

Einsatz von Ethernet TCP/IP zur störfesten Vernetzung von Steuerungssystemen im Produktionsumfeld

o. Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Dipl.-Ing. Christoph Gönzheimer, Dipl.-Ing. Robert Landwehr
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk), Universität Karlsruhe (TH)

1 Einleitung

Moderne Fertigungs- und Produktionssysteme unterliegen einer stetigen Steigerung der installierten elektrischen Leistungsdichten. Diese verursacht eine zunehmende Verschärfung des elektromagnetischen Störpotentials. Gleichzeitig wachsen die in diesen Systemen zu verarbeitenden Informationsdichten kontinuierlich an.

Der Betrieb moderner Fertigungs- und Produktionssysteme ist daher mit der wachsenden Problematik verbunden, sowohl Hauptverursacher als auch potenziell Gefährdeter von elektromagnetischen Störeinflüssen zu sein. Die Gewährleistung eines stabilen Betriebsverhaltens erfordert aus diesem Grund neue Konzeptionen für störungsresistente Steuerungssysteme in Fertigungsanlagen.

Abgeleitet aus dieser Forderung werden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 425 „Elektromagnetische Verträglichkeit“ innerhalb des Teilprojektes EMV von Steuerungssystemen die Auswirkungen elektromagnetischer Störeinflüsse auf verteilte Steuerungssysteme untersucht und grundlegende Methoden zur Entwicklung störungstoleranter und –resistenter Systeme geschaffen.

Komplexe Fertigungs- und Produktionsanlagen, stellen als offene Systeme eine Kopplung vieler einzelner Funktionsgruppen dar. Innerhalb dieser Verknüpfungen, die von der elektrischen als auch von der räumlichen Anordnung je nach Realisierungsart sehr unterschiedlich gestaltet sein können, ist eine allgemeine Vorhersage des EMV-Verhaltens des Gesamtsystems sehr schwierig. So sind in komplexen Schaltanlagen die Abstrahlung durch Stromschleifen, kapazitive und induktive Kopplungen aufgrund räumlicher Anordnungen sowie auch galvanische Kopplungen innerhalb eines gemeinsamen Versorgungsstrangs nur schwer vorhersehbar.

In modernen Automatisierungssystemen werden zunehmend frei- oder speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) eingesetzt, die neben der reinen Steuerung von Maschinen und Anlagen auch über weitere Funktionalitäten wie Diagnose, Visualisierung und Überwachung verfügen. Diese Funktionalitäten werden zunehmend von PC-basierten Steuerungen übernommen, bei denen die Steuerungsfunktionen durch Softwareemulationen auf Industrie-PCs realisiert werden. Durch den Einsatz neuer Methoden (z.B. Visualisierung von Anlagenzuständen), dem Auftreten neuer Anbieter im Umfeld von PC-basierten Steuerungen sowie dem Einsatz von Standardsoftware (z.B. Windows) können komplexe Systeme mit hohen Leistungs- und Informationsdichten projektiert werden.

Die dadurch ermöglichte steigende Komplexität erfordert vor allem die störungstolerante Auslegung der Gesamtsysteme und deren Vernetzungen, da EMV-Störungen sowohl zum zeitweisen Ausfall von Teilsystemen als auch zum Verfälschen von übertragenen Informationen führen können.

Eine Verbesserung der Störungsresistenz von vernetzten Steuerungssystemen ist zum Einen durch eine sehr störsichere physikalische Vernetzung zu erreichen, zum Andern sind störfesteste Hardwarekomponenten für das Netzwerkrouting sowie entsprechende Übertragungsprotokolle erforderlich. Die Forschung seitens der Hardwareentwicklung ist weit fortgeschritten. In der EN5008x sind die eigentlichen Belange der EMV größtenteils erfüllt, die besondere Fragestellung

bei der Konfiguration unterschiedlicher Baugruppen zu einem vernetzten Gesamtsystem wird jedoch nicht berücksichtigt.

