

HANSER



Leseprobe

zu

Vernetzte Systeme für die Automatisierung 4.0

von Reinhard Langmann

Print-ISBN: 978-3-446-46939-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-46984-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446469396>
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| Vorwort | XI |
| TEIL A Grundlagen und Bussysteme | 1 |
| 1 Grundlagen vernetzter Systeme | 5 |
| 1.1 Verteilte Automatisierung | 5 |
| 1.1.1 Organisationsstruktur | 5 |
| 1.1.2 Informationsaustausch | 7 |
| 1.1.2.1 Punkt-zu-Punkt-Verbindung | 9 |
| 1.1.2.2 Lokale Netze | 10 |
| 1.1.2.3 Zentrale/dezentrale Automatisierungsstrukturen | 11 |
| 1.2 Lokale Netze | 14 |
| 1.2.1 Netztopologien | 15 |
| 1.2.2 Übertragungsmedien | 16 |
| 1.2.2.1 Zweidrahtleitung | 16 |
| 1.2.2.2 Koaxialleitung | 18 |
| 1.2.2.3 Lichtwellenleiter | 18 |
| 1.2.3 Datenübertragung | 19 |
| 1.2.3.1 Basisband | 19 |
| 1.2.3.2 Trägerband | 20 |
| 1.2.3.3 Breitband | 21 |
| 1.2.4 Zugriffsverfahren | 22 |
| 1.2.4.1 Master-Slave-Verfahren | 22 |
| 1.2.4.2 Multimaster-Prinzip | 23 |
| 1.3 Kommunikationsmodelle | 26 |
| 1.3.1 Protokollmodelle | 26 |
| 1.3.1.1 OSI-Referenzmodell | 27 |
| 1.3.1.2 TCP/IP-Protokoll | 32 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1.3.2 | Verbindungsmodelle | 33 |
| 1.3.2.1 | Verbindungsorientierte Übertragungsverfahren | 33 |
| 1.3.2.2 | Verbindungslose Übertragungsverfahren | 34 |
| 1.3.3 | Client-Server-Modell versus Pub-/Sub-Modell | 35 |
| 1.3.4 | Objektorientierte Kommunikation | 37 |
| 1.3.5 | Prüftechniken und Verifikation | 39 |
| 1.4 | Eingebettete Systeme und Vernetzung | 41 |
| 1.4.1 | Charakterisierung | 41 |
| 1.4.1.1 | Eingebettete Systeme | 41 |
| 1.4.1.2 | Cyber-Physical Systems | 43 |
| 1.4.2 | Hard- und Softwarekomponenten | 45 |
| 1.4.2.1 | Hardware | 45 |
| 1.4.2.2 | Software | 48 |
| 1.4.2.3 | Vernetzung | 49 |
| 1.4.3 | Anwendungsbeispiel: Raspberry Pi | 51 |
| 1.5 | Übungsaufgaben | 53 |
| 2 | Bussysteme | 55 |
| 2.1 | Kommunikationsschnittstellen | 55 |
| 2.1.1 | Punkt-zu-Punkt-Verbindungen | 56 |
| 2.1.1.1 | Parallele Schnittstellen | 56 |
| 2.1.1.2 | Serielle Schnittstellen | 57 |
| 2.1.2 | Busschnittstellen | 62 |
| 2.1.2.1 | Eigenschaften einer Busleitung | 62 |
| 2.1.2.2 | System- und Peripheriebusse | 64 |
| 2.1.2.3 | Prozess- und Feldbusse | 69 |
| 2.2 | Feldbussysteme | 70 |
| 2.2.1 | Technische Ausprägung lokaler Netze | 70 |
| 2.2.2 | Der Fabrikbus MAP/MMS | 73 |
| 2.2.3 | Ausgewählte Feldbussysteme | 74 |
| 2.2.3.1 | PROFIBUS | 75 |
| 2.2.3.2 | INTERBUS | 79 |
| 2.2.3.3 | CAN | 83 |
| 2.2.3.4 | ASi | 85 |
| 2.2.3.5 | SERCOS | 89 |
| 2.2.3.6 | LON | 90 |
| 2.3 | Offene Kommunikation | 92 |
| 2.3.1 | Offene Steuerungen und Systeme | 92 |
| 2.3.2 | Grundlagen von OPC | 94 |
| 2.3.3 | Kommunikation mit OPC Unified Architecture | 99 |
| 2.4 | Übungsaufgaben | 104 |

| | | |
|---------------|---|------------|
| TEIL B | Industrial Ethernet und mobile Kommunikation | 107 |
| 3 | Industrial Ethernet | 109 |
| 3.1 | Netzwerktechnik mit Ethernet | 109 |
| 3.1.1 | Grundlagen von Ethernet | 110 |
| 3.1.1.1 | Physikalische Realisierungsvarianten | 110 |
| 3.1.1.2 | Datenübertragung und Zugriffsverfahren | 114 |
| 3.1.1.3 | Power over Ethernet | 118 |
| 3.1.2 | Gerätetechnik und Topologien | 120 |
| 3.1.2.1 | Klassische Ethernet-Topologie | 120 |
| 3.1.2.2 | Netzwerkkomponenten | 120 |
| 3.1.2.3 | Switched Ethernet | 123 |
| 3.1.3 | Management und Diagnose | 125 |
| 3.2 | Sicherheit in Netzen | 126 |
| 3.2.1 | Sicherheit in Unternehmensnetzen | 126 |
| 3.2.2 | Techniken zum Schutz des Netzes | 128 |
| 3.2.3 | Sicherheit in der Praxis | 130 |
| 3.3 | Ethernet und Internettechnologien | 131 |
| 3.3.1 | TCP/IP und Internet | 131 |
| 3.3.1.1 | TCP/IP im OSI-Referenzmodell | 131 |
| 3.3.1.2 | Adressierung im IP-Protokoll | 133 |
| 3.3.1.3 | TCP-Protokoll | 134 |
| 3.3.1.4 | UDP-Protokoll | 136 |
| 3.3.1.5 | Internet-Anwendungsprotokolle | 136 |
| 3.3.2 | WWW im Internet | 138 |
| 3.3.2.1 | Grundprinzip des Webs | 139 |
| 3.3.2.2 | Anwendungsprotokoll HTTP | 142 |
| 3.4 | Ethernet-basierte Echtzeitbussysteme | 144 |
| 3.4.1 | Einführung und Übersicht | 144 |
| 3.4.2 | Ausgewählte Bussysteme | 146 |
| 3.4.2.1 | EtherNet/IP | 146 |
| 3.4.2.2 | PROFINET | 147 |
| 3.4.2.3 | EtherCAT | 150 |
| 3.4.2.4 | SERCOS III | 152 |
| 3.4.3 | Ausblick zu industriellem Echtzeit-Ethernet | 154 |
| 3.5 | Übungsaufgaben | 156 |
| 4 | Mobile Kommunikation | 159 |
| 4.1 | Technische Grundlagen | 159 |
| 4.1.1 | Funkübertragung | 160 |
| 4.1.1.1 | Signalausbreitung | 160 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.1.1.2 | Satellitenübertragung | 163 |
| 4.1.1.3 | Regulierungen zu den Frequenzbereichen | 165 |
| 4.1.2 | Übertragungs- und Zugriffsverfahren | 166 |
| 4.1.2.1 | Bandspreizung | 166 |
| 4.1.2.2 | Multiplexing | 168 |
| 4.1.3 | Drahtlos und mobil in der Industrie | 169 |
| 4.2 | Drahtlose lokale Netze | 172 |
| 4.2.1 | Wireless Local Area Network | 173 |
| 4.2.1.1 | Netzarchitektur | 174 |
| 4.2.1.2 | OSI-Referenzmodell für WLAN | 175 |
| 4.2.1.3 | Roaming und Wireless Mesh Network | 177 |
| 4.2.1.4 | WiMAX | 179 |
| 4.2.2 | Wireless Personal Area Networks | 180 |
| 4.2.2.1 | Bluetooth | 181 |
| 4.2.2.2 | ZigBee | 184 |
| 4.2.2.3 | EnOcean | 186 |
| 4.2.2.4 | WirelessHART | 187 |
| 4.2.2.5 | RFID & NFC | 189 |
| 4.2.3 | Eingebettete Systeme und drahtlose Netze | 191 |
| 4.3 | Weitverkehrsnetze | 193 |
| 4.3.1 | Grundlagen Mobilfunk | 195 |
| 4.3.1.1 | Mobilfunkgenerationen | 195 |
| 4.3.1.2 | Struktur eines Mobilfunknetzes | 196 |
| 4.3.1.3 | Identifikation und Anwendungsprofile | 197 |
| 4.3.2 | GSM, UMTS und weitere Generationen | 198 |
| 4.3.2.1 | GSM/GPRS | 198 |
| 4.3.2.2 | UMTS | 200 |
| 4.3.2.3 | LTE | 200 |
| 4.3.2.4 | 5G | 201 |
| 4.3.3 | Low-Power-Weitverkehrsnetze | 202 |
| 4.3.3.1 | LoRaWAN | 203 |
| 4.3.3.2 | SigFox | 204 |
| 4.4 | Sicherheit in drahtlosen Netzen | 204 |
| 4.4.1 | Einführung | 205 |
| 4.4.2 | Verschlüsselung und Authentisierung | 205 |
| 4.4.3 | Überwachung | 206 |
| 4.4.4 | Schutzmaßnahmen | 207 |
| 4.5 | Übungsaufgaben | 210 |

