
Mohieddine Jelali

Prozessautomatisierungstechnik

3. Kommunikationsnetzwerke

Inhaltsangaben zu Kapitel 3

Kommunikationsnetzwerke

- 3.1 Netztopologien
- 3.3 Übertragungsmedien
- 3.3 Feldbussysteme
- 3.4 Buszugriffsverfahren
- 3.5 Wichtige Feldbussysteme

3.1 Netztopologien

■ Begriffe

- Netzwerk: Kommunikationsfähiger Verbund von Rechnern, Prozessoren oder Automatisierungsgeräten (Sensoren, Aktoren, Steuerungen) in verteilten Automatisierungssystemen
- Netztopologie: Art und Logik der Verbindungen

■ Anforderungen

- möglichst geringe Vernetzungskosten
- hohe Flexibilität bei Änderungen
- möglichst offene, standardisierte Schnittstellen
- hohe Übertragungssicherheit
- kurze Reaktionszeiten auf Kommunikationsanfragen

■ Problem

Zum Teil widersprechende Anforderungen \Rightarrow Festlegung von Prioritäten

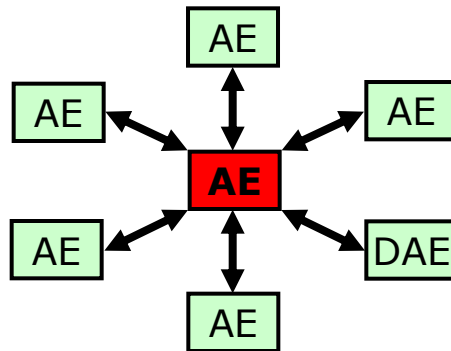
Beispiel: Hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit durch redundantes Bus-System bedeutet hohe Verkabelungskosten.

3.1 Netztopologien

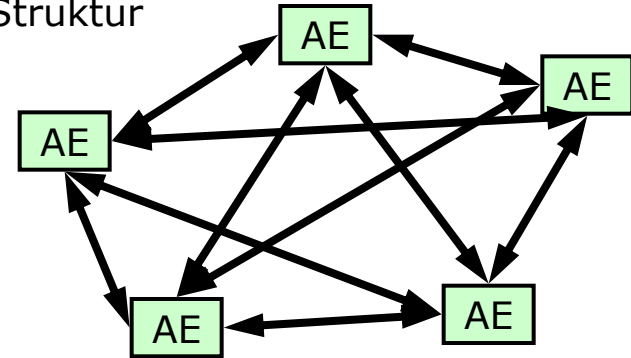
■ Grundstrukturen der Kommunikation

AE: Automatisierungseinheit

Stern-
Struktur



Netz-
Struktur



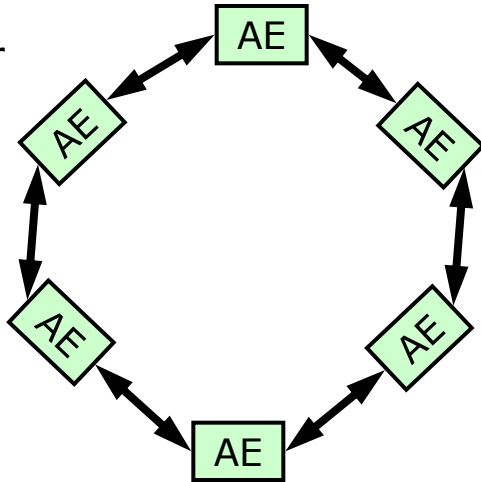
■ Eigenschaften der Netzstrukturen

- **Stern**-Struktur: Jeder Teilnehmer ist über eine eigene Übertragungsleitung mit dem zentralen Gerät verbunden; Ausfall der Zentraleinheit führt zum Ausfall der Kommunikation.
- **Netz**-Struktur: Parallele Informationsübertragung; kurze Reaktionszeit; viele Schnittstellen; sehr hohe Verkabelungskosten

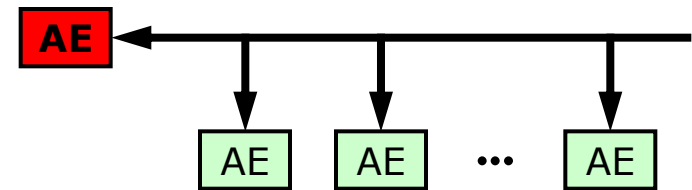
3.1 Netztopologien

■ Grundstrukturen der Kommunikation

Ring-
Struktur



Bus-
Struktur (Datensammelleitung)

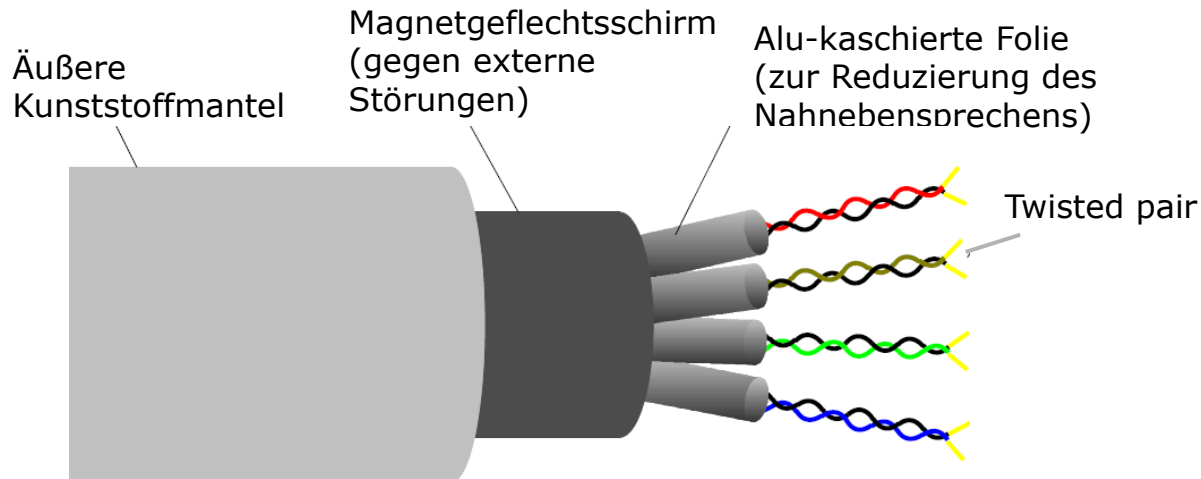


■ Eigenschaften der Netzstrukturen

- **Ring**-Struktur: Jede Einheit kann nur an direkte Nachbarn übertragen; Ausfall einer Station führt zum Ausfall des Netzes (sofern keine Redundanzen vorgesehen sind, z.B. Doppelring)
- **Bus**-Struktur: Anbindung meist über Stichleitungen (verringert Verkabelungsaufwand); Nur jeweils ein Teilnehmer kann senden; gleichzeitige Informationsaufnahme von allen Teilnehmern; Koordination des „Senderechtes“ über Buszugriffverfahren erforderlich.

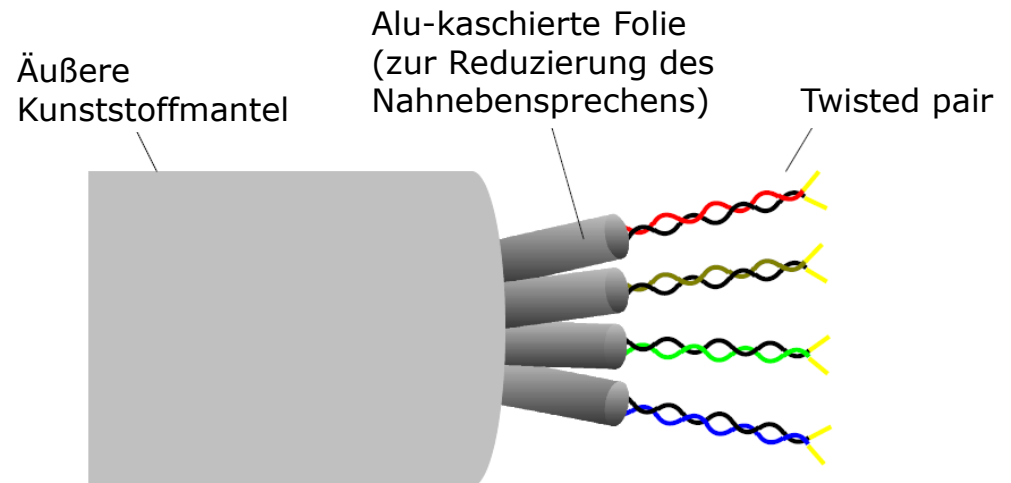
3.2 Übertragungsmedien

■ Zweidrahtleitung (Twisted Pair)



