

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Einführung | 1 |
| 1.1 Industrieautomation | 1 |
| 1.2 Die drei Zeitalter der Industrieautomation | 3 |
| 1.2.1 Vorzeit: Programmierbare Steuerungen..... | 3 |
| 1.2.2 Erstes Zeitalter: Proprietäre Kommunikation | 3 |
| 1.2.3 Zweites Zeitalter: Bus-Hierarchien..... | 4 |
| 1.2.4 Drittes Zeitalter: Systemweite Middleware | 6 |
| 1.2.5 Die Rolle von Ethernet-TCP/IP | 9 |
| 1.2.6 Sachzwänge aus der kommerziellen Informationstechnologie..... | 10 |
| 1.3 Elemente der industriellen Automation | 10 |
| 1.4 Abgrenzung des Begriffes „Industrieautomation“ | 12 |
| 1.4.1 Betrieb und Management der Anlage | 12 |
| 1.4.2 Wartung und Evolution der Anlage | 13 |
| 1.4.3 Prozess- und Fertigungsengineering | 13 |
| 1.4.4 Produkt-Engineering | 14 |
| 2 Dezentrale Steuerung | 15 |
| 2.1 Grundidee der dezentralen Steuerung | 15 |
| 2.2 Kommunikationsanforderungen | 16 |
| 2.3 Der Begriff „Echtzeit“ | 17 |
| 2.3.1 Echtzeitanforderungen | 18 |
| 2.3.2 Echtzeitverhalten..... | 19 |
| 2.3.3 Echtzeitmodell..... | 19 |
| 2.4 Dezentrale Software | 21 |
| 2.5 Steuerungsarchitektur | 22 |
| 2.6 Bussysteme für die Industrieautomation | 25 |
| 2.6.1 Anforderungen an einen Feldbus | 25 |
| 2.6.2 Feldbusse..... | 26 |
| 2.6.3 Auswahl der industriellen Kommunikationssysteme..... | 29 |
| 2.7 Middleware für die Industrieautomation | 30 |
| 2.8 Internet und Industrieautomation | 32 |
| 3 Netzwerke und Dienstqualität | 33 |
| 3.1 Netzwerkgrundlagen | 33 |
| 3.1.1 Der Begriff „Netzwerk“ | 33 |
| 3.1.2 Intranets, Extranets, Internet und VPNs..... | 34 |
| 3.1.3 OSI-Modell..... | 35 |
| 3.1.4 Tunnelprotokolle | 37 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.1.5 | Repeater, Hubs, Bridges, Router und Gateways | 37 |
| 3.1.6 | Switches | 42 |
| 3.2 | Dienstqualität (Quality of Service)..... | 42 |
| 3.2.1 | Der Begriff „QoS“ | 43 |
| 3.2.2 | QoS im OSI-Modell | 45 |
| 3.2.3 | Serviceklassen (CoS) | 46 |
| 3.2.4 | QoS-Implementation | 46 |
| 3.3 | QoS-Netzwerke | 48 |
| 3.3.1 | QoS-Architektur und Management | 49 |
| 3.3.2 | QoS in Netzwerken für die Industrieautomation | 50 |
| 3.4 | IP QoS | 51 |
| 3.4.1 | IP Integrated Services Architecture | 51 |
| 3.4.2 | IP Differentiated Services Framework | 52 |
| 3.4.3 | IP QoS-Implementation | 53 |
| 3.4.4 | IEEE 802.1p | 54 |
| 3.5 | Weiterentwicklungen..... | 55 |
| 4 | Ethernet..... | 57 |
| 4.1 | Ethernet-Entwicklungsgeschichte..... | 57 |
| 4.2 | Klassisches Ethernet (10 MBit/s) | 58 |
| 4.2.1 | Ethernet-Struktur und -Topologie | 58 |
| 4.2.2 | Zugriffverfahren CSMA/CD | 60 |
| 4.2.3 | Bewältigung von Kollisionen | 62 |
| 4.2.4 | Übergeordnete Kommunikationssoftware | 65 |
| 4.2.5 | Ethernet Paket | 65 |
