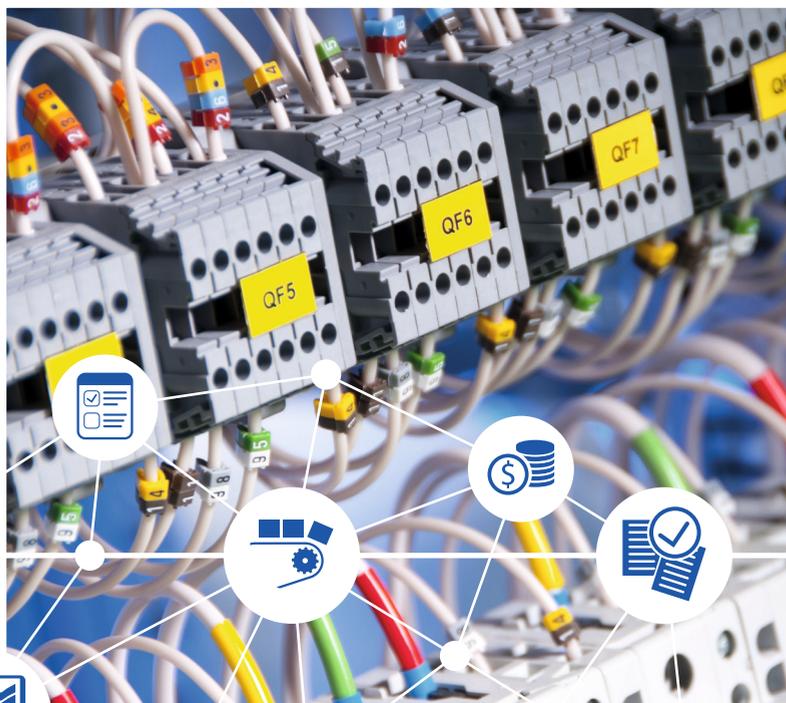


Reinhard Langmann

Vernetzte Systeme für die Automatisierung 4.0

Bussysteme – Industrial Ethernet –
Mobile Kommunikation – Cyber-Physical Systems



HANSER

Langmann
**Vernetzte Systeme
für die Automatisierung 4.0**



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Reinhard Langmann

Vernetzte Systeme für die Automatisierung 4.0

Bussysteme – Industrial Ethernet –
Mobile Kommunikation – Cyber-Physical Systems

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Langmann, Hochschule Düsseldorf

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht, auch nicht für die Verletzung von Patentrechten, die daraus resultieren können.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Bibliografische Information der deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2021 Carl Hanser Verlag München

www.hanserfachbuch.de

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Der Buchmacher, Arthur Lenner, Windach

Titelmotiv: © shutterstock.com/Kalabi Yau und a-image

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Eberl & Koesel Studio GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

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

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

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.