2 EMB im industriellen Umfeld

Innerhalb des Sonderforschungsbereiches wurde aufbauend auf zahlreichen Messungen an ausgewählten Störern aus dem produktionstechnischen Umfeld eine gemeinsame Datenbasis „EMV in der Fabrik“ aufgebaut. Die erstellte Datenbasis erlaubt dem Planer von Steuerungssystemen das Erkennen von Anlagenzonen mit kritischen Emissionen und unterstützt ihn bei der EMV-konformen Installation des Steuerungssystems. Die Größenordnungen von Störemissionen im „rauen“ Fabrikumfeld sollen im Folgenden durch einige Beispiele verdeutlicht werden.

2.1 Messung der Abstrahlung eines Schweißroboters

Die Abbildung 2.1 zeigt den Aufbau einer Emissionsmessung an einer Schweißroboterzelle. Der Aufbau besteht aus einem Knickarmroboter mit Schaltschrank und Bedienpanel, einem Dreh-Kipptisch und einem MIG/MAG-Schweißgleichrichter.

Um die Messungen am „offenen“ Lichtbogen innerhalb der Absorberhalle durchführen zu können, wurde dieser mit Hilfe eines Plexiglasgehäuses abgeschirmt. Die Schweißpistole wurde vom Roboter getrennt auf einem Dreh- Kipptisch angebracht.



Abb. 2.1 Anlagenaufbau in der Absorberhalle und abgeschirmter Lichtbogen

Das Schaubild 2.2 zeigt den Verlauf der elektrischen Feldstärke. Die untere Kurve zeigt die Abstrahlung der Anlage mit geöffnetem Schaltschrank der Robotersteuerung und einer Verfahrbewegung in allen Achsen. Wird zusätzlich die Schweißanlage in Betrieb gesetzt (oberer Kurvenverlauf) ergibt sich, bei einem eingestellten Schweißstrom von 200 A, eine Erhöhung der Abstrahlung im gesamten gemessenen Frequenzbereich um ca. 30-40 dB $\mu\text{V}/\text{m}$.

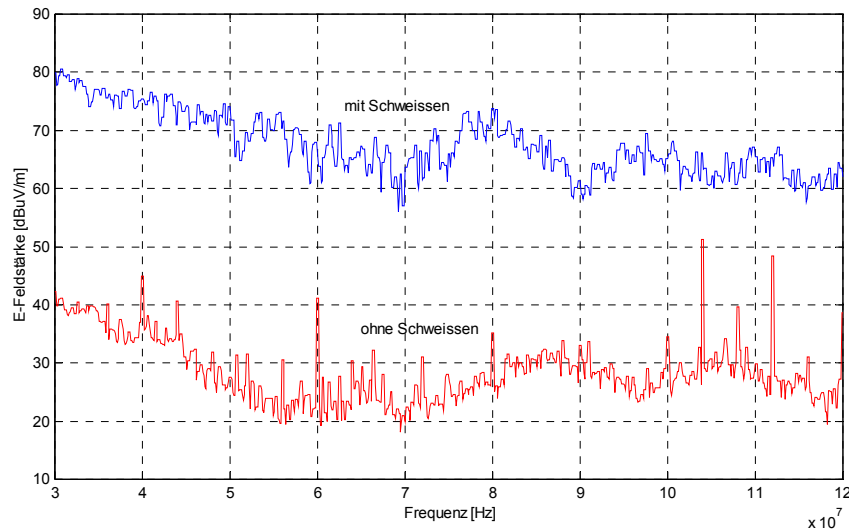


Abb. 2.2 Feldstärken mit und ohne Schweißvorgang

Im Folgenden wird die Schweißstromquelle näher betrachtet. Abbildung 2.3 zeigt die Intensität der Abstrahlung in Abhängigkeit der Messzeit. Die maximale Intensität wird beim Zünden des Lichtbogens erreicht, d.h. hohe Emissionen entstehen bei häufigem Zünden des Lichtbogens, bzw. bei ungleichmäßigem Abbrand der Drahtelektrode.