| | | |
|---------------|--|------------|
| TEIL C | Cyber-Physical Systems und deren Vernetzung | 213 |
| 5 | Cyber-Physical Systems und deren Vernetzung | 217 |
| 5.1 | Digitalisierung der Produktion | 217 |
| 5.1.1 | Cyber-Physical System (CPS) | 218 |
| 5.1.1.1 | Definition | 218 |
| 5.1.2 | Industrie 4.0 und Industrial Internet (IIoT) | 225 |
| 5.1.2.1 | Definition von Industrie 4.0 | 225 |
| 5.1.2.2 | Was ist das Industrial Internet? | 230 |
| 5.1.2.3 | IoT und IIoT | 231 |
| 5.1.3 | Cloud-Computing | 236 |
| 5.1.3.1 | Was ist Cloud-Computing? | 237 |
| 5.1.3.2 | Anwendungen in der Industrial Cloud | 241 |
| 5.2 | Das neue Automatisierungsmodell | 245 |
| 5.2.1 | CPS-basierte Automation | 245 |
| 5.2.1.1 | Automatisierungsmodell | 246 |
| 5.2.1.2 | IoT-/IIoT-Plattformen | 248 |
| 5.2.2 | Referenzarchitekturen für Industrie 4.0 und IIoT | 251 |
| 5.2.2.1 | Referenzarchitektur für Industrie 4.0 | 251 |
| 5.2.2.2 | Industrial Internet Reference Architecture | 255 |
| 5.2.2.3 | Vergleich von RAMI 4.0 mit IIRA | 257 |
| 5.2.3 | Das Dienstparadigma in der Automatisierung | 259 |
| 5.2.3.1 | Dienste in der Automatisierungstechnik | 259 |
| 5.2.3.2 | Automatisierungsfunktionen als Service | 262 |
| 5.2.3.3 | Smart Services | 263 |
| 5.3 | Kommunikation | 265 |
| 5.3.1 | Obere Anwendungsschicht | 266 |
| 5.3.1.1 | OPC UA | 267 |
| 5.3.1.2 | DDS | 269 |
| 5.3.1.3 | OPC UA versus DDS | 273 |
| 5.3.1.4 | Alternative Kommunikationsschnittstellen | 275 |
| 5.3.2 | Untere Anwendungsschicht | 277 |
| 5.3.2.1 | HTTP und REST | 277 |
| 5.3.2.2 | WebSocket | 280 |
| 5.3.2.3 | MQTT | 283 |
| 5.3.2.4 | CoAP | 286 |
| 5.3.3 | MQTT versus OPC UA und DDS | 287 |
| 5.4 | Vernetzung | 291 |
| 5.4.1 | Zeitdeterministisches Ethernet | 291 |
| 5.4.1.1 | TSN | 291 |
| 5.4.1.2 | OPC UA over TSN | 294 |

| | | |
|---------------|---|------------|
| 5.4.1.3 | DDS und TSN | 295 |
| 5.4.1.4 | Zeitdeterministik im WAN | 297 |
| 5.4.2 | Drahtlose und mobile Vernetzung | 298 |
| 5.4.2.1 | 5G für Industrie 4.0 | 299 |
| 5.4.2.2 | 5G und TSN | 301 |
| 5.4.3 | Weiterentwicklungen des Übertragungsmediums | 303 |
| 5.4.3.1 | Single Pair Ethernet | 303 |
| 5.4.3.2 | Strahlende Kabel | 305 |
| 5.5 | Übungsaufgaben | 306 |
| TEIL D | Anhang | 315 |
| | Lösungen zu den Übungsaufgaben | 317 |
| | Normen und Standards | 343 |
| | Abkürzungen | 347 |
| | Glossar | 359 |
| | Index | 367 |

Vorwort

Das vorliegende Lehrbuch beschäftigt sich mit vernetzten Systemen für die Automatisierung und behandelt diese Thematik in drei Teilen:

- Grundlagen und Bussysteme (Teil A)
- Industrial Ethernet und mobile Kommunikation (Teil B)
- Cyber-Physical Systems und deren Vernetzung (Teil C)

Die Themen Vernetzung und Kommunikation in der Automatisierung sind zwar in verschiedenen Fachbüchern der Automatisierungstechnik bereits in unterschiedlichen Kontexten abgehandelt, aber immer nur in Teilen bzw. bezogen auf spezifische Anwendungen, Branchen oder funktionelle automatisierungstechnische Strukturen. Es handelt sich vielfach um umfangreiche Wissensbücher, die für Lehr- und Lernzwecke nur schwierig verwendet werden können.

Die seit etwa 2012 zu beobachtende rasante Entwicklung bei der Digitalisierung der Produktion und der gesamten Wirtschaft – insbesondere durch Industrie 4.0, Industrial Internet of Things und Cloud-Computing für die Industrie – hat dazu geführt, dass die Vernetzungsthematik eine Schlüsselrolle bei der digitalen Automatisierung technischer Prozesse spielt. Ohne eine allgegenwärtige und permanente Vernetzung der Anlagen, Maschinen und Geräte untereinander und mit anderen Systemen und Diensten sind zukünftige Automatisierungssysteme nicht mehr denkbar.

Das Lehrbuch greift diese Herausforderung auf und bringt die unterschiedlichen Vernetzungsaspekte von Automatisierungskomponenten und -systemen in kompakter und studierbarer Form zusammen. Das Buch behandelt in den drei Teilen alle wesentlichen Aspekte der Vernetzung in übersichtlicher, strukturierter und auf das Wesentliche bezogene Maß, angefangen bei den Grundlagen der kabelgebundenen und drahtlosen Vernetzung über Feldbussysteme bis hin zu Cyber-Physical Systems und deren Vernetzung. Dabei werden die einzelnen Aspekte der Vernetzung in den Gesamtkontext aktueller Automatisierungstrends eingeordnet.

