) stellt Microsoft eine Technik vor, die Standard-Applikationen einfach webfähig macht. Es existiert zwar kein Mangel an Protokollen zur Kommunikation, aber es existiert kein Protokoll, das nicht an bestehende Internet-Konfigurationen der Anwendung angepasst werden müsste. Das neue Protokoll SOAP vermag dies zu ändern.

5.3.1 Allgemeines über SOAP

Das Simple Object Access Protocol definiert XML-Nachrichten (Extensible Markup Language), die sich über HTTP zwischen heterogenen Applikationen per Internet austauschen lassen. SOAP kann in existierende Internet-Strukturen (Firewalls, Router, etc.) also auch in Ethernet-TCP/IP-gestützte Automatisierungskonzepte eingebunden werden. Firewalls sind aufgrund der ASCII-Basis des zugrundeliegenden HTTP-Protokolls kein Hindernis für SOAP-Aufrufe von dezentralen Objekten.

Es ist unabhängig von Betriebssystemen und Objektmodellen wie dem DCOM-Protokoll von Microsoft oder CORBA der Object Management Group (OMG). Statt der in diesen Objektstandards definierten Kommunikationsprotokolle, etwa dem Internet Inter-ORB Protocol (IIOP) der OMG, baut SOAP auf Remote Procedure Calls und XML auf. Das bedeutet, Funktionen auf anderen Plattformen können von jeder Stelle des Netzes aus aufgerufen und benutzt werden. Ergebnisdaten werden - soweit vorhanden - wieder über XML-Schemata zurück übertragen. So ist verteilte Rechnerkapazität und redundanzfreie Datenhaltung in verteilten Systemen möglich.

Anders als BizTalk setzt SOAP gegenseitiges Verständnis der miteinander kommunizierenden Applikationen voraus und wird in die Anwendungsinfrastruktur integriert.

5.3.2 Biztalk

Microsoft BizTalk ist ein Framework, das auf neuen XML-Schemata und Industrienormen für den Informationsaustausch (SOAP) basiert. Es wurde von Unternehmen wie Microsoft, Baan, Boing und SAP entwickelt und definiert. Es integriert Systeme und Prozesse, indem es Unternehmensdaten von der Anwendungsstruktur löst. So können sie auf einfache Weise BizTalk-Dokumente mit Ihren Online-Handelspartnern austauschen. Derzeit werden weltweit von vielen Firmen Schemata definiert, die vor allem unternehmensübergreifende Datenzugriffe möglich machen.

5.3.3 Potenzial von SOAP und Biztalk für die Automatisierungstechnik

Wenn sich Ethernet-TCP/IP in der Automatisierungstechnik durchsetzen soll, dann nur mit einer standardisierten Funktion, die die Nutzung verteilter Daten und Rechnerkapazitäten möglich macht. Das Institut arbeitet an Schemata für die Industrieautomation, um zu evaluieren, inwieweit SAOP und Biztalk hier schon einsetzbar sind und welche Bereiche als industrieller Standard definiert werden müssen.

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

5.4 Hardwarelösung für ein Sensor-Aktor-Netztes mit TCP/IP

Am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe wird eine Hardwarelösung entwickelt, die Anbindung kleinster Steuerungskomponenten – z.B. Sensoren und Aktoren – an ein Werkstattethernet ermöglicht (vgl. Bild 6).

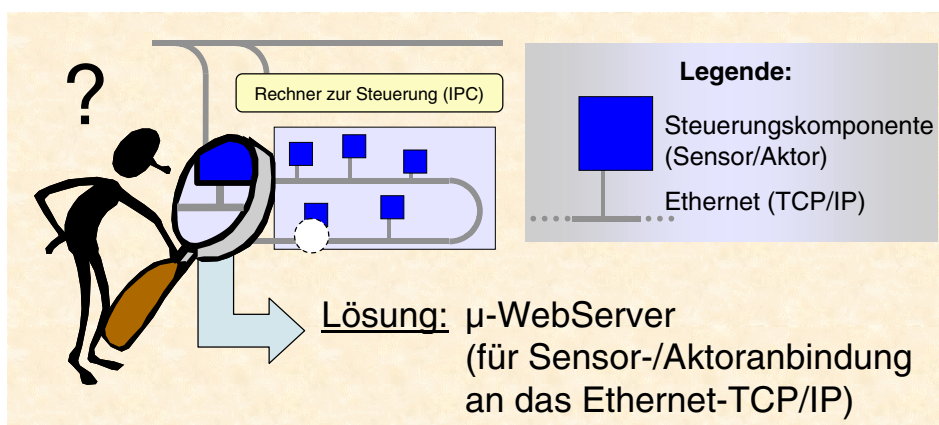


Bild 6: Anschluss einer Steuerungskomponente an Ethernet (TCP/IP)

Zur Validierung dieser Anschlussmöglichkeiten von kleinsten Steuerungseinheiten (Sensoren und Aktoren) steuert ein IPC eine fördertechnische Anlage (vgl. Bild 7).