STP: Shielded Twisted Pair

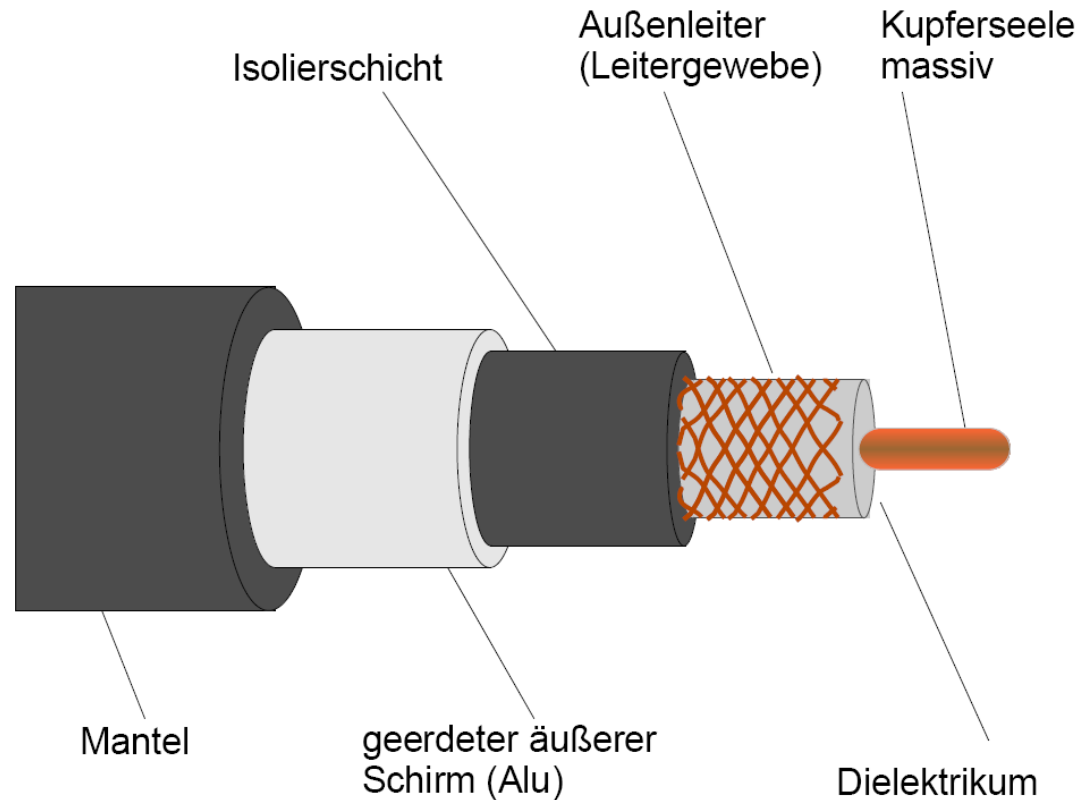
- Übertragungsrate:
bis zu 100 MBit/s



UTP: Unshielded Twisted Pair

3.2 Übertragungsmedien

■ Koaxialkabel (doppelt geschirmt)

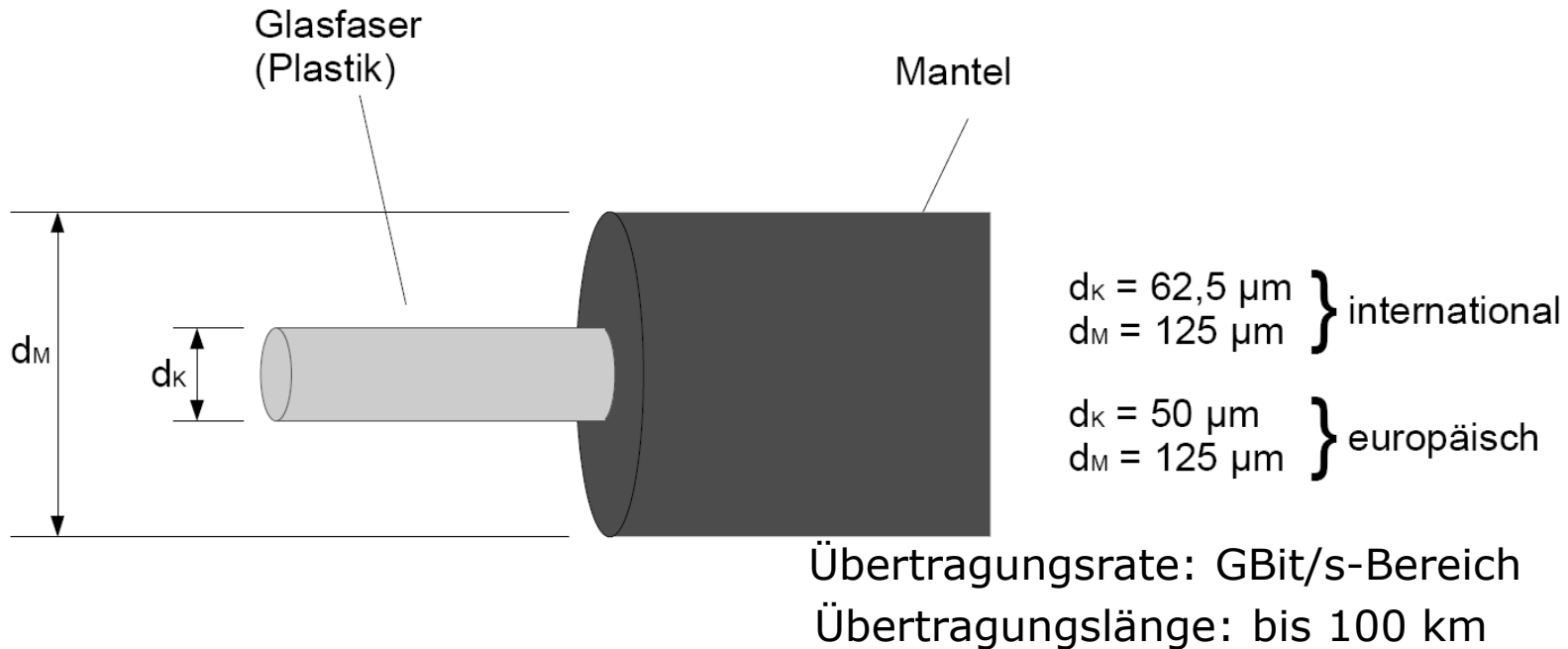


- Eigenschaften:

Aufwendiger Aufbau, wenig empfindlich gegen Störeinflüsse,

3.2 Übertragungsmedien

■ Lichtwellenleiter (LWL; Glas, Kunststoff)



- Eigenschaften:

keine Erdungsprobleme, Potentialtrennung zwischen Sender und Empfänger,
keine elektromagnetischen Störeinflüsse,
sehr niedrige, frequenzunabhängige Grunddämpfung
⇒ hohe Übertragungsrate,
geringes Gewicht, leichte Verlegbarkeit