Das Buch ist als Lehr- und Lernbuch bzw. Studienbuch insbesondere für Hochschulen und Universitäten, aber auch für berufliche Bildungseinrichtungen konzipiert. Es beinhaltet deshalb auch zahlreiche Übungsaufgaben (einschließlich Lösungen) zu jedem Kapitel. Durch die Einbeziehung einer Reihe von prägnanten Use Cases aus der Industrie wird der Einsatz in der betrieblichen Praxis veranschaulicht. Über 240 Verweise auf Videos und andere weiterführende Wissensquellen runden den Inhalt ab. Das Lehrbuch wendet sich insbesondere an Studierende der Ingenieurwissenschaften in den Branchen Elektrotechnik, Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik sowie an Auszubildende und Praktiker, die sich mit der Automatisierung technischer Prozesse und mit der Digitalisierung der Produktion befassen. Die übergreifende und integrative Sichtweise kann aber auch denen, die im Management tätig sind, neue Anregungen geben.

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, mich beim Carl Hanser Verlag und dabei insbesondere bei Frau Julia Stepp für die kompetente, hilfreiche und engagierte Unterstützung dieses Buchvorhabens zu bedanken. Außerdem gilt mein Dank allen Studierenden der Automatisierungstechnik an der Hochschule Düsseldorf, die mit ihren Beiträgen in dieser oder jener Weise zum Inhalt des Buches beigetragen haben.

Ich wünsche allen Lesern ein erfolgreiches Studium mit diesem Lehrbuch.

Solingen, im März 2021

Reinhard Langmann

TEIL A

Grundlagen und Bussysteme

Vernetzte und eingebettete Systeme adressieren die enge Verbindung dieser Systeme zur Überwachung und Steuerung physikalischer Vorgänge mittels Sensoren und Aktuatoren über Kommunikationseinrichtungen mit digitalen Netzen. Die Systeme ermöglichen über Wirkketten eine Verbindung zwischen Vorgängen der physischen Realität und den heute verfügbaren digitalen Netzinfrastrukturen. Dies erlaubt vielfältige Applikationen mit hohem wirtschaftlichen Potenzial und mit starker Innovationskraft. Vom Einsatz dieser Systeme in der Automatisierung technischer Prozesse erwartet man einen wesentlichen Schritt zur Digitalisierung der Produktion, der mit einer steigenden Effizienz und Leistung der automatisierten Produktionseinrichtungen verbunden ist.

Es gibt sehr unterschiedliche Ausprägungen vernetzter Systeme, angefangen bei einfachen seriellen Anbindungen bis hin zu globalen Netzwerken mit vielfältig eingebundenen Systemen. Dabei lassen sich die Systeme grob in folgende Kategorien einteilen:

- lokale Systeme, ausgerichtet auf isolierte Kontroll- und Regelfunktionen
- lose vernetzte Systeme
- Netzwerke funktional eng gekoppelter Systeme
- global vernetzte Systeme

Es gibt keinen Zweifel, dass für die Vernetzung dieser Systeme Bussysteme eine sehr wichtige Rolle spielen, weshalb sich jeder, der in der Automatisierungstechnik tätig ist, mit ihnen beschäftigen muss. Betrachtet man vernetzte Systeme mit ihrem Fokus auf Vernetzung und Kommunikation, dann wird schnell klar, dass Bussysteme das Rückgrat vernetzter Systeme bilden.

Die beiden vorherrschenden Trends in der Automatisierungstechnik – Dezentralisierung und Integration – sind ohne Bussysteme nicht denkbar.

Die *Dezentralisierung* betrifft insbesondere die unteren Ebenen der Automatisierungshierarchie (Feldebene, Steuerebene), also die Ebenen, in der die Sensoren, Aktoren und Steuerungen angeordnet sind. Bisherige zentrale Einheiten werden auf kleinere dezentrale Einheiten aufgeteilt und durch z.B. Feldbussysteme verbunden.

Für die *Integration* müssen bisherige separierte und proprietäre Systeme kommunikationstechnisch verbunden werden. Dies betrifft insbesondere die vertikale Integration, bei der Systeme aus den oberen Ebenen der Automatisierungshierarchie (Führungsebene, Leitebene, Planungsebene) mit der Steuer- und Feldebene zusammenarbeiten müssen, damit Planungsvorgaben direkt in diese unteren Automatisierungsebenen gelangen und umgekehrt die Führungs- und Leitebenen aktuelle Rückmeldungen aus dem Produktionsbetrieb erhalten können.

Beide Trends, Dezentralisierung und Integration, benötigen als gemeinsame und unverzichtbare Voraussetzung eine enge Vernetzung mit Bussystemen.

Um fachkompetente Entscheidungen hinsichtlich Einsatz, Bedienung, Wartung, Pflege und Beschaffung vernetzter Systeme treffen zu können, bedarf es zuallererst anwendungsbereiter Kenntnisse zu den Grundlagen vernetzter Systeme sowie zu klassischen Bussystemen der Automatisierungstechnik.

1

Grundlagen vernetzter Systeme

■ 1.1 Verteilte Automatisierung

Automatisierungsaufgaben können prinzipiell mit einer zentralen oder dezentralen Automatisierungsstruktur gelöst werden. Welche Struktur besser geeignet ist, hängt von dem zu automatisierenden technischen Prozess oder Produktionsvorgang ab. Bei komplexen technischen Prozessen zeigt sich aber seit mehreren Jahren ein deutlicher Trend hin zu dezentralen und räumlich verteilt aufgebauten Automatisierungssystemen.

Möglich geworden ist diese Entwicklung durch die Fortschritte auf dem Gebiet der Mikro- und Optoelektronik sowie der Informations- und Kommunikationstechnik. Es entstanden einerseits neuartige und effiziente Strukturen zur seriellen Kommunikation zwischen dezentralen Automatisierungseinheiten, und andererseits wurde die Funktionalität der Automatisierungseinheiten selbst beträchtlich erweitert. Damit werden verteilte Automatisierungssysteme möglich, die sich nicht selten über alle Bereiche einer Anlage oder Fabrik erstrecken.

1.1.1 Organisationsstruktur

Komplexe Automatisierungssysteme sind aufgrund hierarchisch strukturierter technischer Prozesse und Entscheidungsstrukturen meist gleichfalls *hierarchisch* organisiert. Als klassisches Modell einer solchen hierarchischen Automatisierungsstruktur ergibt sich in Analogie zur Auftragshierarchie die in Bild 1.1 dargestellte Pyramide, die in mehrere Ebenen unterteilt ist.

Die Struktur nach Bild 1.1 ermöglicht eine klare Aufteilung der Automatisierungsaufgaben und ihre Lösung durch abgegrenzte und optimal abgestimmte geräte-technische Einheiten. Die einzelnen Strukturkomponenten innerhalb einer Ebene und die Ebenen untereinander sind informationstechnisch verbunden. Es erfolgt ein *horizontaler* und *vertikaler* Informationsaustausch mit relativ hohem Kommu-

nikationsaufkommen. Zur Beherrschung dieses Informationsaustausches haben sich Grundsätze herausgebildet, die für jede Ebene eingehalten werden sollten:

- Die Informationsgewinnung und -verarbeitung muss auf jeder Ebene so autark wie möglich sein. Jede Ebene sollte ihre eigenen Daten bereits vorverarbeiten und auch eine eigene Datenhaltung besitzen.
- Der Informationsaustausch zwischen den Ebenen soll so gering wie möglich sein. Zeitkritische Entscheidungen sollen bereits vor Ort getroffen werden.
- Alle Schnittstellen müssen physikalisch und inhaltlich genau definiert sein und eine maximale Entkopplung der Ebenen unterstützen.