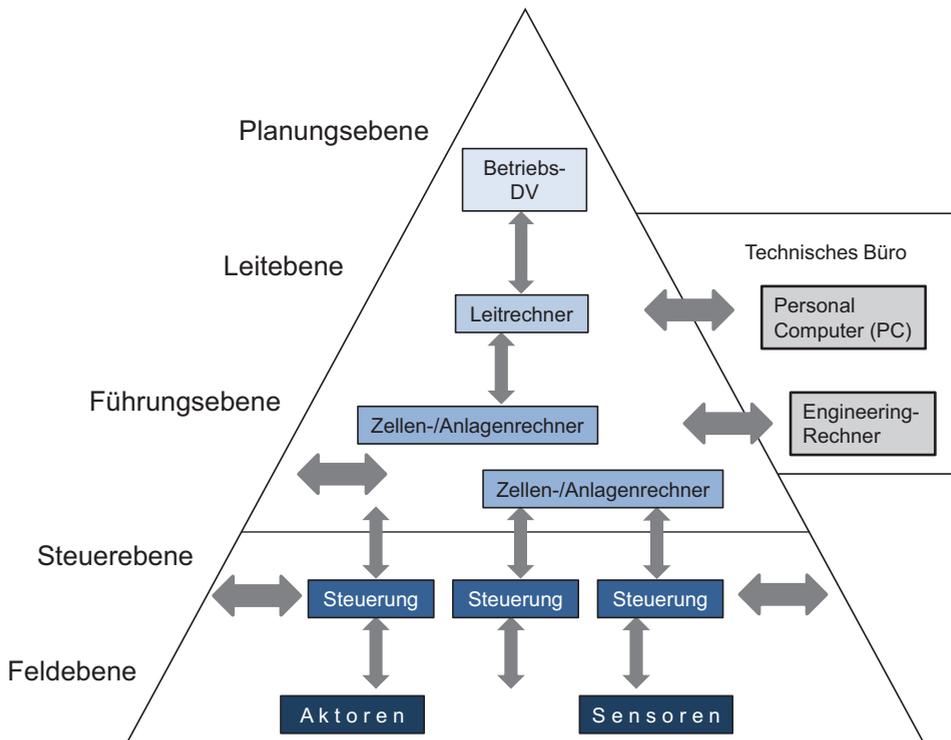


Bild 1.1 Hierarchische Automatisierungsstruktur mit horizontaler und vertikaler Kommunikation

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.

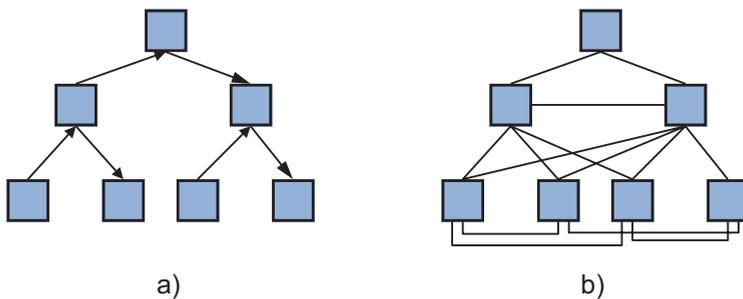
Tabelle 1.2 Übertragungszeiten bei unterschiedlichen Datenraten

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.

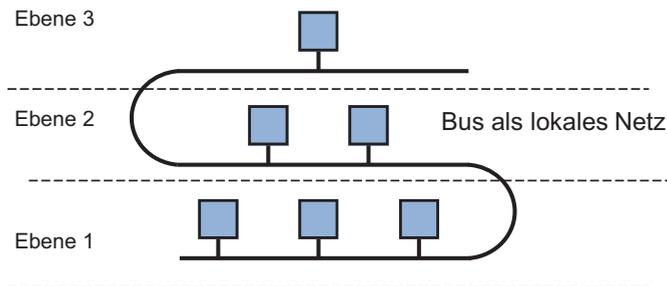


Bild 1.3 Einsatz eines lokalen Netzes in einer Automatisierungshierarchie

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 Farbspritzanlage. 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.

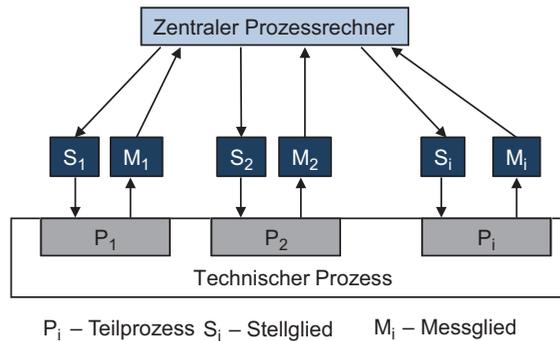
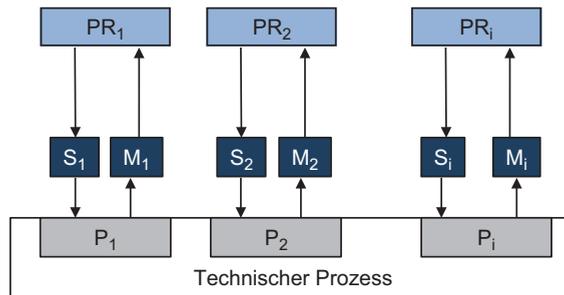


Bild 1.4 Funktionell zentrale Automatisierungsstruktur

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.).



P_i – Teilprozess S_i – Stellglied M_i – Messglied PR_i – Prozessrechner

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.

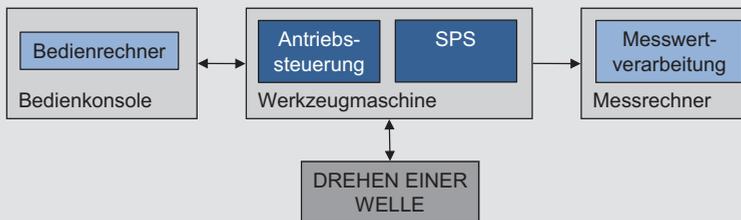


Bild 1.6 Automatisierungssystem zum Drehen einer Welle nach einer ZDD-Struktur

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.