3.3 Feldbussysteme

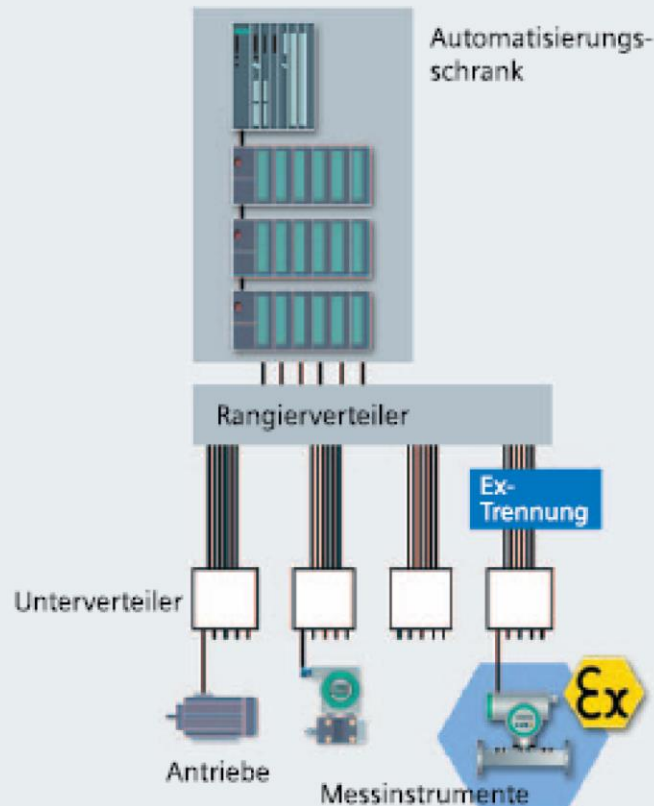
■ Begriffe

- Feldbereich: Teil des Automatisierungssystems, der in räumlicher Nähe oder direkter Verbindung zum technischen Prozess steht.
- Feldgeräte: Mess-, Schalt- und Stellgeräte, Regeleinrichtungen und Bediengeräte, die direkt mit dem technischen Prozess interagieren.
- Feldbussysteme: Serielle Datenkommunikationssysteme für Datenaustausch im Feldbereich; hier besonders zu erfüllende Anforderungen an die Sicherheit der Datenübertragung: Datenintegrität, EMV-Resistenz

3.3 Feldbussysteme

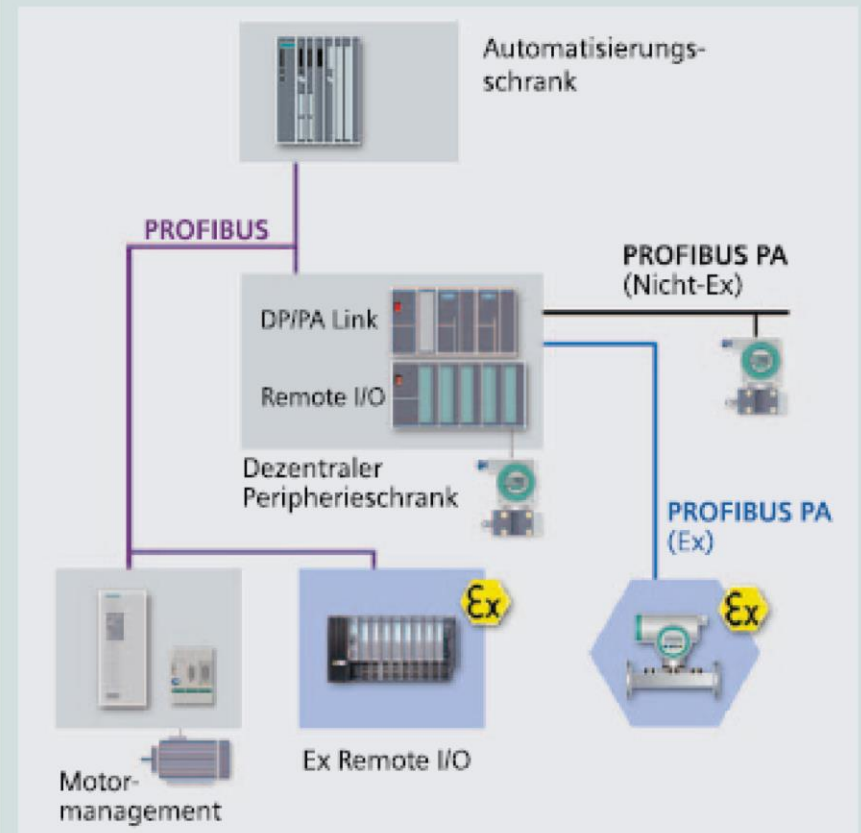
Motivation

konventionell



- Punkt-zu-Punkt-Verbindungen bedingen einen hohen Aufwand an Verkabelung und Signalaufbereitung

PROFIBUS



- linienförmiger Aufbau
- bis zu 70% Platzersparnis bei der Ein-/Ausgabe-Hardware
- bis zu 50% Kostenersparnis bei Hardware, Planung, Dokumentation, Installation und Service

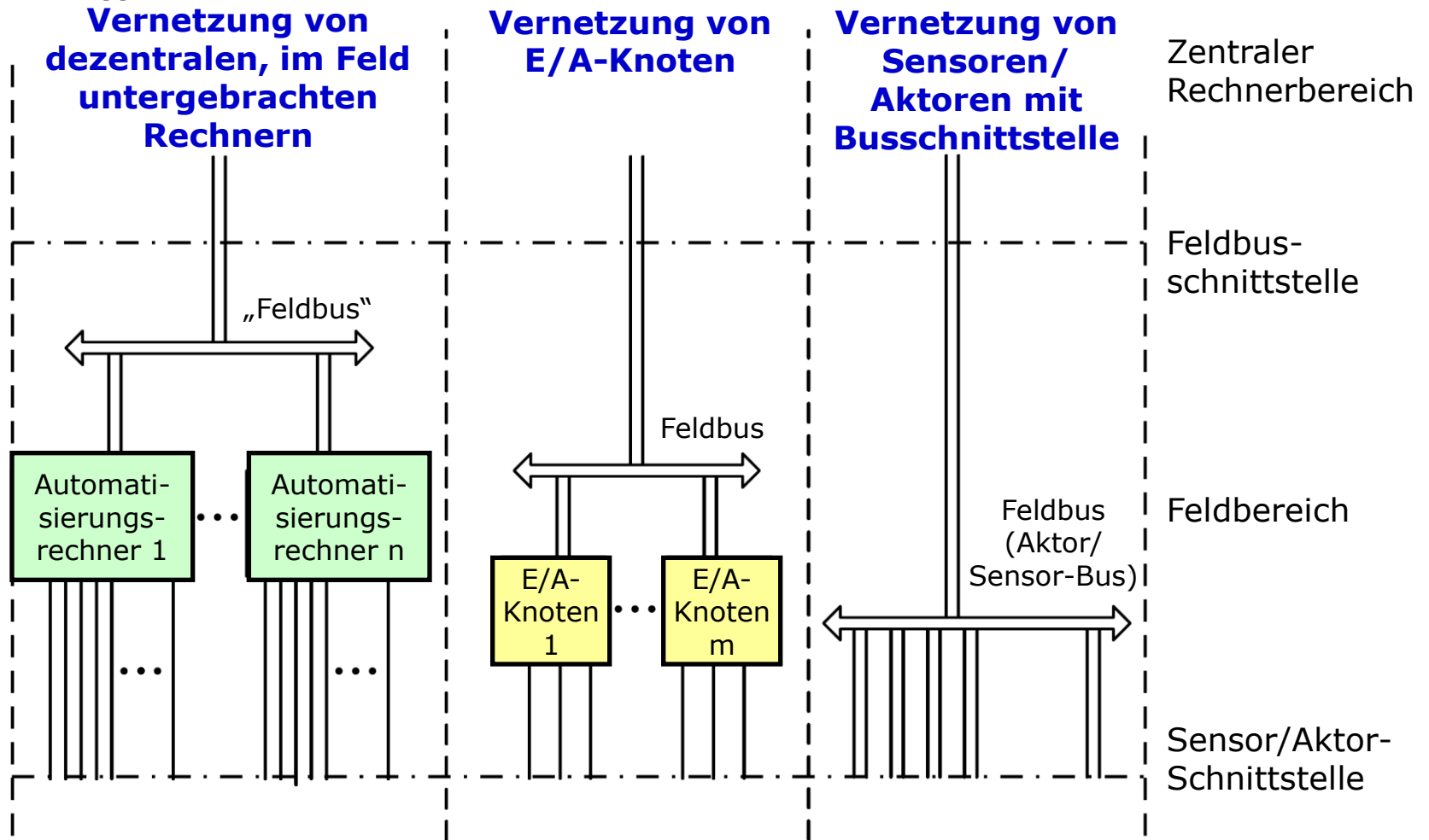
3.3 Feldbussysteme

■ ISO/OSI-Kommunikationsmodell (Open System Interconecion)