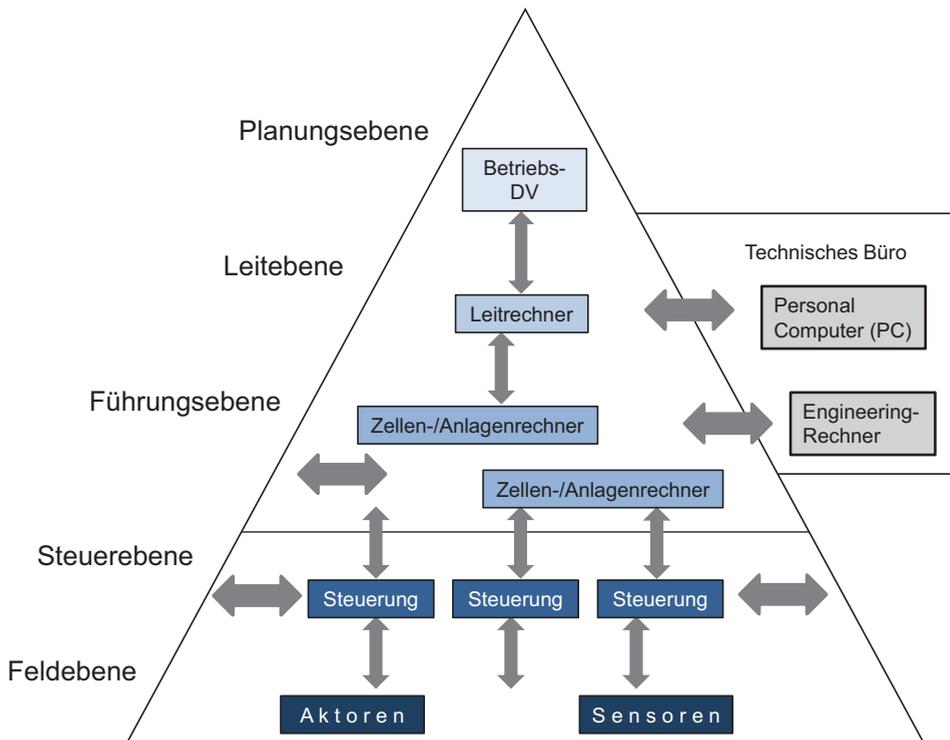


Bild 1.1 Hierarchische Automatisierungsstruktur mit horizontaler und vertikaler Kommunikation

Die Aufgaben, die auf den einzelnen Ebenen gelöst werden müssen, sind z. B. in [1] ausführlich beschrieben. Auf der obersten Ebene geschieht die Aufgabenbeschreibung und die Ermittlung von Führungsgrößen auf sehr abstraktem Niveau. Die Lenkung und Steuerung des technischen Prozesses wird auf den mittleren Ebenen schrittweise präzisiert, und auf der untersten Ebene werden Stellglieder mit Sollwerten beaufschlagt und Messgrößen aufgenommen. Die Prozess- und Betriebs-

parameter werden von unten nach oben verdichtet und gelangen in zunehmend abstrakter Form zur Korrektur von Steuer- und Regelvorgaben der verschiedenen Ebenen bis zur Spitze der Hierarchie zurück.

Für die zu realisierenden Aufgaben auf den Automatisierungsebenen können zwar einige typische Inhalte angegeben werden, abhängig vom technischen Prozess und dem speziellen produktionstechnischen Umfeld können aber sehr verschiedene Lösungen für eine konkrete Automatisierungshierarchie entstehen. Die Struktur nach Bild 1.1 mit fünf Ebenen findet man z. B. mehr in der Fertigungsautomatisierung, während bei der Automatisierung verfahrenstechnischer Prozesse eher eine drei- bis vierstufige Hierarchie zum Einsatz gelangt.

In Zusammenhang mit der Diskussion zur Vereinfachung von Unternehmensstrukturen und Entscheidungswegen (Lean-Methode) gibt es auch Ansätze zur Verflachung der Organisationsstruktur von Automatisierungssystemen. Die Veränderungen führen dabei zu flachen Strukturen mit gekapselter Verantwortung und zu Teilsystemen mit maximaler Autonomie und minimalem Informationsfluss. Kommunikation erfolgt nicht über vertikale Hierarchie-, sondern über horizontale Leistungsebenen. Die Vorteile einer solchen Organisationsstruktur sind vor allem hohe Flexibilität und Erweiterbarkeit, bessere Handhabbarkeit, Fehlertolerierbarkeit und anderes. Im Bereich der Fertigungsautomatisierung werden die Diskussionen auch mit dem neueren Industrie 4.0-Paradigma verbunden [2].

In Zusammenhang mit der Nutzung von Automatisierungskomponenten als Cyber-Physical Systems (CPS), dem Cloud-Computing und der Einführung des Dienstprinzips für Automatisierungsfunktionen gibt es insbesondere für die Fertigungsautomatisierung die Vorstellung, dass sich die klassische Automatisierungspyramide auflöst (zumindest hardwaremäßig) und die Automatisierungskomponenten als Software vollständig in einer Cloud verteilt werden können. Man spricht dann auch von *CPS-basierter* oder *Cloud-basierter Automatisierung* bzw. Automation [3].

Andere Konzepte in Zusammenhang mit der Prozessautomatisierung und Industrie 4.0, wie z. B. die Namur Open Architecture (NOA), erweitern die klassische Automatisierungspyramide um weitere Komponenten, um schnelllebige IT-Komponenten flexibel integrieren zu können [4].



<https://bit.ly/3BINfxq>

1.1.2 Informationsaustausch

Alle Automatisierungsebenen in Bild 1.1 müssen vertikal informationstechnisch miteinander verbunden sein, wobei sich die Menge der zu übertragenden Daten und die notwendige Übertragungszeit in Übereinstimmung mit dem Planungshorizont zwischen einzelnen Ebenen wesentlich unterscheidet (Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1 Kommunikationsanforderungen innerhalb einer Automatisierungshierarchie

| Ebene | Planungshorizont | Anforderungen an die Kommunikation | |
|---------------|------------------|------------------------------------|------------------|
| | | Datenmenge | Übertragungszeit |
| Betriebsebene | Monat bis Jahr | MByte | min |
| Leitebene | Woche | | |
| Führungsebene | Tag | KByte | s |
| Steuerebene | s bis h | Byte | 0,1 s |
| Feldebene | ms | Bit | ms |

Auf der unteren Ebene (Feldebene) sind kleine Datenmengen, z. B. Messwerte von hoher Aktualität, zwischen vielen Partnern über kostengünstige und robuste Kommunikationsmedien zu übertragen. Die Informationsübermittlung muss mit hoher Geschwindigkeit in Echtzeit erfolgen, damit z. B. Gefahrenzustände sofort einen Schnellstopp von Antrieben durchführen können.



<https://bit.ly/36LRcH1>

Gegenwärtig besitzen noch viele klassische Sensoren und Aktoren keine eigene Informationsverarbeitung, sodass sie unmittelbar an die Steuerebene angekoppelt sind und man von Kommunikation im eigentlichen Sinne noch nicht sprechen kann. Durch die Fortschritte in der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik vollzieht sich aber auch hier ein prägnanter Wandel. Komplexere Sensoren, wie z. B. moderne Ultraschallsensoren, besitzen bereits im Sensor eine eigene Verarbeitungsleistung und kommunizieren mit der Steuerungsebene über serielle Schnittstellen. Dadurch gelingt es, die Verarbeitungsleistung auf der Ebene insgesamt zu erhöhen und gleichzeitig den Datenaustausch zwischen der Feldebene und der Steuerebene zu reduzieren, weil nur noch die für die überlagerte Ebene relevanten Daten in verdichteter Form übertragen werden.