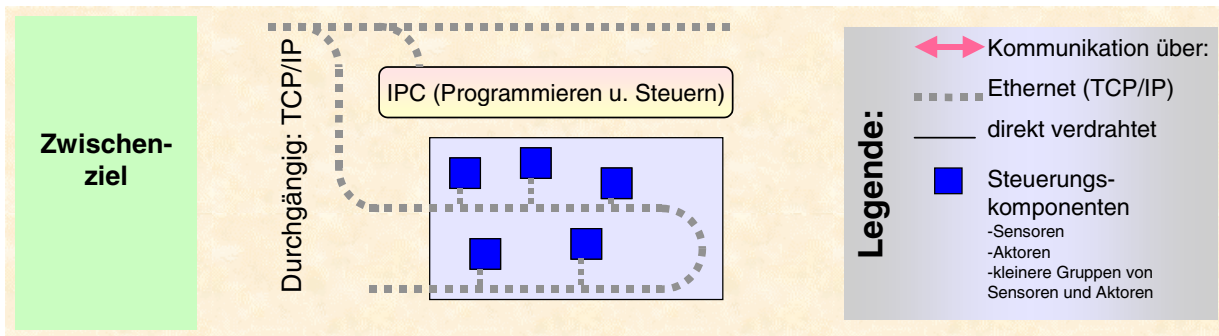


Bild 7: IPC steuert über SOAP (mit bzw. ohne Biztalk-Server)

Diese dezentrale Intelligenz könnte zukünftig Aufgaben übernehmen, die bisher von einer zentralen Steuerungsintelligenz erledigt wurden. Das Netz wird somit zur Steuerung (vgl. Bild 8). Damit werden Funktionalitäten möglich, die bei einer Trennung zwischen Steuerung und ihren Komponenten nicht möglich sind.

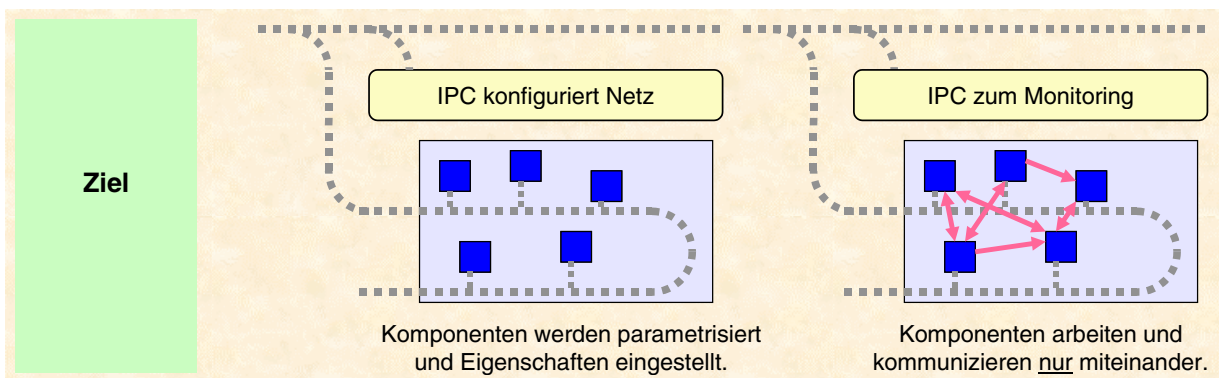


Bild 8: Das Netz wird zur Steuerung mit webfähigen Anschlüssen mit eingebauter Intelligenz

6 Literatur

- [1] von Raven, M.: Der Wandel des globalen Automatisierungsmarktes – Herausforderung für alle, in: atp - Automatisierungstechnische Praxis 39(1997)6, S. 15-20
- [2] Scherff, B.: Globalisierung des Marktes erfordert offene, integrierte Automatisierungslösungen, VDI/VDA-GMA Fachtagung Steuerungstechnik-Methodik komplexer Anwendungen, Langen, 30.9-1.10.1997
- [3] Wucherer, K.: Totally Integrated Automation: A concept for manufacturing and process industries, ARC's Automation Strategies Forum in Boston, 24.6.1997
- [4] Furrer, Frank J.: Ethernet-TCP/IP für die Industrieautomation; Grundlagen und Praxis; 2. Auflage, Hüthig Verlag Heidelberg, 2000
- [5] Automation Research Corporation: Device and Field Networks, World Wide Outlook, 1999
- [6] Puls, Oliver: Wirkleistung in der Kommunikation; Automatisierungsnetzwerke auf dem Prüfstand; SPS-Magazin (2000) H.1/2
- [7] Spath, D.: VR für die Systemplanung; DFG-Schwerpunktprogramm „Modellierung der Produktion“, Ergebnisbericht zur 3. Antragsphase, Juli 1997
- [8] Spath, D.; Landwehr, R.: Planung komplexer Produktionssysteme durch Techniken der virtuellen Realität, Abschlusskolloquium zum DFG

- Schwerpunktsprogramm: Modellieren in der Produktion (Laufzeit 94-97), Universität Hannover; Institut für Fabrikanlagen, 08.03.2000
- [9] Krause; Tang; Ahle: Rahmenantrag zum Leitprojekt „Virtuelle Produktentstehung“, Projekte 4.3 und 5.1, Fraunhofer IPK Berlin, VW AG Wolfsburg, Siemens Business Services Paderborn, 1998
 - [10] Osmers, U.: Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1998
 - [11] Spath, D.; Landwehr, R.: 3-D-Projektierung und Simulation von Ablaufsteuerungen. wt Werkstattstechnik 90 (2000) H. 7/8
 - [12] Spath, D; Osmers, U.: Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Hilfe von Virtual Reality; Tagungsband SPS/IPC/DRIVES '98 - Elektrische Automatisierungstechnik - Systeme und Komponenten, November 1998
 - [13] Binder, Carsten: EMV-Systemanalyse speicherprogrammierbarer Steuerungen, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1997
 - [14] Simple Object Access Protocol (SOAP) 1.1, <http://www.w3.org/TR/SOAP>, W3C-Note 8. Mai 2000, W³-Consortium