| 4.2.6 | Ethernet-Adresse | 67 |
| 4.3 | Ethernet Standards..... | 68 |
| 4.4 | Fast Ethernet (100 Mbit/s) | 70 |
| 4.4.1 | Fast Ethernet Topologie | 70 |
| 4.4.2 | Full-Duplex Betrieb | 72 |
| 4.4.3 | Autonegotiation | 72 |
| 4.4.4 | Flusssteuerung (Flow Control)..... | 72 |
| 4.4.5 | Trunking..... | 73 |
| 4.5 | Gigabit-Ethernet (1000 Mbit/s) | 73 |
| 4.5.1 | Gigabit-Ethernet Topologie | 73 |
| 4.5.2 | MAC Erweiterungen | 74 |
| 4.6 | 10 Gbit/s Ethernet..... | 75 |
| 5 | IP, UDP und TCP..... | 77 |
| 5.1 | TCP/IP-Protokollfamilie..... | 77 |
| 5.1.1 | Vergleich mit OSI-Architektur | 79 |
| 5.1.2 | Geschachtelte Protokolle..... | 80 |
| 5.2 | Paket-Driver..... | 80 |
| 5.3 | Internet-Protokoll IPv4..... | 81 |
| 5.3.1 | Internet-Funktionen..... | 82 |
| 5.3.2 | IPv4 Internet-Paket (IPv4 Datagramm) | 82 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.3.3 | IPv4 Internet-Adressen..... | 84 |
| 5.3.4 | Adress Resolution Protocol ARP..... | 85 |
| 5.3.5 | Internet Control Message Protocol ICMP..... | 85 |
| 5.4 | Internet-Protokoll IPv6..... | 86 |
| 5.4.1 | Neue Eigenschaften von IPv6..... | 86 |
| 5.4.2 | IPv6 Internet-Paket (IPv6 Datagramm)..... | 87 |
| 5.4.3 | IPv6 Internet-Adressen..... | 89 |
| 5.4.4 | IPv6 Einfluss auf übergeordnete Protokolle..... | 90 |
| 5.4.5 | IPv6 QoS und Sicherheit..... | 90 |
| 5.5 | Transmission Control Protocol TCP..... | 90 |
| 5.5.1 | TCP-Eigenschaften..... | 91 |
| 5.5.2 | TCP-Segment..... | 92 |
| 5.5.3 | TCP-Sicherungsmechanismen..... | 92 |
| 5.5.4 | Zugriff auf die TCP-Funktionen..... | 95 |
| 5.6 | Übergeordnete Funktionen und Programminterfaces..... | 97 |
| 5.7 | User Datagram Protocol UDP..... | 97 |
| 5.7.1 | UDP Eigenschaften..... | 97 |
| 5.7.2 | UDP-Segment..... | 98 |
| 5.8 | UDP – TCP Vergleich..... | 99 |
| 6 | Socket-Interface..... | 103 |
| 6.1 | Socket-Interface Betriebsphilosophie..... | 103 |
| 6.2 | Client-/Server-Beziehungen..... | 105 |
| 6.3 | Socket-Library Funktionen..... | 108 |
| 6.3.1 | Socket Library..... | 108 |
| 6.3.2 | Verbindungsaufbau..... | 108 |
| 6.3.3 | Blockierung..... | 109 |
| 6.3.4 | Programmierung der Socket-Library..... | 111 |
| 6.3.5 | Socket-Library für IPv6..... | 112 |
| 6.4 | Remote Procedure Calls..... | 112 |
| 6.4.1 | Der Begriff „RPC“..... | 112 |
| 6.4.2 | RPCs über Ethernet-TCP/IP..... | 112 |
| 6.4.3 | Probleme mit RPCs..... | 113 |
| 6.4.4 | RPC-Implementationen..... | 114 |
| 6.5 | ISO Transprotprotokoll über TCP/IP..... | 114 |
| 7 | Ethernet mit Lastbeschränkung..... | 117 |
| 7.1 | QoS Parameter für die Industrieautomation..... | 117 |
| 7.2 | Ethernet Kollisionsbereiche (Collision Domains)..... | 118 |
| 7.2.1 | Kollisionsbereiche..... | 118 |