Wesentlich ausgeprägter ist die „Intelligenz“ der Automatisierungseinheiten auf der Steuerebene. Sie kommunizieren nicht nur mit den Systemen der übergeordneten Führungsebene, sondern auch relativ umfangreich mit Komponenten innerhalb der Ebene.

Mit steigender Hierarchiestufe der Automatisierungsebenen sind die Aufgaben zwangsläufig stärker zentralisiert. Die Anzahl der beteiligten Automatisierungseinheiten nimmt zwar ab, aber die Einheiten selbst werden leistungsfähiger. Die Häufigkeit der Einzelübertragungen zwischen ihnen wird geringer, dagegen steigt die Größe und die Dauer der Aktualität der zu übertragenden Daten (z. B. NC-Programme, Messprotokolle). Die Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit nehmen ab. Das Kommunikationsmedium muss eine hohe Datenmenge bewältigen. Tabelle 1.2 listet einige Übertragungszeiten bei unterschiedlichen Datenraten für typische Datenpakete auf den höheren Automatisierungsebenen auf.

Tabelle 1.2 Übertragungszeiten bei unterschiedlichen Datenraten

| Datenpaket | Datenmenge | Übertragungszeit | | | |
|------------------------|------------|------------------|----------------|---------------|----------------|
| | | bei 1,2 Kbit/s | bei 500 Kbit/s | bei 10 Mbit/s | bei 100 Mbit/s |
| NC-Programm | 8 kB | 53,3 s | 0,13 s | 6 ms | 0,06 ms |
| Konstruktionszeichnung | 2,5 MB | 4,62 h | 40 s | 2 s | 0,2 s |

Jede Ebene arbeitet im Wesentlichen mit den Daten, die ihr zugewiesen sind. Daten, die an höhere Ebenen weitergegeben werden müssen, sind vorher zu reduzieren und zu verdichten. Die damit verbundene Informationskonzentration verhindert, dass eine Ebene mit Informationen anderer Bereiche überlastet wird. Daten, die an eine untergeordnete Ebene übertragen werden sollen, werden häufig vorher um Zusatzinformationen ergänzt. Die Einhaltung der Grundsätze, dass jede Ebene so autark wie möglich und der Informationsfluss zwischen den Ebenen so gering wie möglich ist, bewirkt, dass der horizontale Datenfluss auf jeder Ebene zunimmt. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von Kommunikationsstrukturen in einer Automatisierungshierarchie, die im Folgenden beschrieben werden.

1.1.2.1 Punkt-zu-Punkt-Verbindung

Eine Automatisierungshierarchie mit *Punkt-zu-Punkt-Verbindung* (P2P - Point-to-Point) ist in Bild 1.2 dargestellt.



<https://bit.ly/3hRFwIO>

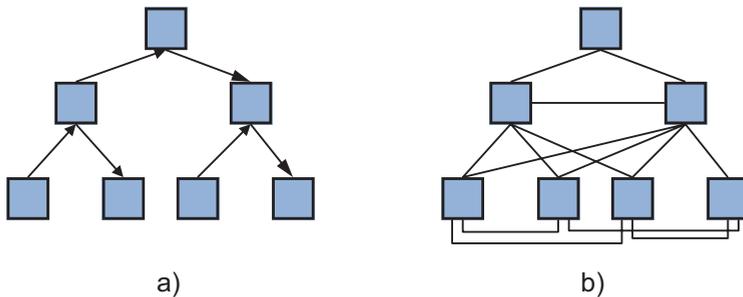


Bild 1.2 Automatisierungshierarchie mit Punkt-zu-Punkt-Verbindungen: a) ohne Querverkehr, b) mit Querverkehr

Bei der Struktur nach Bild 1.2a ist wegen des fehlenden Querverkehrs eine Kommunikation zwischen zwei Komponenten der gleichen Ebene nur auf dem Umweg über die nächsthöhere Ebene möglich. Das bringt lange Informationswege mit sich. Die Information wird bei starker Belastung der übergeordneten Ebene unter Umständen verzögert.

Auf den unteren Ebenen, wo eine schnelle Übertragung besonders wichtig ist, muss man einen Querverkehr einführen, damit die Geräte und Einheiten einer

Ebene untereinander Daten austauschen können. Man verdrahtet also viele Kommunikationspartner miteinander. Es entsteht ein vermaschtes Netz (Bild 1.2b), bei dem sehr leicht die Verkabelungskosten 50% der Gerätekosten ausmachen können. Punkt-zu-Punkt-Verbindungen mit zum Teil erheblichen Querverkehr werden heute in Automatisierungssystemen immer noch häufig angetroffen. Neuere Automatisierungssysteme versuchen, diese oft unübersichtlichen Strukturen weitestgehend zu vermeiden. Trotz ihrer Nachteile werden Kommunikationsstrukturen mit Punkt-zu-Punkt-Verbindungen aufgrund ihrer einfachen und weithin bekannten Verschaltungstechnik bei weniger komplexen Systemen und für spezielle Anwendungen (z. B. Anschaltung eines Druckers oder einzelner Messgeräte an einen Prozessrechner) auch weiterhin ihren Einsatz finden.

1.1.2.2 Lokale Netze

Eine andere Art von Kommunikationsstruktur hat sich in der Kommunikationstechnik und Datenverarbeitung Mitte der 1970er Jahre herausgebildet. Es handelt sich dabei um *serielle Bussysteme* und um *lokale Netze* (LAN – Local Area Network). Bei Ausdehnungen im Bereich der Prozessrechnerbaugruppen (bis einige Meter) spricht man meist von seriellen Bussystemen, bei größeren Entfernungen (oberhalb von einigen Metern) dagegen von lokalen Netzen. Bild 1.3 zeigt beispielhaft die Anwendung eines lokalen Netzes in einer Automatisierungshierarchie mit drei Ebenen.

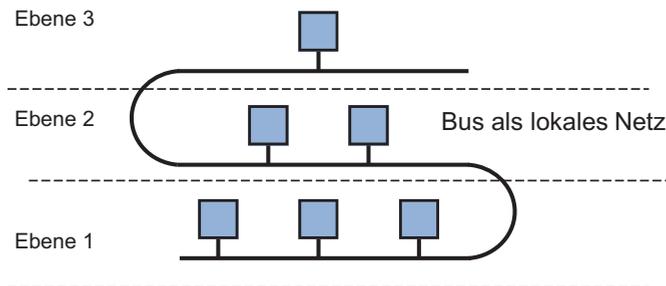


Bild 1.3 Einsatz eines lokalen Netzes in einer Automatisierungshierarchie

Lokale Netze und serielle Bussysteme sind übersichtlich in Struktur und Aufbau und unterstützen insbesondere die *horizontale Kommunikation*. Die Anforderungen der Automatisierungstechnik an diese Kommunikationsstrukturen sind sehr unterschiedlich und beziehen sich z. B. auf die Datenübertragungsgeschwindigkeit, die Anzahl der anzuschließenden Komponenten oder die mögliche räumliche Ausdehnung. In den vergangenen Jahren wurden ca. 50 verschiedene lokale Netze speziell für die Automatisierungstechnik entwickelt, davon allein 31 unterschiedliche Systeme, die auf Ethernet basieren [5].

1.1.2.3 Zentrale/dezentrale Automatisierungsstrukturen

Für verteilte bzw. vernetzte Automatisierungssysteme ist die Automatisierungsstruktur, bezogen auf ihre Zentralität bzw. Dezentralität, von wesentlicher Bedeutung für die Art der erforderlichen Kommunikationsstruktur.