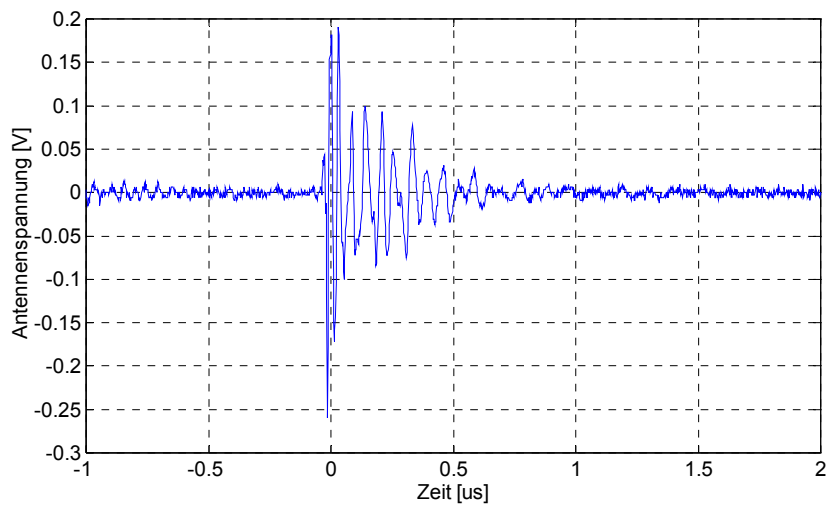


Abb. 2.3 Feldstärkeverlauf beim Zünden des Lichtbogens

Neben der Vermessung der Fertigungseinrichtungen, die an den beteiligten Instituten des Sonderforschungsbereiches vorhanden sind (z.B. Werkzeugmaschinen, Schweißeinrichtungen etc.), wurden in Kooperationen mit Industriepartnern umfassende Untersuchungen der EMB in produktionstechnischen Systemen durchgeführt.

Ein weiteres Beispiel verdeutlicht die möglichen Größenordnungen der Emissionen im produktionstechnischen Umfeld anhand einer vor Ort Messung in einer Stahlproduktion mit elektrischem Schmelzofen. Die Abbildungen 2.4 und 2.5 zeigen den elektrischen Schmelzofen sowie das gemessene B-Feld in der Nähe der Zuleitungen vom Ofentransformator.