| 7.2.2 | Größe eines Kollisionsbereichs..... | 118 |
| 7.2.3 | Kollisionshäufigkeit..... | 120 |
| 7.3 | Kollisionsvermeidung..... | 120 |
| 7.4 | Ethernet-Theorie: Mittelwerte..... | 120 |
| 7.5 | Ethernet-Theorie: Worst-case..... | 127 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 7.6 | Ethernet-Simulation: Lastbeschränkung | 128 |
| 7.6.1 | Simulationsmodell für das Ethernet..... | 129 |
| 7.6.2 | Simulationsmodell für die Netzwerktopologie..... | 129 |
| 7.6.3 | Verifikation der theoretischen Mittelwerte..... | 131 |
| 7.6.4 | „Predictable“ Ethernet..... | 132 |
| 7.6.5 | Deterministisches Anwendungsprotokoll..... | 132 |
| 7.6.6 | Lastbeschränkung..... | 133 |
| 7.6.7 | Die Bezeichnung „Predictable Ethernet“..... | 135 |
| 7.7 | Simulation mit Lastbeschränkung (10 MBit/s) | 135 |
| 7.7.1 | Simulationsmodell für die einzelnen Stationen..... | 136 |
| 7.7.2 | Poisson-Prozesse..... | 136 |
| 7.7.3 | Meldungslängengenerator..... | 138 |
| 7.7.4 | Wartezeitgenerator..... | 138 |
| 7.7.5 | Resultierende Meldungsrate der Netzwerkstation..... | 138 |
| 7.7.6 | Simulationsumgebung..... | 139 |
| 7.7.7 | Simulationsparameter..... | 140 |
| 7.8 | Simulationsresultate: Einfaches Quellenmodell | 141 |
| 7.8.1 | Simulationsreihen..... | 141 |
| 7.8.2 | Simulationsresultate für das einfache Quellenmodell..... | 141 |
| 7.8.3 | Zusammenfassung der Simulationsresultate..... | 159 |
| 7.8.4 | Schlussfolgerungen aus den Simulationsresultaten mit dem einfachen Quellenmodell..... | 160 |
| 7.9 | Simulationsresultate: Erweitertes Quellenmodell | 160 |
| 7.9.1 | Status-/Control-Meldungen..... | 161 |
| 7.9.2 | Datenmeldungen..... | 161 |
| 7.9.3 | Koexistenz von Status-/Control- und von Datenmeldungen..... | 161 |
| 7.9.4 | Erweitertes Quellenmodell..... | 162 |
| 7.9.5 | Netzwerktopologie und Stationstypen..... | 163 |
| 7.9.6 | Simulationsumgebung..... | 164 |
| 7.9.7 | Simulationsreihen..... | 165 |
| 7.9.8 | Simulationsresultate..... | 165 |
| 7.9.9 | Schlussfolgerungen aus den Simulationsresultaten..... | 175 |
| 7.10 | Einfluss des TCP/IP-Transportprotokolles | 176 |
| 7.10.1 | Positive Einflüsse von TCP/IP..... | 176 |
| 7.10.2 | Negative Einflüsse von TCP/IP..... | 176 |
| 7.10.3 | Lastbeschränkung..... | 177 |
| 8 | Ethernet mit Switching | 179 |
| 8.1 | Switching | 179 |
| 8.2 | Switch-Architekturen | 181 |
| 8.2.1 | Blockierung..... | 183 |
| 8.2.2 | Switch-Steuerungssoftware..... | 183 |
| 8.2.3 | Switch-Managementsoftware..... | 184 |
| 8.2.4 | Zeitverhalten eines Switches..... | 185 |
| 8.3 | Netzwerktopologie mit Switches | 185 |
| 8.4 | Switching-Hierarchien | 186 |
| 8.5 | Die Zukunft des Switchings | 188 |

| | |
|--|------------|