Anwenderorientierte Schichten	Schicht 7: Anwendungsschicht (Application layer)		Anwenderschnittstelle Informationsverarbeitung
	Schicht 6: Darstellungsschicht (Presentation layer)	Darstellung	Formatierung von Daten, Festlegung von Zeichensätzen
	usw.		
	Schicht 5: Sitzungsschicht (Session layer)	%% %%	Auf- und Abbau von Sitzungen Koordination der Kanalnutzung
Transportorientierte Schichten	Schicht 4: Transportschicht (Transport layer)		Umsetzung von Namen, Netzwerksadressen, Teilnehmerverbindungen
	Schicht 3: Netzwerkschicht (Network layer)		Festlegung der Datenwege, Endsystemverbindungen
	Schicht 2: Datenverbindungs- schicht (Data link layer)	10111111010010110 Start Adresse	Festlegung der Zugriffsarten Versenden und Empfangen, von Datenpaketen
	Schicht 1: Physikalische Schicht (Physical layer)		Definition und Erzeugung der elektrischen Signale

3.3 Feldbussysteme

Klassifikation von Feldbuskonzepten



3.3 Feldbussysteme

■ Anforderungen und Kennwerte

- Übertragungsrate: einige kBit/s bis 12 MBit/s, abhängig von der Anzahl der Busteilnehmer
- Maximale Anzahl von Teilnehmern pro Bussegment: 32–127, u.a. abhängig von der Übertragungsrate
- Maximale räumliche Ausdehnung der Busstruktur: 50–2000m
- Determiniertheit der Zykluszeit: für manche Anwendungen, z.B. in der Antriebstechnik, muss die Einhaltung bestimmter maximaler Zykluszeiten garantiert werden.
- Anzahl der übertragbaren Nachrichtenpakete pro Sekunde: nicht unbedingt proportional zur Übertragungsrate (variable Nachrichtenlänge)
- Möglichkeit zur Verwendung von variablen Nachrichtenlängen je nach Art der Daten: zeitkritische Prozessdaten, zeitunkritische Statusdaten
- Unempfindlichkeit des Bussystems gegenüber Störungen und Umwelteinflüssen (EMV-Verträglichkeit, Temperatur, Feuchtigkeit usw.)
- Kosten pro Teilnehmeranschluss

3.3 Feldbussysteme

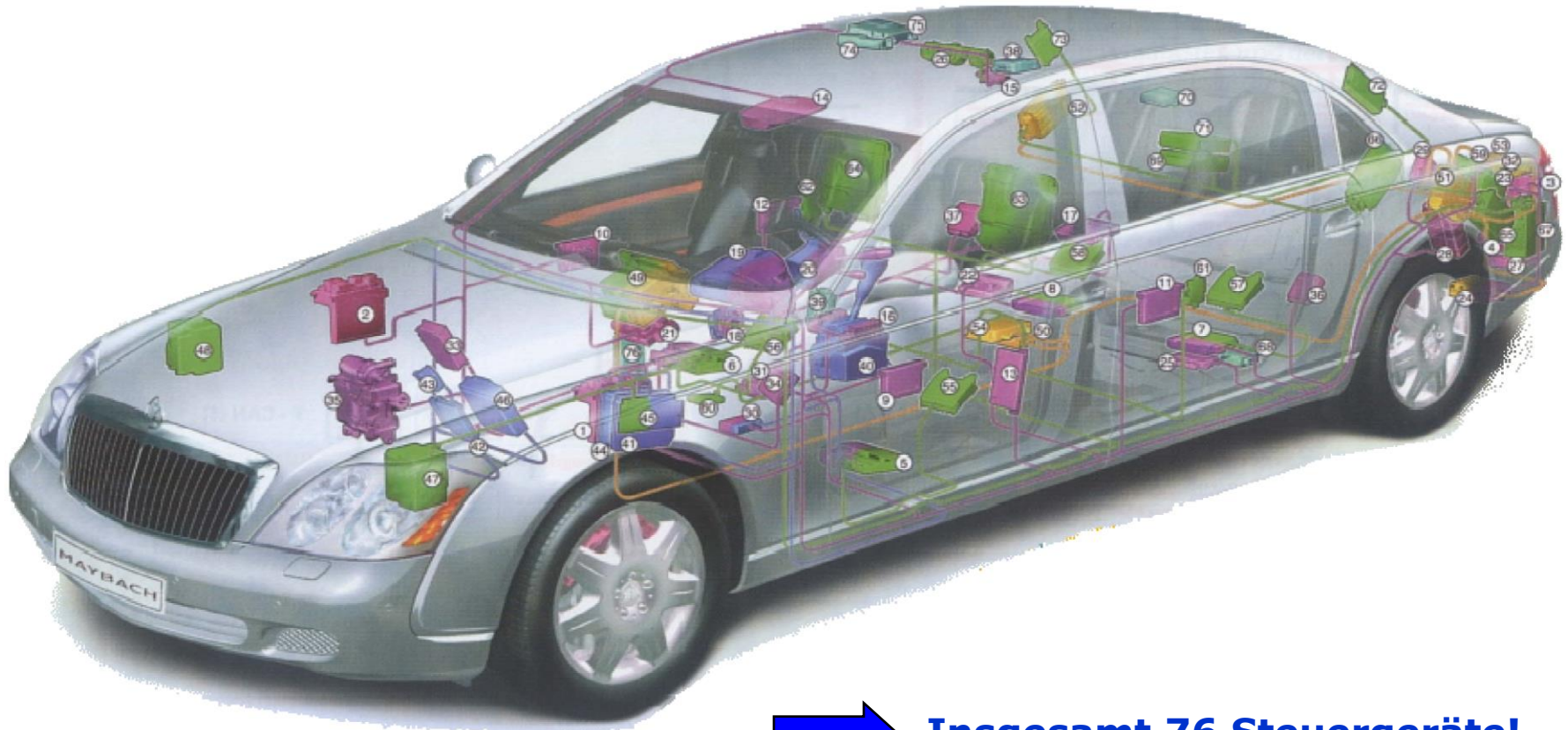
■ Beispiele und Einsatzgebiete

Beispiel	Hersteller und Haupteinsatzgebiet
Bit-Bus	Intel; Fabrikautomation
AS-Interface	11 Aktor-/Sensorhersteller; einfache Schnittstelle binärer Feldgeräte
INTERBUS-S	Phoenix Contact; Fertigungsautomatisierung
PROFIBUS (Process Field Bus)	„Verbundprojekt Feldbus“; Europäischer Feldbusstandard
Foundation Fieldbus	Fieldbus Foundation; amerikanischer Feldbusstandard
EIB (European Installation Bus)	Hersteller Elektroinstallationstechnik; Gebäudeautomatisierung
CAN (Controller Area Network)	BOSCH/Intel, Kfz
FlexRay	Konsortium (Daimler, BMW, Motorola, Philips); Kfz
Industrial Ethernet	Ethernet-Erweiterungen für den Einsatz in der Automatisierungstechnik

3.3 Feldbussysteme

■ Beispiel eines vernetzten Fahrzeugs

Kommunikationsnetzwerk im Maybach



Insgesamt 76 Steuergeräte!

3.4 Buszugriffsverfahren

■ Buszugriff

Regeln für das Senden von Nachrichten

■ Klassifizierung

- Deterministischer Buszugriff
 - festgelegtes Verfahren für Sendeberechtigung
 - Antwortzeitverhalten