■ 1.2 Lokale Netze



<https://bit.ly/3isM1kr>

Lokale Netze (LAN) werden nach IEEE 802 [6] durch folgende Merkmale definiert:

- Ein LAN ist ein Datenkommunikationssystem, das mehreren unabhängigen Geräten die Möglichkeit bietet, miteinander zu kommunizieren.
- Im Gegensatz zu anderen Datennetzwerken ist die Kommunikation auf ein in der Ausdehnung begrenztes geografisches Gebiet beschränkt.
- Es wird ein Kommunikationsmedium mit mittlerer bis hoher Datenübertragungsrate sowie einer niedrigen Fehlerrate benutzt.
- Ein LAN ermöglicht pro Verbindung eine bitserielle Übertragung (in Abgrenzung zu Rechnerbussen).
- Ein LAN wird durch eine einzelne Organisation kontrolliert. Die Netze werden deshalb auch als private Netze bezeichnet.

Betrachtet man die Kommunikationsstrukturen bezogen auf ihre räumlichen Ausdehnungen und ihre Datenübertragungsgeschwindigkeiten, so gelangt man zu der in Bild 1.7 dargestellten Einordnung der lokalen Netze.

Die lokalen Netze sind etwa im mittleren Bereich von Bild 1.7, neben den systemnahen Kommunikationsstrukturen (z. B. parallele und serielle Rechnerbusse), angesiedelt. Rechts neben den lokalen Netzen befinden sich die *Weitverkehrsnetze (WAN - Wide Area Network)*, die auch als öffentliche Netze bezeichnet werden (siehe Abschnitt 4.3). Dazu gehören z. B. analoge und digitale Telefon- oder Fernsehübertragungsnetze, Internet sowie die Datenfernübertragung mit ISDN und ihren Diensten.

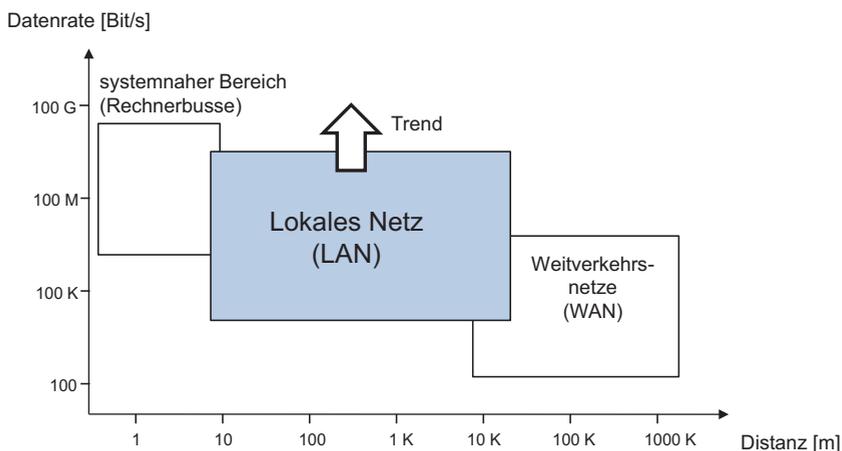


Bild 1.7 Einordnung der lokalen Netze

Durch die rasante Entwicklung von Ethernet in den letzten Jahren und dessen verstärkten Einsatz für lokale Netze, auch für die Automatisierung ist zu erwarten, dass die Datenrate für lokale Netze weiter beträchtlich ansteigen wird.

Die verschiedenen lokalen Netze unterscheiden sich nach der Form des Netzes (Topologie), dem eingesetzten Übertragungsmedium und dem Übertragungs- und Zugriffsverfahren.

1.2.1 Netztopologien

Lokale Netze können außer nach der in Bild 1.3 bereits dargestellten Linienstruktur nach einer Stern-, Ring- oder Baumstruktur aufgebaut sein (Bild 1.8).

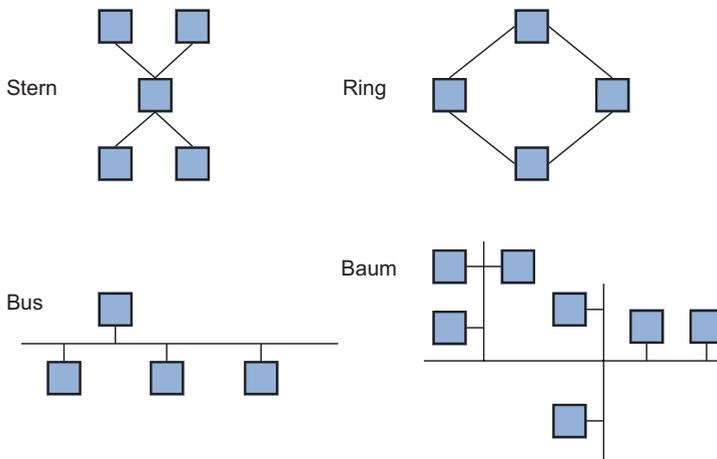


Bild 1.8 Aufbau lokaler Netze (Netztopologien)