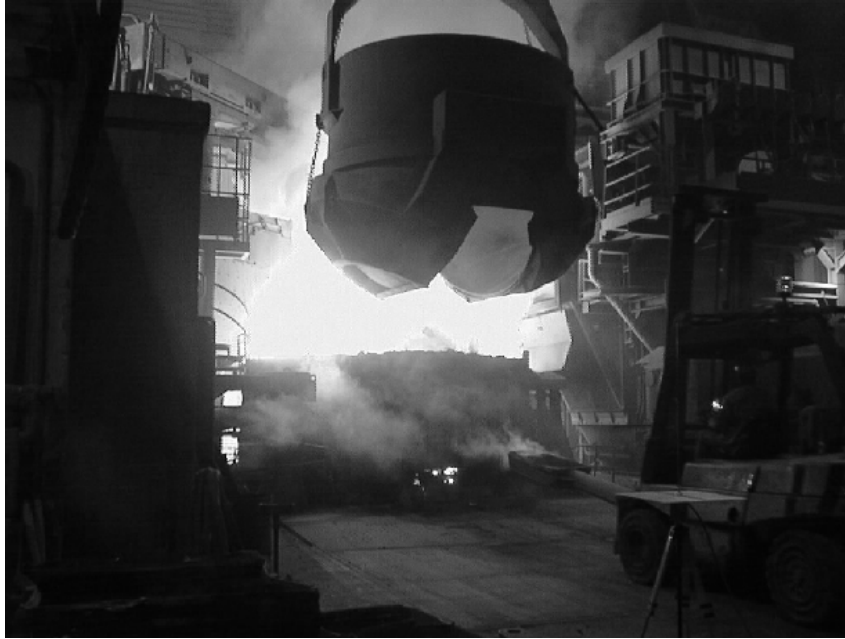


Abb. 2.4: Schmelzofen in einer Stahlproduktion

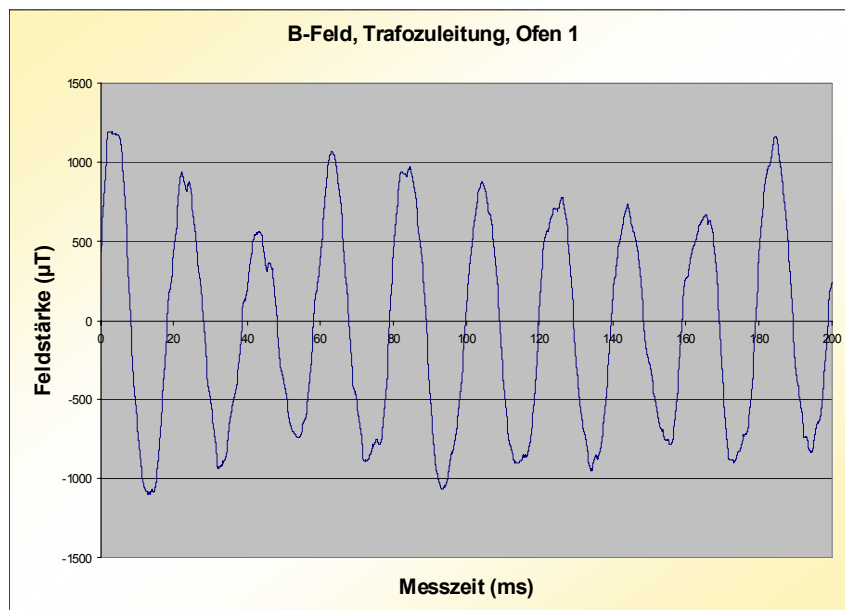


Abb. 2.5: B-Feld an den Transformatorzuleitungen zum Schmelzofen

Die Abbildung 2.6 zeigt die Ergebnisse der E-Feld-Messung innerhalb der Saugkreisanlage zur Netzkomensation.