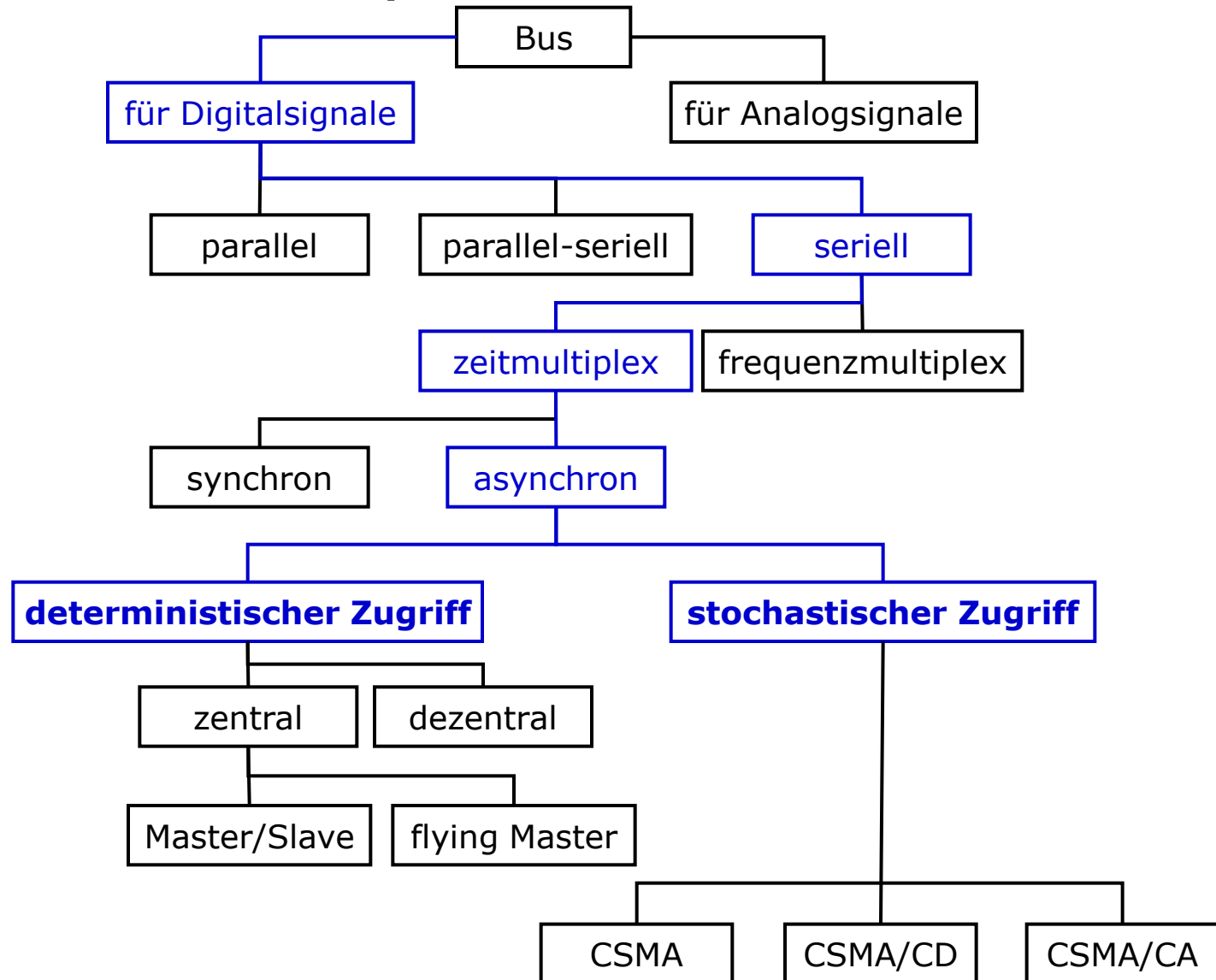
Beispiele: Master/Slave-Verfahren, Token-Passing-Verfahren, TDMA-Verfahren

- Zufälliger Buszugriff
 - permanentes Mithören
 - ereignisgesteuerte Kommunikation
 - niedrige mittlere Busbelastung
 - nicht vorhersagbares Antwortzeitverhalten

Beispiele: CSMA-Verfahren (CSMA/CD, CSMA/CA)

3.4 Buszugriffsverfahren

■ Klassifikation von Feldbussystemen



3.4 Buszugriffsverfahren

■ Master/Slave-Verfahren

- Prinzip:

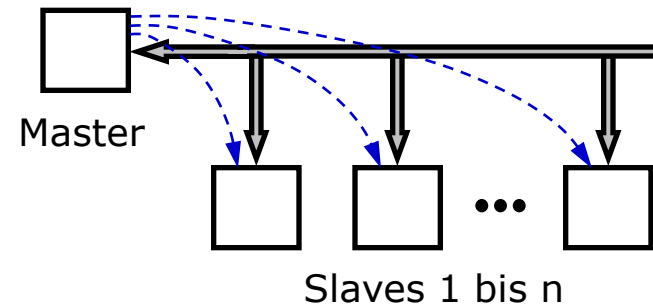
- übergeordneter Busteilnehmer (Master) steuert Buszugriff
- Kommunikation immer zwischen Master und Slaves

- Vorteile:

- einfache Organisation
- sichergestellte Maximalzeit

- Nachteile:

- maximale Reaktionszeit (Latenzzeit) proportional zur Anzahl der Busteilnehmer
- keine Kommunikationsbeziehung mehr möglich bei Ausfall des Masters



Beispiele: AS-Interface, Bitbus, Profibus

3.4 Buszugriffsverfahren

■ Token-Passing-Verfahren

- Prinzip:

Weitergabe des **T**oken (Senderecht) von Teilnehmer zu Teilnehmer nach einer maximalen Zeitdauer

- Arten:

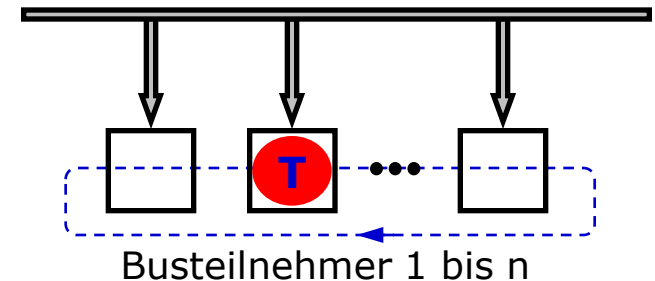
- Token-Bus: Weitergabe des Token in Reihenfolge der Busadressen
- Token-Ring: Senderecht nach Reihenfolge der Teilnehmer im Ring

- Vorteile:

- gutes, vorhersagbares Echtzeitverhalten
- sehr gute Hochlasttauglichkeit

- Nachteile:

- lange Verzögerungszeiten im Fehlerfall
- Überwachung der Tokenweitergabe
- Reinitialisierung nach Tokenverlust



Beispiel: Profibus

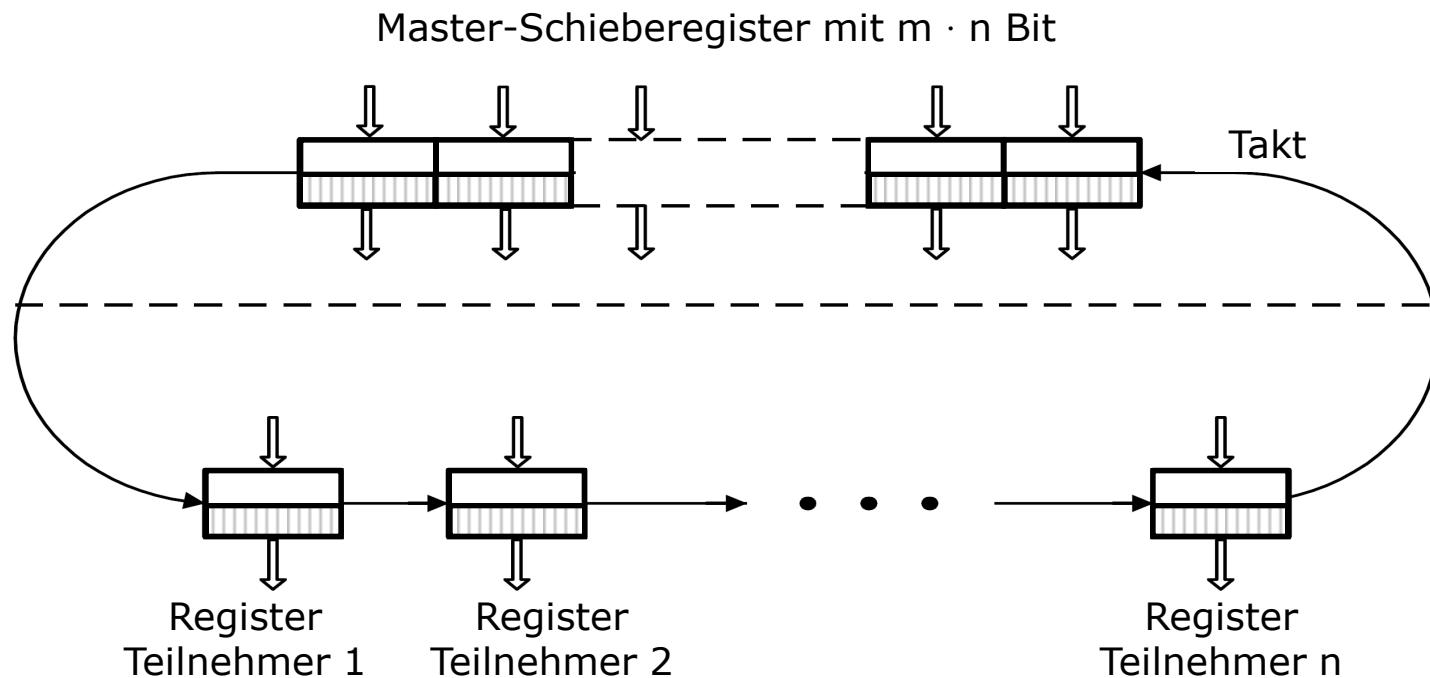
3.4 Buszugriffsverfahren

■ TDMA-Verfahren

- Time Division Multiple Access

- Prinzip:

- Jeder Teilnehmer bekommt innerhalb einer Periode (TDMA-Zyklus) einen oder mehrere Zeitschlitzte bestimmter Länge.
- Prinzip des **verteilten Schieberegisters**



3.4 Buszugriffsverfahren

■ TDMA-Verfahren

- **T**ime **D**ivision **M**ultiple **A**ccess

- Vorteile:

- kurze, konstante Zykluszeit
- geringer Protokoll-Overhead

- Nachteile:

- zeitliche Synchronisierung der Teilnehmer notwendig
- ungeeignet für autonome Teilnehmer
- wenig flexibel, keine dynamische Anpassung

Beispiele: INTERBUS-S, FlexRay

3.4 Buszugriffsverfahren

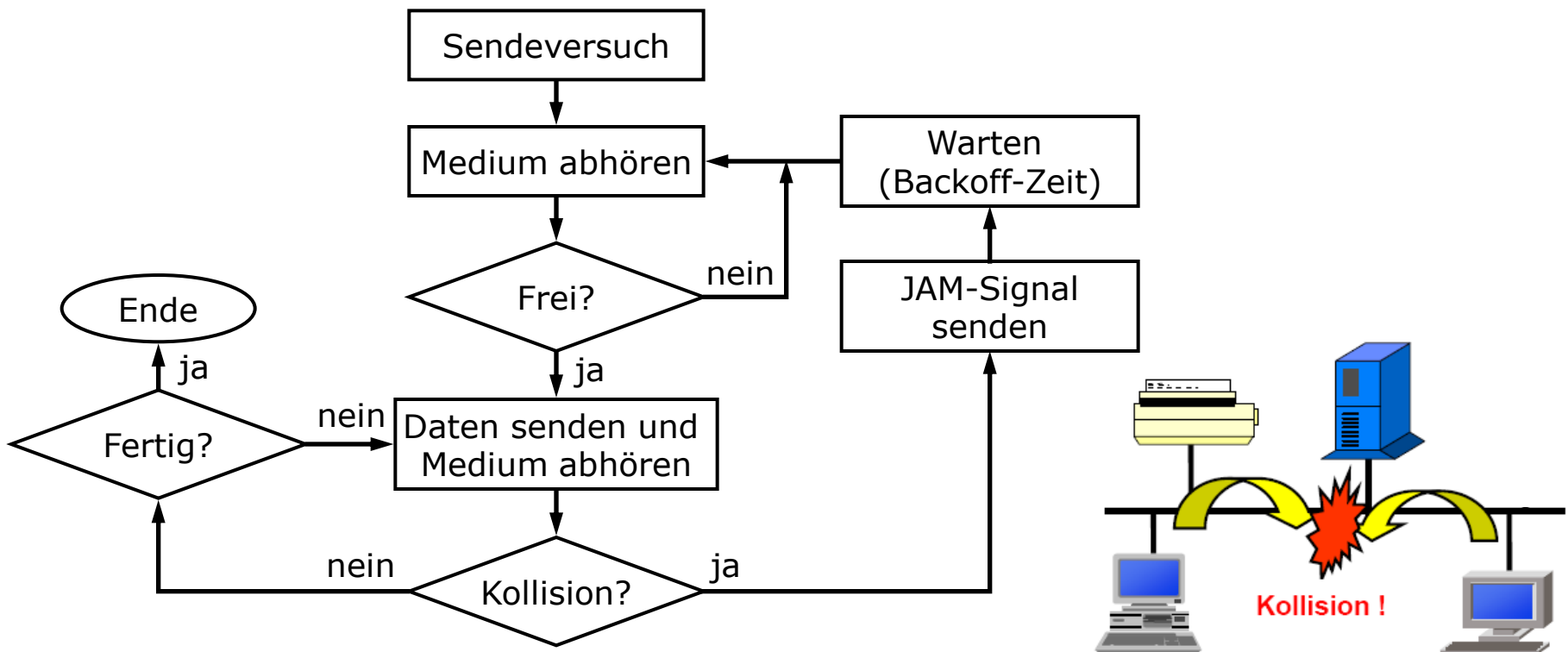
■ CSMA-Verfahren

- **C**arrier **S**ense **M**ultiple **A**ccess

- Prinzip:

Jeder Teilnehmer hat Buszugriff ohne explizite Senderechtszuteilung (Multiple Access).

- Ablauf eines Sendevorgangs:



3.4 Buszugriffsverfahren

■ CSMA/CD-Verfahren - Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection

- Prinzip:

- Erkennung von Kollisionen durch Datenabgleich
- Sendewiederholung nach teilnehmerspezifischer Wartezeit

- Vorteile:

- niedrige Busbelastung
- kurze Latenzzeit im Niederlastbereich

- Nachteil:

- im Hochlastbereich lange Wartezeiten

Beispiel: Ethernet

3.4 Buszugriffsverfahren

■ CSMA/CA-Verfahren - Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance

- Prinzip:

Vermeidung von Kollisionen durch Prioritätsregeln

- Prioritätsregeln:

- Adress-Arbitrierung: Teilnehmer mit niedrigster/höchster Adresse setzt sich bei gleichzeitigem Sendeversuch durch.

Beispiel: CAN-Bus

- Zeitspanne-Zuordnung: Nach Beendigung einer Sendung teilnehmerspezifische Wartezeitspanne

3.5 Wichtige Feldbussysteme

■ CAN-Bus

- Controller Area Network

- Ursprung:

Entwicklung durch Bosch/Intel für den Einsatz im Automobilbereich (Airbag, ABS, Motormanagement, Klimaanlage usw.)

- Eigenschaften:

- Nachrichtenorientierte Adressierung: Auf einem Knoten können mehrere Objekte liegen, Objekt wird adressiert, nicht der Knoten.
- Multimaster-Buszugriffstechnik
- Busvergabe nach **Prioritäten** bei Zugriffskonflikt durch nichtzerstörende, bitweise Arbitrierung nach dem **CSMA/CA-Verfahren**
- Kurze Botschaftslänge (0–8 Byte)
- Übertragungsraten bis 1 Mbit/s (bei max. 40m Buslänge)
- Verschiedene Fehlererkennungsmechanismen
- Selbsttest durch Fehlerzähler: Verursacht ein Knoten zu viele Fehler, so koppelt er sich schrittweise vom Bus ab.