| 9 Ethernet-TCP/UDP APIs | 189 |
| 9.1 Einführung | 189 |
| 9.1.1 API/ALIs | 191 |
| 9.1.2 Anwendungsprotokolle | 192 |
| 9.2 TCP/IP Instrument Protocol | 192 |
| 9.2.1 Grundlagen | 192 |
| 9.2.2 TCP/IP Instrument Protocol | 193 |
| 9.2.3 IEEE-488 Funktionen über TCP/IP | 194 |
| 9.3 Interface for Distributed Automation (IDA) | 197 |
| 9.3.1 Grundlagen | 197 |
| 9.3.2 IDA Architektur | 198 |
| 9.3.3 Real-Time Publish-Subscribe Wire Protocol | 198 |
| 9.3.4 Safety Protocol | 199 |
| 9.3.5 IDA Web-Technologie | 200 |
| 9.3.6 IDA Komponentenmodell und Engineering | 200 |
| 9.4 ProfiNet | 201 |
| 9.4.1 Grundlagen | 201 |
| 9.4.2 ProfiNet Architektur | 202 |
| 9.4.3 ProfiNet Komponentenmodell und Engineering | 203 |
| 9.5 EtherNet Industrial Protocol | 204 |
| 9.5.1 Grundlagen | 204 |
| 9.5.2 EtherNet/IP Architektur | 206 |
| 9.5.3 Control and Information Protocol CIP | 206 |
| 9.6 Foundation Fieldbus | 207 |
| 9.6.1 Grundlagen | 207 |
| 9.6.2 Foundation Fieldbus Architektur | 208 |
| 9.7 ANSI/ISA-95 | 209 |
| 9.7.1 Grundlagen | 209 |
| 9.7.2 Business to Manufacturing Markup Language | 210 |
| 9.8 Maritime Information Technology Standard (MiTS) | 210 |
| 9.8.1 MiTS Übersicht | 210 |
| 9.8.2 MiTS Softwarestruktur | 212 |
| 9.8.3 MiTS T-Profile | 214 |
| 9.8.4 MiTS A-Profile | 215 |
| 9.8.5 MiTS Companion Standards | 215 |
| 9.9 Industrial CORBA | 215 |
| 9.10 OPC DX | 217 |
| 9.10.1 Einführung: OPC und OPC DX | 217 |
| 9.10.2 OPC | 217 |
| 9.10.3 OPC DX | 222 |
| 9.11 APIs auf der Basis von XML | 224 |
| 9.11.1 XML (Extensible Markup Language) | 225 |
| 9.11.2 Message-Definition | 226 |
| 9.12 API-Standardisierung | 227 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 10 | Dezentrale Softwarearchitekturen | 229 |
| 10.1 | Dezentrale Software | 229 |
| 10.2 | Dezentrale Software-Mechanismen | 230 |
| 10.2.1 | Einführung | 230 |
| 10.2.2 | Remote Procedure Calls | 230 |
| 10.2.3 | Messages | 231 |
| 10.2.4 | Globale Daten | 232 |
| 10.2.5 | Globaler Clock | 233 |
| 10.3 | Event-Triggered- und Time-Triggered-Architekturen | 234 |
| 10.3.1 | Dezentrale Event-Triggered Architektur (ETA) | 234 |
| 10.3.2 | Dezentrale Time-Triggered Architektur (TTA) | 235 |
| 10.4 | Beispiele von dezentralen Softwarearchitekturen | 235 |
| 10.4.1 | Dezentrale SPS im asynchronem Betrieb | 235 |
| 10.4.2 | Dezentrale SPS im synchronen Betrieb | 237 |
| 10.4.3 | Dezentrales Objektsystem | 237 |
| 10.5 | Integration in unternehmensweite Netzwerke | 241 |
| 11 | Sicherheit in industriellen Netzen | 243 |
| 11.1 | Sicherheitsbegriff in der Industrieautomation | 243 |
| 11.1.1 | Abgrenzung des Sicherheitsbegriffes | 243 |
| 11.1.2 | Netzwerk- und Rechnersicherheit | 244 |
| 11.1.3 | Messung der Sicherheit | 245 |