<https://bit.ly/2UXCsII>

Grundsätzlich lassen sich dabei *drei Arten von Basisstrukturen* eines Automatisierungssystems unterscheiden:

- Struktur des technischen Prozesses
- örtliche Struktur der Automatisierungseinrichtungen
- funktionelle Struktur des Automatisierungssystems

Alle drei Strukturarten können in ihrer Grundstruktur sowohl zentral wie auch dezentral auftreten.

Struktur des technischen Prozesses

Kann der technische Prozess als eine Einheit betrachtet werden, so liegt eine zentrale Prozessstruktur vor. Beispiele dafür sind der Waschvorgang in einer Waschmaschine oder das Fräsen eines Werkstücks.

Besteht der technische Prozess aus Teilprozessen, handelt es sich um eine dezentrale Prozessstruktur. Die meisten technischen Prozesse können aus automatizationstechnischer Sicht in Teilprozesse zerlegt werden. Dazu gehören z. B. die Fertigung eines Getriebes mit den Teilprozessen Fertigung der Zahnräder, Herstellung des Getriebegehäuses und Montage oder verfahrenstechnische Erzeugerprozesse mit den Teilprozessen Reaktionsvorgang, Stofftrennung und Reinigung.

Örtliche Struktur der Automatisierungseinrichtungen

Bei der örtlich zentralen Anordnung werden die Automatisierungseinrichtungen bzw. -geräte in einem vom technischen Prozess abgetrennten Raum (häufig als Leitwarte oder Leitstand bezeichnet) untergebracht. Beispiele sind die Steuerung eines chemischen Reaktors oder einer Farbspritzeanlage. Der Vorteil der zentralen Anordnung besteht darin, dass die Geräte den unter Umständen schädlichen Umgebungsbedingungen des technischen Prozesses nicht ausgesetzt werden müssen. Es ergibt sich als Nachteil allerdings ein erheblicher Verkabelungsaufwand.

Die Automatisierungseinrichtungen sind bei der örtlich dezentralen Struktur in nächster Nähe des ablaufenden technischen Prozesses (der technischen Anlage, Maschine) am unmittelbaren Ort ihres Einwirkens angeordnet. Dadurch entsteht eine Verteilung der Geräte auf der prozessnahen Ebene. Häufig ergeben sich als Vorteile bei dieser Anordnung geringere Verkabelungskosten und eine bessere Wartbarkeit. Erforderlich sind hier aber Verkabelungssysteme auf der Feldebene (Feldbussysteme), die einen Informationsaustausch zwischen den örtlich dezentralen Komponenten ermöglichen.

Funktionelle Struktur des Automatisierungssystems

Unter der funktionellen Struktur versteht man die Struktur des Automatisierungssystems bezüglich der Verteilung der Automatisierungsfunktionen auf die verschiedenen Automatisierungseinrichtungen.

Bild 1.4 zeigt eine funktionell zentrale Struktur mit einem universellen Prozessrechner als Kernsystem, der in serieller Informationsverarbeitung alle Automatisierungsfunktionen erledigt. Beispiele für funktionell zentrale Strukturen finden sich häufig bei der Automatisierung von Elektrolyseanlagen, Galvanikanlagen oder Industrieöfen.

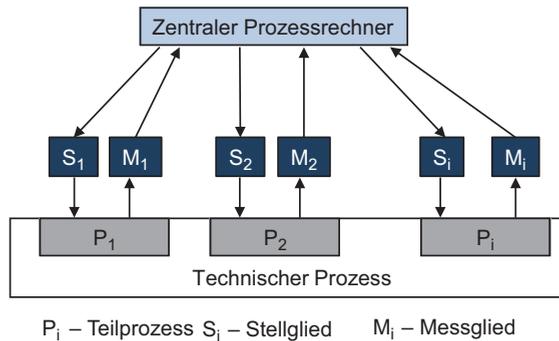


Bild 1.4 Funktionell zentrale Automatisierungsstruktur

Im Gegensatz dazu werden bei der in Bild 1.5 dargestellten funktionell dezentralen Struktur einzelne Prozessrechnersysteme eingesetzt, die parallel zueinander und – bei einer streng dezentralen Struktur – auch ohne Verkopplung untereinander die erforderlichen Funktionen realisieren. Ein Beispiel dafür ist die vollständig dezentrale Führung und Überwachung haustechnischer Prozesse in einem Hochhaus (Heizung, Lüftung, Klima, Beleuchtung usw.).

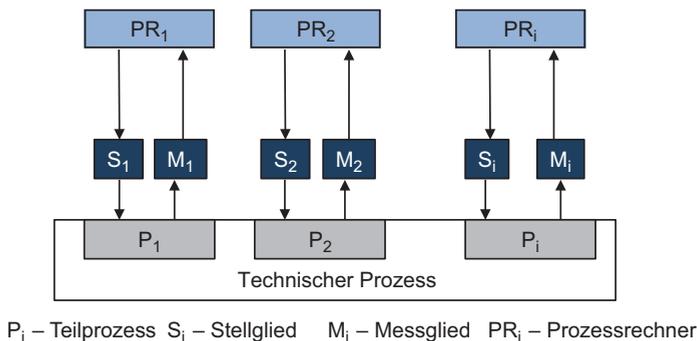


Bild 1.5 Funktionell dezentrale Automatisierungsstruktur

Die funktionelle Struktur bestimmt wesentlich den Aufwand, die Zuverlässigkeit, die Flexibilität und die Bedienbarkeit eines Automatisierungssystems.

In Beispiel 1.1 wird eine ZDD-Struktur dargestellt (markiert in Tabelle 1.3). Bei der ZDD-Struktur wird eine zentrale Struktur des technischen Prozesses mit einer dezentralen örtlichen und funktionellen Struktur des Automatisierungssystems kombiniert.



Beispiel 1.1: Drehen einer Welle

Das Drehen einer Welle ist ein zentraler technischer Prozess ohne Aufteilung in Teilprozesse. Die Realisierung erfolgt im Beispiel über drei örtlich verteilte bzw. dezentrale Automatisierungseinrichtungen (Werkzeugmaschine, Messrechner und Bedienkonsole). Die Automatisierungsfunktionen sind gleichfalls dezentralisiert und befinden sich in den drei Automatisierungseinrichtungen bzw. sind in diesen nochmals separiert (Werkzeugmaschine mit Antriebssteuerung und separater SPS). Damit ergibt sich das in Bild 1.6 dargestellte Strukturbild.

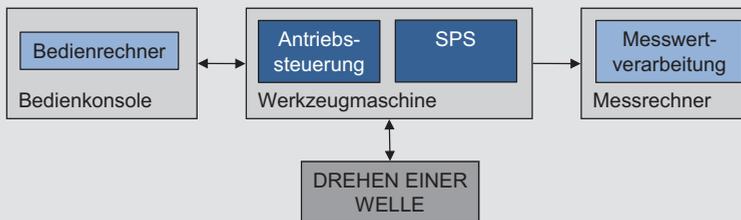


Bild 1.6 Automatisierungssystem zum Drehen einer Welle nach einer ZDD-Struktur

Unter Berücksichtigung der vorangehend genannten Struktureinteilung ergeben sich insgesamt acht verschiedene Kombinationen von Automatisierungsstrukturen, die die jeweilige spezifische Kommunikationsstruktur bestimmen (Tabelle 1.3).