Bei der *sternförmigen Struktur* wird jeder Datenaustausch über die Zentrale abgewickelt. Die Funktion des gesamten Netzes ist von der Zentrale abhängig. Das Netz ist nicht flexibel, da die Zentrale für jeden Teilnehmer eine Schnittstelle benötigt. Die Zentrale entwickelt sich darüber hinaus schnell zu einem „Flaschenhals“ für die Informationsübertragung. Sternstrukturen werden bevorzugt für den Aufbau lokaler Netze mit Lichtwellenleiter eingesetzt (z.B. PROFIBUS mit Lichtwellenleiter).

Bei der *ringförmigen Struktur* wird mittels mehrerer Zweipunktverbindungen ein physikalischer Ring aufgebaut. Die Steuerung und Überwachung des Netzes sind meist auf alle Teilnehmer verteilt. Die Netzknoten (Kommunikationspartner, Teilnehmer) sind ständig aktiv und regenerieren die durchlaufenden Informationen. Durch diese Signalverstärkung können Ringnetze über größere Entfernungen geführt werden. Problematisch ist die Ringtopologie bei Ausfall eines Teilnehmers



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

bzw. bei Leitungsbruch oder Kurzschluss. Ohne geeignete Gegenmaßnahmen würde dies bedeuten, dass das gesamte lokale Netz ausfällt. Als Gegenmaßnahme kann der Ring redundant ausgelegt werden. Als typische Ringtopologie ist z. B. auf der Feldebene der INTERBUS ausgelegt.

Bei der *Linienstruktur* (auch als Busstruktur bezeichnet) kommunizieren alle Teilnehmer über eine gemeinsame Leitung. Die Linie ist die kostengünstigste Art der Verkabelung. Gegenüber dem Ring ist nur etwa die Hälfte der Kabellänge zu installieren. Die Anbindung der Teilnehmer an das Linien(Bus)kabel erfolgt über kurze Stichleitungen. Jeder Teilnehmer benötigt hier nur noch eine Schnittstelle, um mit einem beliebigen anderen kommunizieren zu können. Ein Problem bei der Linie stellt die Verfälschung der zu übertragenden Signale bei größeren Entfernungen durch hohe Widerstands- und Kapazitätswerte der Leitung dar. In der Praxis hat dies zur Folge, dass bei Linienstrukturen die maximale Übertragungsrate stark von der Leitungslänge abhängt. Die meisten der in Automatisierungssystemen eingesetzten lokalen Netze besitzen eine Linien- bzw. Busstruktur.

Die *Baumstruktur* stellt eine Erweiterung der Linie dar. Mehrere Äste sind durch einen Stamm verbunden. Erweiterungen sind durch Anbinden weiterer Äste möglich. So entstehen lokale Netze, die auch größere Flächen abdecken. Nur wenige lokale Netze stellen die Fähigkeit zum Aufbau von Baumstrukturen in Automatisierungssystemen zur Verfügung. Dazu gehört z. B. das Feldebussystem LON.

1.2.2 Übertragungsmedien

Zu den Übertragungsmedien gehören die *Kabel und Leitungen*, aus denen die lokalen Netze aufgebaut sind. Im Wesentlichen haben sich drei Übertragungsmedien durchgesetzt:

- verdrehte Zweidrahtleitung (Twisted Pair)
- Koaxialleitung
- Lichtwellenleiter

Neben der eigentlichen Leitung muss man auch die Schnittstellen zu den Automatisierungskomponenten, die Anschaltungen sowie andere Netzelemente berücksichtigen. Besonders wichtig sind hierbei Repeater und Gateways. *Repeater* dienen als Verstärkerstationen innerhalb von Netzen, und *Gateways* schaffen Verbindungen zwischen lokalen Netzen mit unterschiedlicher Architektur.



1.2.2.1 Zweidrahtleitung

Für lokale Netze in der Automatisierungstechnik verwendet man meist die in Bild 1.9 dargestellte verdrehte, abgeschirmte Zweidrahtleitung, für kurze Entfernungen auch ungeschirmte, verdrehte Leitungen.