3.5 Wichtige Feldbussysteme

■ PROFIBUS

- **P**rocess **F**ield **B**us

- Feldbusfamilie:

- PROFIBUS-DP (**D**ezentrale **P**eripherie)
- PROFIBUS-FMS (**F**ield **M**essage **S**pecification)
- PROFIBUS-PA (**P**rozess-**A**utomatisierung)

- Master-Teilnehmer (aktive Teilnehmer):

- Sendung von Nachrichten ohne Aufforderung bei Tokenbesitz

 **Token-Passing-Verfahren für aktive Teilnehmer**

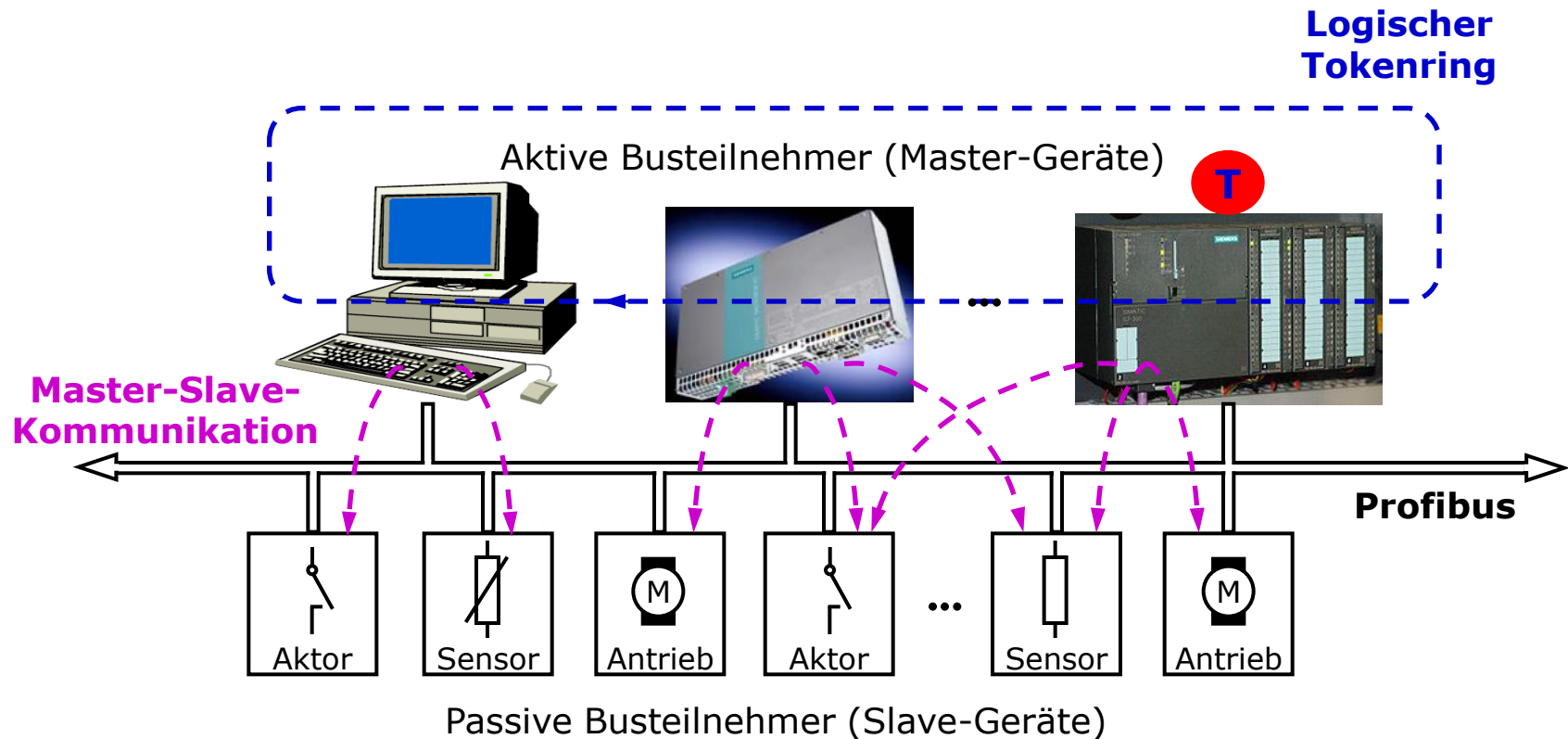
- Slave-Teilnehmer (passive Teilnehmer):

- kein Tokenbesitz möglich
- Quittierung von Nachrichten
- Nachrichtenübermittlung auf Anfrage

 **Master-Slave-Verfahren zwischen aktiven und passiven Teilnehmern**

3.5 Wichtige Feldbussysteme

■ Hybrides Zugriffsverfahren beim PROFIBUS



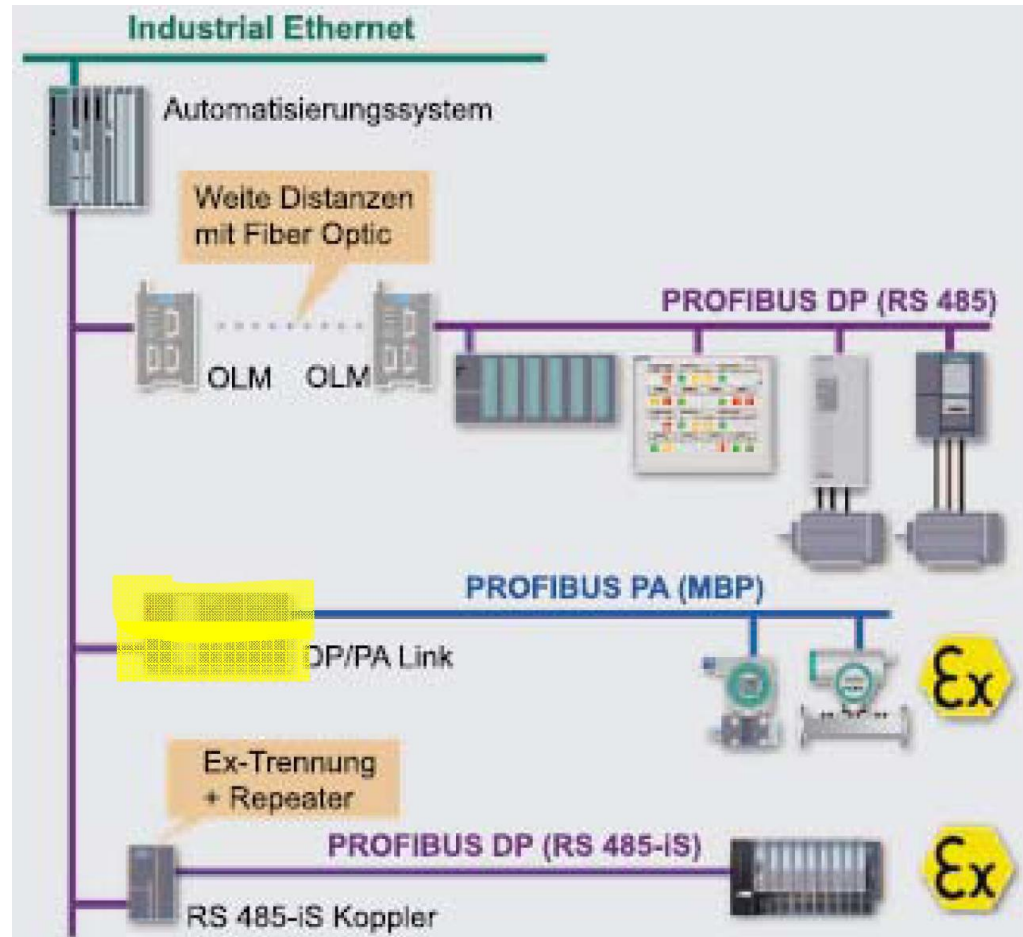
3.5 Wichtige Feldbussysteme

■ PROFIBUS DP

- hohe Datenübertragungsraten: bis 12 Mbit/s
- geringe Reaktionszeiten: bis 1 ms
- **intelligente** Feldgeräte
(z.B. Antriebe, Analysengeräte, Prozessregler oder Panels) und
- **dezentrale** Peripheriegeräte
(Remote I/Os)

■ PROFIBUS PA

- Übertragungsrate: 31,25 kbit/s
- typische Kommunikationszeit: 10 ms
- Zweidrahtleitung mit eigensicherer Übertragungstechnik MBP
(Manchester Coded; Bus Powered)
- **einfache** Geräte
(z.B. pneumatische Aktuatoren, Magnetventile oder Sensoren für Mess- und Analyseaufgaben)



3.5 Wichtige Feldbussysteme

■ Interbus-S

- Zielsetzung:

Übertragung von zyklisch anfallenden Daten im Sensor-Aktor-Bereich ohne großen Overhead (kurze, deterministische Zykluszeiten)

- Topologie:

- geschlossener, deterministischer Ring
- **Master-Slave-Verfahren**, feste Telegramm-Länge
- Übertragungsrate: 500 kBit/s
- max. 4096 E/A-Punkte
- Buslänge: bis zu 400 m (zwischen zwei benachbarten Feldbus-Teilnehmern)
- Gesamtlänge: 13 km

- Physikalische Adressierung:

Zuweisung der Daten zu den einzelnen Teilnehmern nicht über die Vergabe einer Busadresse, sondern automatisch über die physikalische Lage der Teilnehmer im System