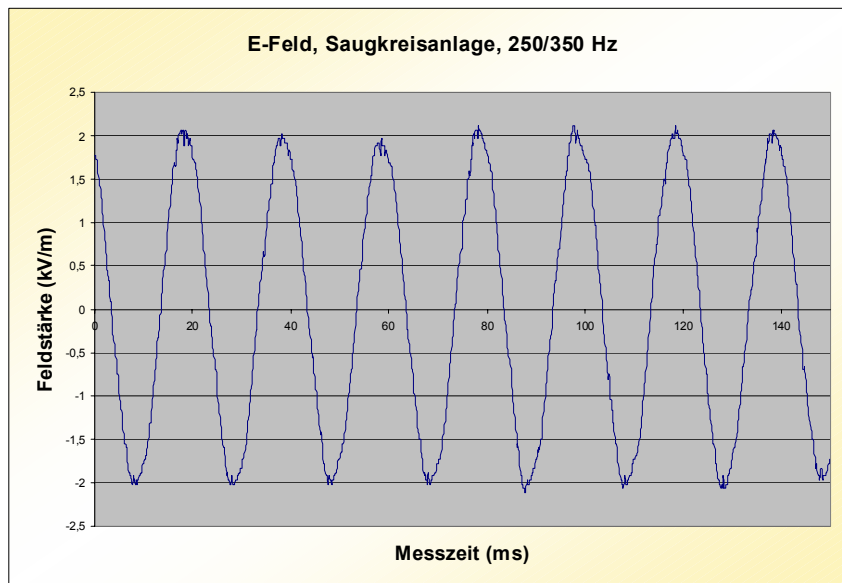


Abb. 2.6: E-Feld in der Netzkompensationsanlage

3 Störfestigkeitsmessungen an ausgewählten Feldbussystemen

Im Rahmen einer Kooperation mit der Universität Stuttgart, wurden vergleichende Störfestigkeitsmessungen an verschiedenen Bussystemen zur Automatisierungsvernetzung vorgenommen. Dazu wurden Messungen 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 150 kHz bis 80 MHz mit sinusförmigem Störsignal. Dieses ist zu 80 % mit 1 kHz amplitudenmoduliert. Abweichend von der oben genannten Prüfnorm wurde die Generatorleistung dabei über den gesamten Frequenzsweep konstant gehalten.

Die Datenübertragung über Ethernet zeigt im Vergleich zu den herkömmlichen Feldbussystemen wie z.B. 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 einer Ethernet-Übertragung konnte eine Erhöhung um einen Faktor >10 gemessen werden. Hierzu tragen vor allem die vorhandene galvanische Trennung sowie die Filterung durch die Übertrager zwischen den Ethernet-Controllern und den Leitung bei.

Um das Störverhalten im Bereich von 80 MHz bis 1 GHz näher zu betrachten, wurde die Koppelzange durch eine Strip-Line ersetzt, die eine Störfestigkeitsmessung der Vernetzung in einem sehr homogenen Störfeld erlaubt. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau der Strip-Line in der Absorberhalle der Universität Stuttgart.

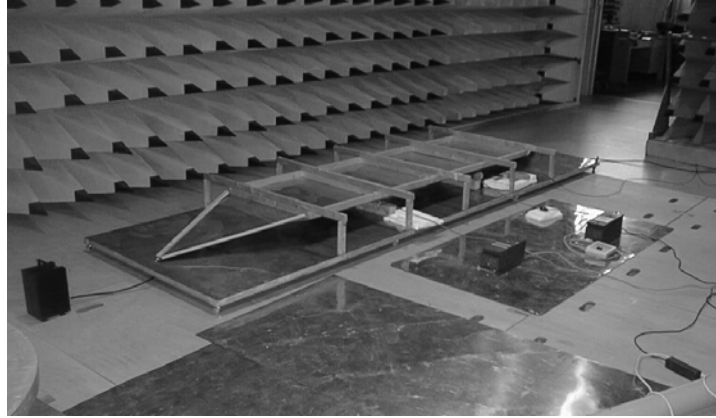


Abb. 3.1: Störfestigkeitsmessung an verschiedenen Netzwerken mit einer Strip-Line

Die Messungen zeigten ähnliche Ergebnisse wie die Messungen unter Einsatz der Koppelzange. Die folgende Tabelle zeigt die Störfestigkeitsgrenzen der vermessenen Systeme. Für den Anlagenplaner ist besonders die starke Abhängigkeit der Störfestigkeit vom Einsatz unterschiedlicher Leitungstypen zu beachten.

Bustyp	Leitung	Störfestigkeit [V/m]
Profibus-DP, 1.5 Mbit	Profibus-Kabel, Fabr. 1	25
	Profibus-Kabel, Fabr. 2	35
	MPI-Kabel	70
	2-adriges, univ. Datenkabel, Schirm einseitig aufgelegt	65
	2-adriges, univ. Datenkabel, Schirm nicht aufgelegt	60
MPI	MPI-Kabel	90
Ethernet, 100 Mbit, TCP	Ungeschirmtes Kabel, Hub	90
	FTP-Kabel, Hub	120
	STP-Kabel, Hub	250
	STP-Kabel, Crosslink	90
Ethernet, 100 Mbit, UDP	FTP-Kabel, Hub	120
	STP-Kabel, Hub	210
	STP-Kabel, Crosslink	90
Can-Bus, 500 kbit	Can-Bus-Kabel, Fabr. 1	80
Can-Bus, 10 kbit	Can-Bus-Kabel, Fabr. 1	80
As-i-Interface	As-i-Kabel	110