| 11.2 | Sicherheitsbereiche | 246 |
| 11.3 | Bedrohung | 247 |
| 11.3.1 | Technische Bedrohung | 247 |
| 11.3.2 | Wahrscheinlichkeit eines Angriffes | 248 |
| 11.4 | Sicherheitsmechanismen | 251 |
| 11.5 | Planung der Sicherheit | 251 |
| 11.5.1 | Sicherheitsstrategie | 254 |
| 11.5.2 | Sicherheitsperimeter | 256 |
| 11.5.3 | Bedrohung | 256 |
| 11.5.4 | Sicherheitsarchitektur und Sicherheitsmechanismen | 257 |
| 11.5.5 | Überwachung | 260 |
| 11.6 | IPSec | 260 |
| 12 | Redundanz und Fehlertoleranz | 263 |
| 12.1 | Verfügbarkeit und Fehlertoleranz | 263 |
| 12.2 | Netzwerkredundanz (Ethernet-Redundanz) | 264 |
| 12.2.1 | Fehleranalyse für das Automatisierungsnetzwerk | 264 |
| 12.2.2 | Redundanz | 265 |
| 12.2.3 | Wechsel auf das redundante Netzwerk | 267 |
| 12.3 | Steuerungsredundanz | 269 |
| 12.3.1 | Hardwareredundanz | 270 |
| 12.3.2 | Softwareredundanz | 270 |

| | |
|---|------------|
| 13 Ethernet-TCP/IP Planung und Einsatz | 273 |
| 13.1 Planung | 273 |
| 13.2 Zeitverhalten | 277 |
| 13.3 Sicherheit | 279 |
| 13.4 Netzwerkarchitektur und Topologie | 280 |
| 13.4.1 Netzwerkarchitektur | 280 |
| 13.4.2 Netzwerktopologie | 283 |
| 13.5 Industrietaugliche Installation | 284 |
| 13.5.1 Industrielle Umgebung | 284 |
| 13.5.2 Galvanische Isolation | 284 |
| 13.5.3 Erdung | 285 |
| 13.5.4 Stromversorgung | 285 |
| 13.5.5 Zerstörungsschutz | 285 |
| 13.5.6 Übertragungsmedien | 286 |
| 13.5.7 Kabel und Stecker | 287 |
| 13.6 Implementierung | 287 |
| 13.6.1 Produkte | 287 |
| 13.6.2 Lastbeschränkung | 288 |
| 13.6.3 TCP/IP-Treibersoftware | 290 |
| 13.6.4 Intelligente Netzwerkadapter | 290 |
| 13.7 Betrieb | 291 |
| 13.8 Normen für die Installation | 292 |
| 14 Internet und Web-Technologie | 293 |
| 14.1 Internet und World Wide Web | 293 |
| 14.2 Internet | 294 |
| 14.2.1 Internet Grundlagen | 294 |
| 14.2.2 Internet-Technologieelemente | 295 |
| 14.2.3 Internet-Sicherheitsmechanismen | 297 |
| 14.3 World Wide Web | 299 |
| 14.3.1 Grundlage des World Wide Web | 299 |
| 14.3.2 World Wide Web Technologieelemente | 300 |
| 14.3.3 World Wide Web Sicherheitsmechanismen | 305 |
| 14.4 Web-Technologie in der Industrieautomation | 309 |
| 14.4.1 Vertikale Integration | 310 |
| 14.4.2 Horizontale Integration | 313 |
| 14.4.3 E-Manufacturing | 314 |
| 15 Industrieautomation als Systemintegration | 317 |
| 15.1 Einführung | 317 |
| 15.2 Ziel der Industrieautomation | 318 |
| 15.3 Architektur einer industriellen Automationslösung | 318 |
| 15.4 Methodik | 319 |

| | |
|--|------------|
| Literaturverzeichnis | 321 |
| Bücher und Zeitschriften (Bibliografie) | 321 |
| Internet-Adressen (Cybergrafie) | 332 |
| Abkürzungen | 337 |
| Sachwörterverzeichnis | 341 |