Tabelle 1.3 Mögliche Kombinationen von Automatisierungsstrukturen
(Z – zentrale Struktur, D – dezentrale Struktur)

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|----------|---|---|---|---|
| Struktur des technischen Prozesses | Z | Z | Z | Z | D | D | D | D |
| Örtliche Struktur der Automatisierungseinrichtungen | Z | Z | D | D | Z | Z | D | D |
| Funktionelle Struktur des Automatisierungssystems | Z | D | Z | D | Z | D | Z | D |



Für die optimale Wahl einer Automatisierungsstruktur und damit auch für die Kommunikationsstruktur sollte nach folgendem Grundsatz verfahren werden:

So dezentral wie möglich, so zentral wie nötig.

Index

Symbole

3GPP 195
5G-Technologie 201, 202
 Beamforming 202
 Bitslicing 202
 Campusnetz 299
 Industrie 4.0 300
 Massive MIMO 202
 Mobilfunktechnik 299

A

Access Point 174
Anwendungslösung 229
Anwendungsschicht 30, 85, 146, 277
Apache 276
App 235
Architektur 16, 36, 99
 serviceorientierte 238, 260
 weborientierte 261
ASi 85
ATM 195
Auftragshierarchie 5
Augmented Reality 171, 227
Authentisierung 206
Auto-ID 189
Automatisierung
 Cloud-basierte 7, 241
Automatisierungsebenen 7, 8, 245
Automatisierungsmodell
 CPS-basiertes 246
Automatisierungspyramide 246, 289

Automatisierungsstruktur 5, 11
 feldorientierte 92
 hierarchische 5
Automatisierungssystem
 CPS-basiertes 219
Autonegotiation 113

B

Backbone-Netz 21, 178, 202
Bandbreite 161
Bandspreizverfahren 166
Basisbandverfahren 20
Basisstation 197
Baukastensystem 155, 292
Baumstruktur 16
Beacon 175
 -Netzwerk 185
Begleitstandard 73
Big Data
 -Analyse 244
 -Lösungen 244
Bitübertragung 19
Bitübertragungsschicht 29, 114, 303
Blockierung 124
Bluetooth 50, 181
Breitbandverfahren 21
Bring Your Own Device 171
Broadcast-Adresse 116
Broker 36, 283
Bundesnetzagentur 166
Bus 62, 120
Busschnittstelle 55

Bussystem 10
 Echtzeit- 292
 paralleles 65
 Buszykluszeit 22, 85

C

Cable-Sharing 304
 CAN 83
 CANopen 85
 CIP 146
 Client-Server-Modell 35, 101
 Cloud
 Hybrid 239
 Industrial 242
 Private 239
 Public 239
 SPS 297
 Cloud-Computing 7, 111, 237
 Companion Specification 102
 Computervirus 128
 Control as a Service 243
 CSMA/CA-Verfahren 83
 CSMA/CD-Verfahren 23, 116
 Cyber 219
 Cyber-Physical Production System (CPPS) 223
 Cyber-Physical System (CPS) 7, 41, 43, 45, 218

D

Daten
 -architekturmodell 240
 -fluss 9
 -modell 273
 -rate 196, 201
 -raum 270
 Datenübertragung 291
 parallele 56
 serielle 57
 verbindungslose 34
 verbindungsorientierte 33
 zeitdeterministische 298
 DDS 269

Deterministic Networking 293
 Dienst 30, 35, 45, 73, 237
 Automatisierungs- 262
 -begriff 259
 Cloud-basierter 242
 -güte 272
 -modell 238
 -paradigma 259
 -prinzip 7
 -schnittstelle 242
 Digitalisierung 217, 231, 249
 Digital Twin 252
 DIN-Messbus 70
 DNS 139
 Domain Participant 270
 DPWS 259
 Dreizustandsausgang 64

E

Echtzeit 8, 84, 103, 118, 237
 -anwendungen 273
 -bedingung 298
 -daten 269
 -datenübertragung 281
 -Ethernet 292
 -Ethernet-System 145
 -klassen 144
 -kommunikationssystem 272
 EDGE 200
 Edge-Computing 240
 Edge Device 240
 Eindrahtleitung 19
 Endgerät 174
 Energy Harvesting 186
 EnOcean 186
 Entität 253, 260
 EtherCAT 150
 Automation Protocol 151
 Device Protocol 151
 Ethernet 109, 176, 291
 -Adresse 116
 Fast 112
 -Frame 115
 Gigabit 113

- Kabel 118
- Single Pair 303
- Switched 123
- Thick 111
- Thin 112

EtherNet/IP 146

F

Fabrikbus 70

Fading 163

Feldbus 70, 71

Feldbussystem 40, 72, 74, 91

Fernbus 70

Firewall 128

Fog-Computing 240

Fog Node 240

Freiraumdämpfung 163

Frequency Hopping 182

Frequenzbereich 161, 165

- lizenzfreier 203

Funk

- dienst 194
- lizenz 166
- netz 170
- signal 305
- übertragung 160
- welle 160

Funktionalssystem 248

G

Gateway 16, 51, 188, 268

Gefährdung 205

Gerätebeschreibung 148

Geräteklasse 78, 200

Geräteschnittstelle

- externe 235
- interne 234

Geschäftsmodell 262

Global Data Space 270

GPRS 199

GSM 198

H

Hand-Over 177

Handshake 281

HART 187

Hierarchy Levels 252

HSPA 200

HTTP 142

- Methoden 143, 278
- Request 142
- Response 142

Hub 120

Hypermedia 278

I

I2C 69

Identität 198

IEC-Bus 69

Industrial Internet 218, 230

- of Things Connectivity Framework 265
- Reference Architecture 255

Industrie 4.0 218, 226

- Kommunikationsinfrastruktur 294
- Kommunikationsstandard 294
- Komponente 252
- Lösungen 229

Informationsmodell 103, 267

Informationsnetz 224

Infrastructure as a Service 237

Infrastrukturnetz 174

Instanz 30, 252

- Steuerungs- 243

INTERBUS 79

Interface Description Language 271

Internet 131

- der Dienste 45
- der Dinge 45
- Protokoll 100
- Protokoll-Suite 131, 265

Internet of Things

- Industrial 230
- LPWAN 202
- Ultra-Schmalband-Technologie 204

Interoperabilität 258, 273

Intrusion Detection 130

IO-Controller 149
 IO-Supervisor 149
 IP-Adresse
 Klasseneinteilung 133
 logische 132
 Version 4 133
 Version 6 134
 IP-Netzwerk 233
 IT-Ressource 237
 IT-Sicherheit 130
 IT-Sicherheitsgesetz 127

J

JAM-Signal 117

K

Klassenmodell 276
 Koaxialleitung 18, 109
 Kollision 117
 Kommunikation
 drahtlose mobile 171
 drahtlose stationäre 170
 Industrie 4.0- 268, 280
 M2M- 232, 283
 mobile 163
 objektorientierte 38
 offene 26
 statuslose 279
 Kommunikationsdienst 31
 Kommunikationsmedium 8
 Kommunikationsmethode 99
 Kommunikationsmodell 265
 Kommunikationsobjekt 38, 91
 Kommunikationssatellit 164
 Kommunikationsstruktur 13
 Kommunikationssystem 287
 funkbasiertes 298
 IT-basiertes 289
 klassisches 289
 Kommunikationszyklus 90
 Kreuzschienenverteiler 122

L

LAN 39, 125, 170, 297
 Latenzzeit 164, 268, 283, 297
 Lebenszyklus 252, 257
 Leistungsklassen 147
 Leitwarte 11
 Lichtwellenleiter 18
 Linienstruktur 16
 Link 278
 LON 90
 LoRaWAN 203
 LPWAN 202
 LTE 200
 Luftschnittstelle 207