Abb. 3.2: Vergleich der Störfestigkeiten unterschiedlicher Feldbussysteme und Leitungstypen

Im Rahmen der laufenden Arbeiten innerhalb des Sonderforschungsbereiches wird an der Entwicklung von Möglichkeiten zur Nutzung der sehr störsicheren Datenübertragung über Ethernet-TCP/IP gearbeitet. Dazu wird an Interfacekomponenten zur direkten Ethernetanbindung einzelner Sensoren und Aktoren gearbeitet.

4 Einsatz von Industrial Ethernet zur Vernetzung von Automatisierungskomponenten

Am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe wird der Ansatz einer vollständigen, vertikalen Integration von der Leit- bis in die Feldebene durch eine leistungsfähige und zugleich kostengünstige Anbindung auch der kleinsten Steuerungselemente wie Sensoren und Aktoren an Industrial-Ethernet verfolgt. 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 geeignete μ -Webcontroller und μ -Webserveraltungen entwickelt.

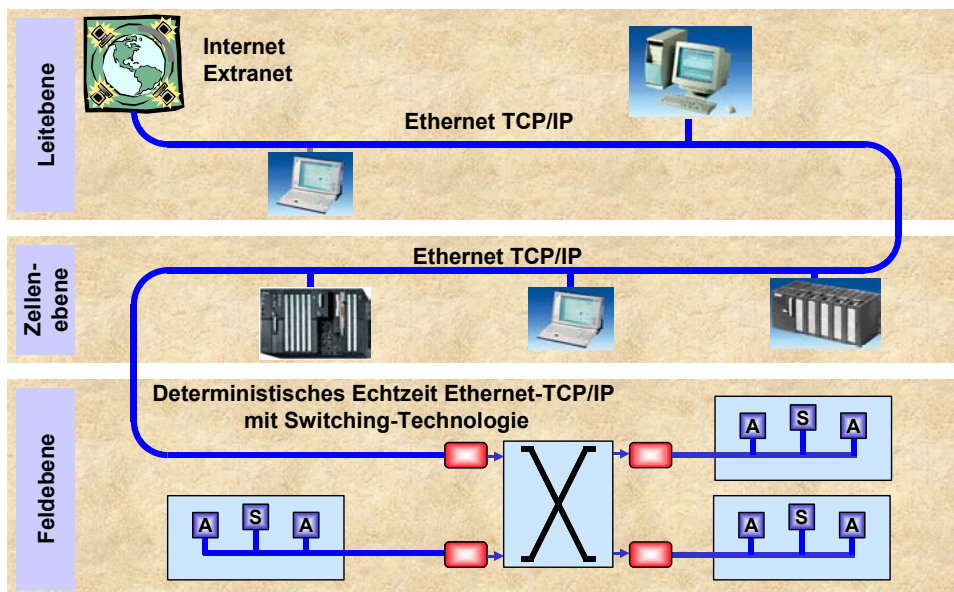


Abb. 4.1: Vertikal integriertes Steuerungsnetz

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.

4.1 Hardwarekonzept des μ -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 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 folgende Abbildung zeigt das Hardwarekonzept des μ -Webcontrollers.