3.5 Wichtige Feldbussysteme

■ Industrial Ethernet

- Zielsetzung:

Einsatz von Ethernet (IEEE 802.3) auf der Feldebene
(aktueller Trend der Übertragung von Standard-Technologien auf die Automatisierungstechnik)

- Vorteile:

- kostengünstig (Massenmarkt)
- verbreitet (kein spezielles Know-How erforderlich)
- Durchgängigkeit (Anbindung an Office-Welt)
- Standard-Hardware

3.5 Wichtige Feldbussysteme

■ Industrial Ethernet

- Probleme:

- Anpassung an die speziellen Anforderungen der Automatisierungstechnik (Echtzeit, Robustheit, Sicherheit) erforderlich
- grundlegend nicht echtzeitfähig (CSMA/CD, **nicht deterministisch**)
- Übernahme der Probleme aus der Office-Welt (Hacker-Angriffe, Viren, allg. Sicherheit)

- Notwendige Anpassungen:

- Protokollerweiterungen zur Gewährleistung der **Echtzeitfähigkeit**
- Anpassung der Topologien zur Reduzierung der Latenzzeiten
- Anpassung der Hardware/Verkabelung zur Erhöhung der mechanischen **Robustheit**

Heutiger Standard: TCP/IP

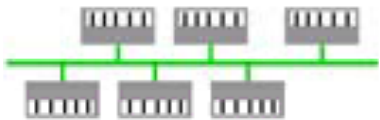
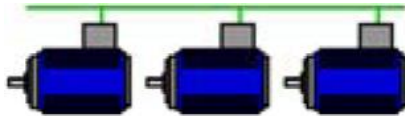
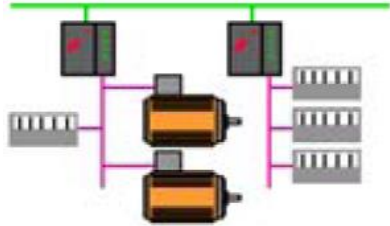
3.5 Wichtige Feldbussysteme

■ Office Ethernet vs. Industrial Ethernet

Büro	Industrie
<ul style="list-style-type: none">- Feste Grundinstallation im Gebäude- Variabler Gerätanschluss an Standardarbeitsplätzen- Überwiegend sternförmige Verkabelung	<ul style="list-style-type: none">- Anlagenabhängige Verkabelung und Kabelführung- Feldkonfektionierte Steckverbinder bis IP67- Redundante Verkabelung, häufig Ringstrukturen
<ul style="list-style-type: none">- Große Datenpakete- Mittlere Netzverfügbarkeit- Hauptsächlich azyklische Übertragung- Kein Echtzeitverhalten notwendig	<ul style="list-style-type: none">- Kleine Datenpakete- Sehr hohe Netzverfügbarkeit- Hauptsächlich zyklische Übertragung- Echtzeitverhalten notwendig
<ul style="list-style-type: none">- Normaler Temperaturbereich- Wenig Staub, Feuchtigkeit und Erschütterungen- Kaum mechanische oder chemische Belastung- Geringe EMV-Belastung	<ul style="list-style-type: none">- Erweiterter Temperaturbereich- Staub, Feuchtigkeit und Erschütterungen möglich- Gefahr durch mechanische Beschädigung oder chemische Belastung- Hohe EMV-Belastung

3.5 Wichtige Feldbussysteme

■ Einsatzbereiche für Industrial Ethernet



	Echtzeit-Anforderungen	Gerätekosten	Stückzahl
Vernetzung von abgeschlossenen, intelligenten Komponenten	gering ↘	hoch ↗	niedrig ↘
Vernetzung intelligenter Antriebe	hoch ↗	hoch ↗	mittel →
Dezentrale Ein-/Ausgabegeräte (I/Os)	hoch ↗	niedrig ↘	mittel →



Der rentable Einsatz von Industrial Ethernet ist stark vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig!

3.5 Wichtige Feldbussysteme

■ Vergleich wichtiger Feldbussysteme

Bezeichnung	Datenaustausch	Zykluszeit	Übertragungsrate	Anwendung
SERCOS	Token-Ring	1–2 ms	4 MBd	S/A-Bus (Servoantr.)
ASI	Polling, zyklisch	1–10 ms	170 MBd	S/A-Bus (binäre S/A)
Profibus	Master-Slave mit Token Passing	2–200 ms	10 kBd–12 MBd	Anlagen- und Feldbus
Profinet I/O	Industrial Ethernet TCP/IP	1–100 ms	10 MBd	Anlagen- und Feldbus
Interbus-S	Schieberegister mit Summenrahmenprotokoll	3–20 ms	Typ. 500 kBd	Feldbus
CAN	Prioritätsgesteuerter Datenverkehr	10–100 ms	1 MBd	Feldbus (Kraftfahrzeug)

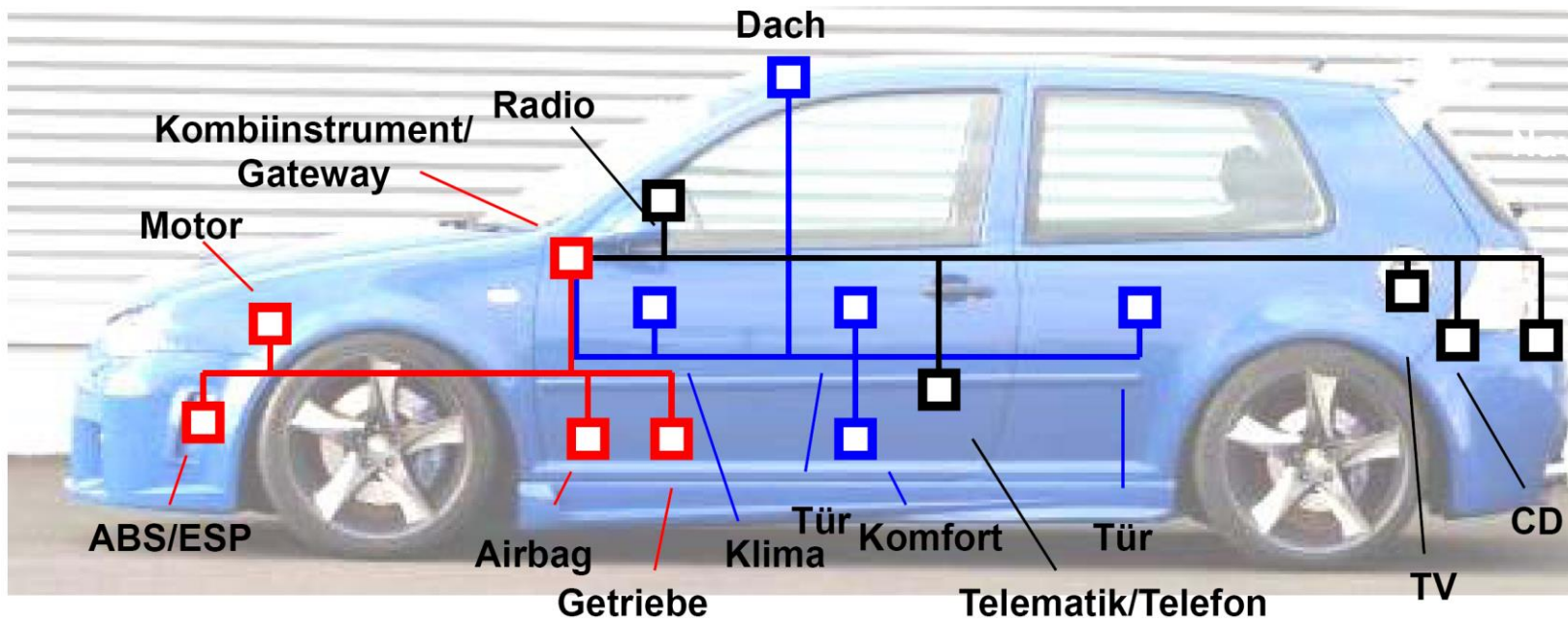
S/A: Sensor/Aktor
Bd: Bit/s

3.5 Wichtige Feldbussysteme

■ Beispiel eines vernetzten Fahrzeugs

Infotainmentbus CAN (100kBits) / MOST (25 Mbit/s)

CAN-Antrieb (500 kBit/s)



CAN-Komfort (100 kBit/s)