M

MAC-Adresse 116
 Master-Slave-Verfahren 22, 77, 79, 86,
 89, 151
 Medium
 Shared 120
 Switched 120
 Mehrwegeausbreitung 162
 Mesh Network 188
 Wireless 178
 Middleware 270
 objektorientierte 271
 MIME-Typ 141
 MIMO 169
 MMS 73
 Mobilfunk 194
 -generationen 195
 -netz 194, 197
 -Netzbetreiber 197
 öffentlicher 194
 -profile 198
 -technik 171
 Mobilteil 197
 Modulation 20
 Multimaster-System 23
 Multiplextechnik
 Codemultiplex 168
 Frequenzmultiplex 168

- Raummultiplex 168
- Zeitmultiplex 168
- Multi-Point-Netzwerk 178
- Multipoint-Repeater 120
- Multithreading 141

N

- Nachricht 33, 277, 284
- Nachrichtenobjekt 83
- Nahverkehrsnetz 193
- Namensraum 271
- NAT-Funktion 123
- Network as a Service 298
- Network Slicing 300
- Netz
 - 5G- 299
 - Ad-hoc- 174
 - auslastung 25, 118
 - breitbandiges 299
 - drahtloses 175
 - Ethernet-basierendes 71
 - globales 221
 - IP- 133, 269
 - kommunikation 265
 - lokales 10, 14
 - management 125
 - Monitoring 125
 - nichtdeterministisches 117
 - sicherheit 126
 - topologie 203
- NEURON-Chip 91
- NFC 190
 - Card Emulation Mode 190
 - Peer-to-Peer Mode 190
 - Reader/Writer Mode 190
- Non-Beacon-Netzwerk 185
- Northbound 235

O

- Objekt 37
- Offener Kollektor 63, 322
- Office-/Back-Office-Software 92
- OPC 94, 95
 - DA-Client 97

- DA-Server 97
- Klassenmodell 96
- OPC DA 95
- OPC UA 99, 266
- Pub-Sub-Erweiterung 294
- RAMI 4.0 267
- UA-Implementierung 100
- UA-Server 102
- UA-Transportprotokoll 100
- Open Source 152, 203, 283
- Open Source-Projekt 275
- OSI-Referenzmodell 27, 75, 91, 110, 114, 131, 155, 175, 186, 265, 293

P

- Pakettransport 124
- Parameterdaten 81
- Parkmodus 182
- Pay per Use 239
- Peripheriebus 66
- Piconet 182
- Planungsmaßnahmen 207
- Plattform as a Service 237
- Plattform 234
 - Cloud- 263
 - I4.0 226
 - IoT-/IIoT- 234, 248
- PLC as a Service 243
- PoE 118
- Port 122
 - adressierung 135
 - Well-known 135
- Powered Device 119
- Power over Data Line 304
- Producer-Consumer-Methode 36, 84, 148
- PROFIBUS 75
 - Geräte 78
 - Protokollvarianten 77
- Profil 78, 85, 151, 183, 186
- PROFINET 147
- Programmierschnittstelle 94
- Protokoll 26
 - adapter 275
 - Anwendungs- 137

- CoAP 286
 - FTP 32, 137
 - HTTP 32, 139, 277
 - MQTT 283
 - Netzwerk- 138
 - OPC UA over TSN 294
 - PLC4X 275
 - RESTful HTTP 278
 - SMTP 32
 - SNMP 137
 - TCP/IP 32, 131
 - TELNET 32
 - UDP 32, 286
 - WebSocket 280
 - WEP 205
 - Woopsa 276
 - Protokollspezifikation 38
 - Prozess
 - Geschäfts- 233
 - Produktions- 229, 233
 - technischer 11, 259, 293
 - zeit 298
 - Prozessabbild 81
 - Prozessbus 69, 70
 - Prozessdaten 81, 99, 245, 268
 - Echtzeit- 244
 - Prozessoptimierung 264
 - Publisher 270, 283
 - Publisher-Subscriber-Modell 36, 101, 270, 283
 - Punkt-zu-Punkt-Verbindung 9, 55
- Q**
- QoS-Parameter 285
 - Querschnittsfunktion 255
 - Querverkehr 9
- R**
- RAMI 4.0 252
 - Reaktionszeit 77, 243, 298
 - garantierte 292
 - Referenzarchitektur 43, 251, 257
 - modell Industrie 4.0 251
 - Referenzmodell
 - OASIS SOA 260
 - Reichweite 194, 195, 203
 - Remote Service 264
 - Repräsentation 278
 - Request-Response-Modell 277, 287
 - Ressource 278
 - Ressourcenmanager 253
 - REST 278
 - RFC 138
 - RFID 189
 - Lesegerät 189
 - Transponder 189
 - Roaming 177
 - Router 122
- S**
- Satellitenkommunikation 163
 - Scatternet 182
 - Schlitzkabel 305
 - Schlüsselbelange 255
 - Schneidklemmtechnik 87
 - Schnittstelle 60
 - bidirektionale 60
 - Centronics 56
 - CPS/CPS- 247
 - CPS/Dienst- 247
 - Dienst/Dienst- 247
 - nach IEEE 1284 56
 - parallele 56
 - RS-232 59
 - RS-422 59
 - RS-485 59
 - serielle 57
 - transparente 263
 - Schutzmaßnahmen 207
 - Selbstorganisation 233
 - Self-Service 237
 - Sensor-Aktor-Bus 71
 - Sensorknoten 192
 - Sensornetz 191, 300
 - SERCOS 89
 - Echtzeitkanal 152
 - Nicht-Echtzeitkanal 152
 - SERCOS III 152

Service Monitoring 264
Shield 51, 193
Sicherheit 204
Sicherheitsniveau 209
Sicherungsschicht 29, 114
Signalausbreitung 162
Signallaufzeit 297
SIM-Karte 197
Simulation 287
Single Board Computer 46, 51
Sitzungsschicht 30
Smart
 Factory 223, 226
 Grid 228
 Logistics 228
 Product 227
 Services 263
Smart Product 191
SOA 242
Social Machine 226
Socket Interface 135
Software as a Service 237
Softwareumgebung 49
Southbound 235
Sparkplug 286
Spezifikation 40, 50, 86, 183, 184
SPI 69
SSL-Methode 129
Steckgesicht 304
Steuerung
 Echtzeit- 198
 offene 93
 virtuelle 243
Störfaktoren 42
Strahlende Kabel 305
Stromschleife 58
Struktur
 ringförmige 15
 sternförmige 15
Struktureinteilung 13
Subscriber 270, 283
Summenrahmen 34, 81, 151
Switch 121
 Cut-Through 124
 Managed 124

Store-and-Forward- 124
 Unmanaged 124
System
 Cyber-Biological 218
 cyber-physikalisches 218
 cyber-phisches 218
 drahtloses 159
 drahtloses eingebettetes 191
 eingebettetes 41, 42, 68
 End-to-End- 230
 Industrial Internet 230
 mobiles 159
 offenes 27
 reaktives 42
 skalierbares 283
 smarteres 219
 vernetztes 45, 231
 verteiltes 36
Systembus 65
System of Systems 44, 220

T

Tag 190
TDMA-Verfahren 22, 81
Teilnehmer 27
Telegramm 33, 89
Time-Sensitive Networking 291
Token-Passing-Verfahren 24
Topic 271, 284
Topologie 15, 88, 179
Trägerbandverfahren 20
Transportschicht 29
TSN 154
 5G-Vernetzung 301
 DDS mit TSN 295
Tunneling 130
Twisted-Pair-Kabel 61, 112

U

Übertragungsmedium 87, 110, 148
Übertragungsrate 161
Übertragungsverfahren 166
 E/A-orientiertes 34, 81