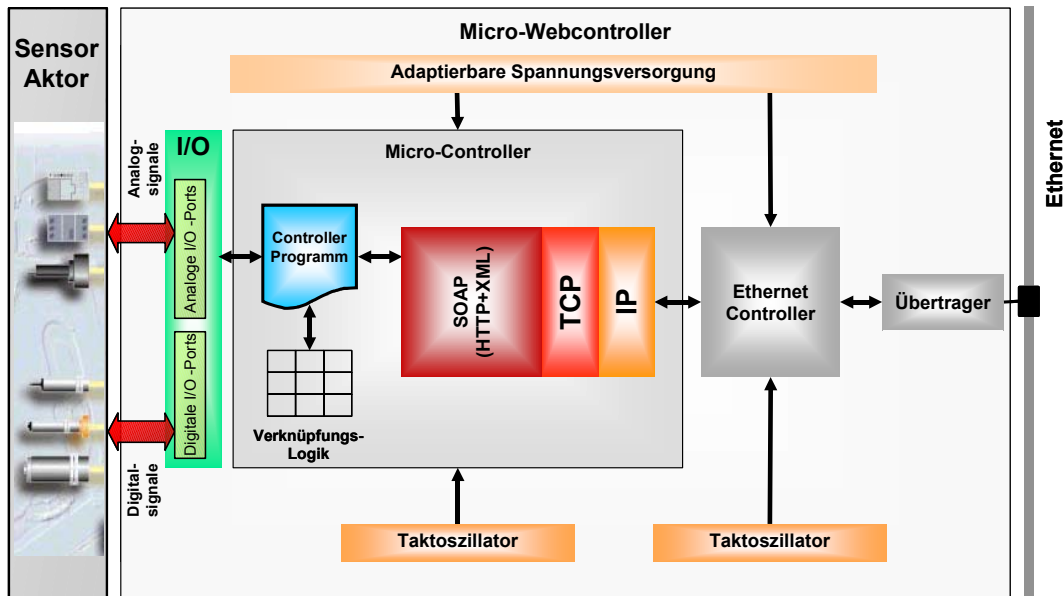


Abb. 4.2: Hardware des μ -Webcontrollers

4.2 Programmierung und Software

Der Mikrocontroller verfügt zum Ablegen der Programme über einen Flash-Speicher, der mittels In-Circuit-Serial-Programmierung (ICSP) beschrieben werden kann. Dies unterstützt schnelle Änderungen der Verknüpfungslogik sowie die Möglichkeit Programmupdates durchzuführen.

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 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.

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.

Die Abbildung 4.3 zeigt den Hardwareaufbau und verdeutlicht die Größe des μ -Webcontrollers.



Abb. 4.3: Aufbau des μ -Webcontrollers

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ethernet hat sich durch die große Verbreitung in der PC-Welt als weltweit akzeptiertes LAN (lokal area network) durchgesetzt. Diese internationale Verbreitung findet sich immer stärker auch im Bereich der Steuerungstechnik wieder. Dort bietet der Einsatz von Ethernet die Möglichkeit zur freien Verschaltung von Teilkomponenten unterschiedlicher Hersteller auf der Basis eines offenen Systems.

Die im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 425 durchgeführten Messungen haben hohe Potenziale in der Erhöhung der Störfestigkeit durch den Einsatz von Ethernet gezeigt. Die immer größere Verbreitung dieses Netzwerktyps im industriellen Umfeld erfordert weitere Untersuchungen zur Störfestigkeit.

Im Teilprojekt „EMV von verteilten Steuerungssystemen in Fertigungsanlagen“ werden weiterführende, grundlegende Untersuchungen an industriellen Ethernet-Netzwerken für Steuerungsanwendungen, sowie deren EMV-sichere Konzeption und Aufbau der erforderlichen Einzelkomponenten der Netze für Steuerungsanwendungen durchgeführt.

Innerhalb der Arbeiten werden die für das Netzwerkrouting erforderlichen Komponenten, wie z.B. Switches und Hubs, näher untersucht, und Gestaltungsregeln für deren störsicheren Aufbau abgeleitet. Dazu werden sowohl Maßnahmen gegen gestrahlte Störeinflüsse, welche auf die Komponente einwirken, getroffen (Schirmung) als auch entsprechende Filter zur Dämpfung der leitungsgebundenen Störungen über die Netz- und Datenleitungen untersucht.

Die ausfallsichere und störungstolerante Übertragung von Daten über industrielle Ethernet-Netzwerke erfordert neben störfesten Übertragungsmedien die Implementierung von Übertragungsprotokollen, die eine Störungserkennung und -korrektur ermöglichen. Hierzu sind auf dem Markt bereits mehrere offene aber auch proprietäre Protokolle vorhanden, die störungserkennende Komponenten enthalten.

Solche Protokolle werden weiterhin am Institut messtechnisch auf ihre Störsicherheit verglichen. Dabei gilt es vor allem, offene Protokolle auf ihr Potenzial zur Erhöhung der Störsicherheit zu untersuchen. Aussichtsreiche Konzepte hierzu bauen auf das ISO/OSI Modell auf und erweitern die Layer 5-7 (Session-, Presentation- und Application-Layer). Verschiedene Versionen des IP (Internet Protocol) haben bereits eine Fehlerkorrektur integriert. Beispiele hierfür sind das TCP/IP Protokoll bzw. das UDP/IP Protokoll (User Datagram Protocol).

Ziel zukünftiger Arbeiten ist die Erweiterung von bereits im Kern definierten, auf Ethernet TCP/IP

aufbauenden Software-Protokollen (Application Layer 7) zur Anwendung in störsicheren, industriellen Automatisierungsnetzwerken, welche über die Funktionalität der vorhandenen Feldbussysteme verfügen bzw. diese erweitern (z.B. XML-Implementierung ermöglicht Funktionen in Verbindung mit HTTP, auch als SOAP bezeichnet).

6 Literatur

[Elekt-00]

Automatisieren – Ethernet in der Automatisierungstechnik, Teil 2: Grenzen und Möglichkeiten der industriellen Ethernet-Einsatzes, Elektronik – München, 2000, Band 49, Heft 21 S. 66-75

[Goed-97]

Goedbloed, Jasper J.: EMV- Elektromagnetische Verträglichkeit: Analyse und Behebung von Störproblemen, Pflaum 1997

[Jaspernite-99]

Jaspernite, J.: Ethernet-TCP/IP in der Feldkommunikation Industrielle Automation und Internet-/Intranet-Technologie, VDI-Berichte 1515, VDI Verlag, 1999, S. 47-56

[Kohling-98]

Kohling, Anton: EMV von Gebäuden, Anlagen und Geräten, VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 1998

[SchraftKaun-99]

Schraft, R. D.; Kaun, R. Stand der Technik – Defizite und Trends in der Automatisierungstechnik, Automatisierung, Düsseldorf, 1999

[Schwab-94]

Schwab, Adolf J.: Elektromagnetische Verträglichkeit, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, 1994

[SpGöLa-00a]

Spath, D., Gönzheimer, C., Landwehr, R.: „Elektromagnetische Beeinflussung von Steuerungssystemen im industriellen Umfeld“, Hardwarelösung zur Vermeidung von Störeinkopplungen, EMV-ESD Elektromagnetische Verträglichkeit, Jahrgang 11, 09/2000, ISSN 0938-6440

[SpGöLa-00b]

Spath, D., Landwehr, R., Gönzheimer, Chr.: 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

[SpGöLa-00c]

Spath, D.; Gönzheimer, C.; Landwehr, R.: EMV in der Automatisierungstechnik, SPS/IPC/Drives - Elektrische Automatisierung – Systeme und Komponenten, Hüthig Verlag Heidelberg, ISBN 3-7785-2836-X

[SpGöLa-01a]

Spath D.; Gönzheimer, C.; Landwehr, R., Verteiltes Steuerungssystem auf Basis horizontaler Sensor/Aktor-Kommunikation über TCP/IP, SPS/IPC/Drives, Nürnberg, Nov. 2001

[SpGöLa-01b]

Spath D.; Gönzheimer, C.; Landwehr, R., Ein Beitrag zur Standardisierung auf Layer 7 für Industrial Ethernetfähige Automatisierungskomponenten verschiedener Hersteller mit XML und SOAP, IT&Automation Kongress, Nürnberg, Nov. 2001