



Vernetzte Automatisierungsstrukturen mit Feldbussen 1 und 2

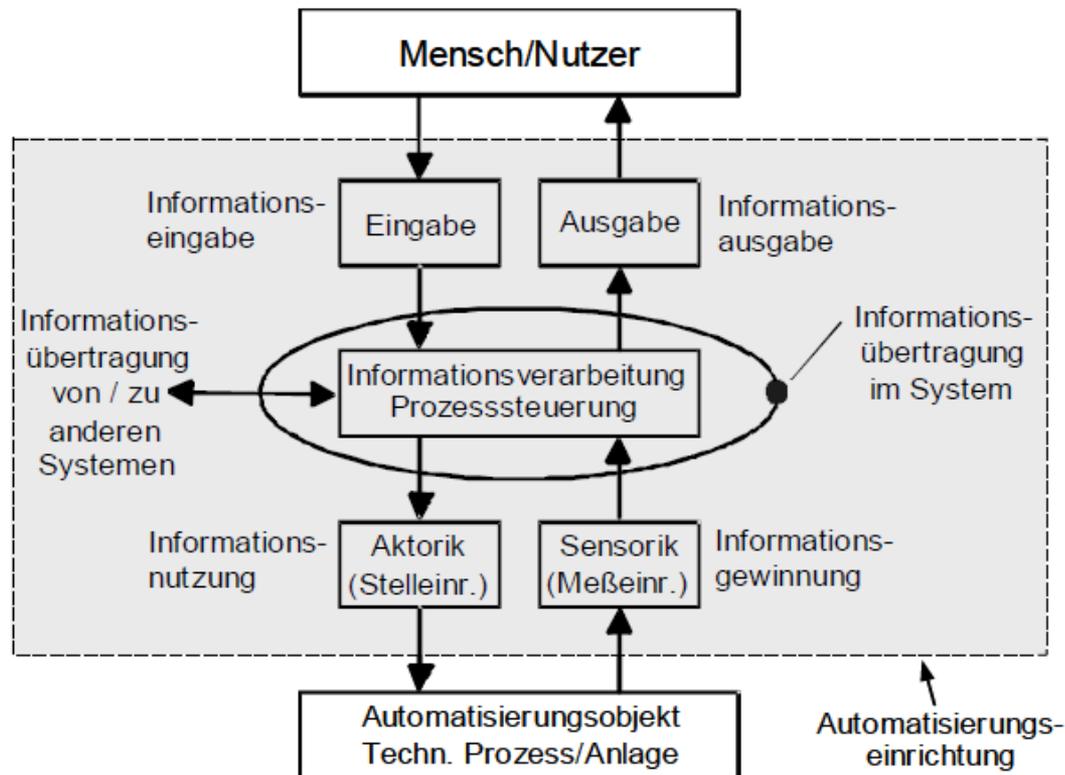
VL PLT 1

Professur für Prozessleittechnik

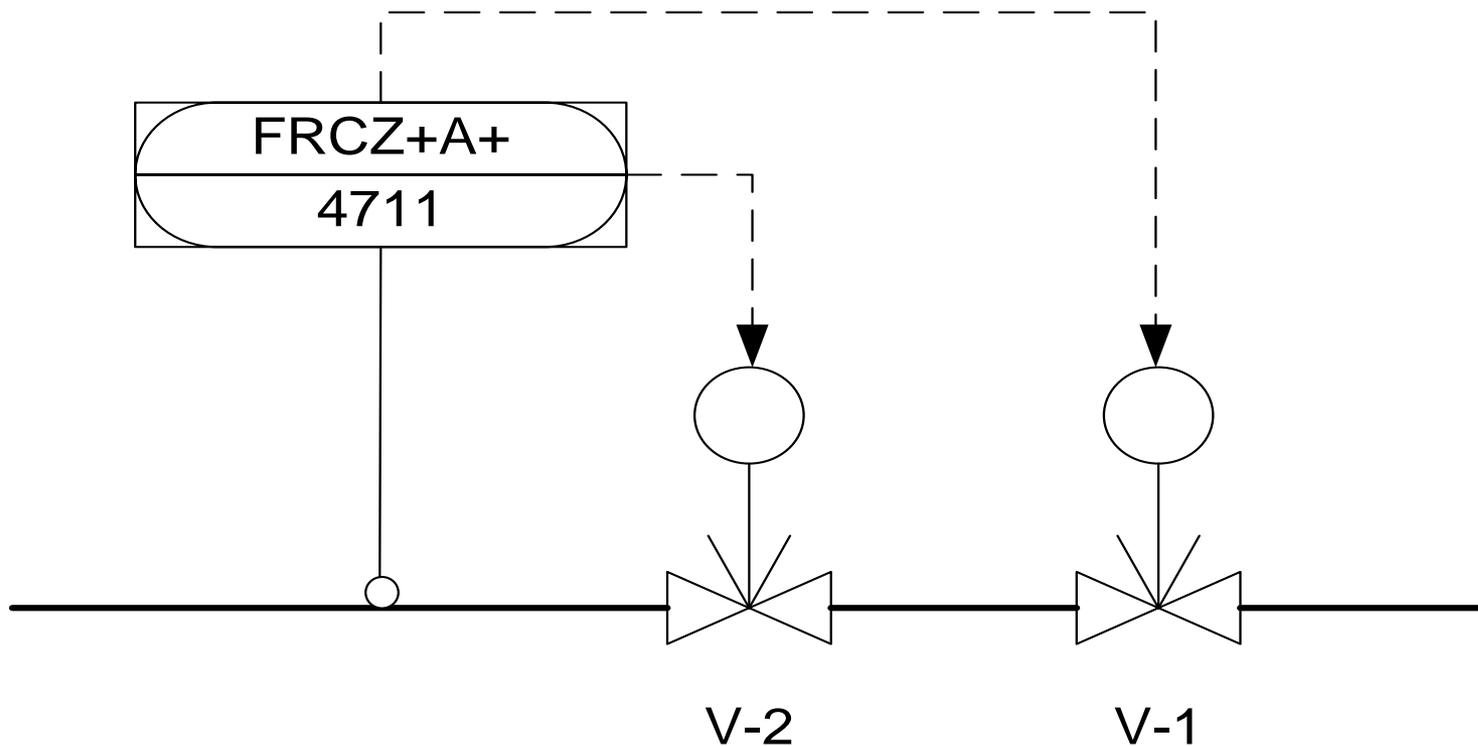
Übersicht Inhalte

- Loop
- Konventionelle Signalübertragung
 - Standardschnittstelle für analoge Signale: 4..20 mA
 - Ex-Zonen
- Signalübertragung mit Feldbussen
 - Grundlagen der bitseriellen Übertragung
 - Feldbusse für die Automatisierungstechnik
 - ASi, Interbus, CAN, CANopen, PROFIBUS, Ethernet

Prozessdatenkommunikation



Anforderung: Durchflussregelung (FRC) mit Sperrfunktion (Z+) und Meldung (A+)



Implementierung

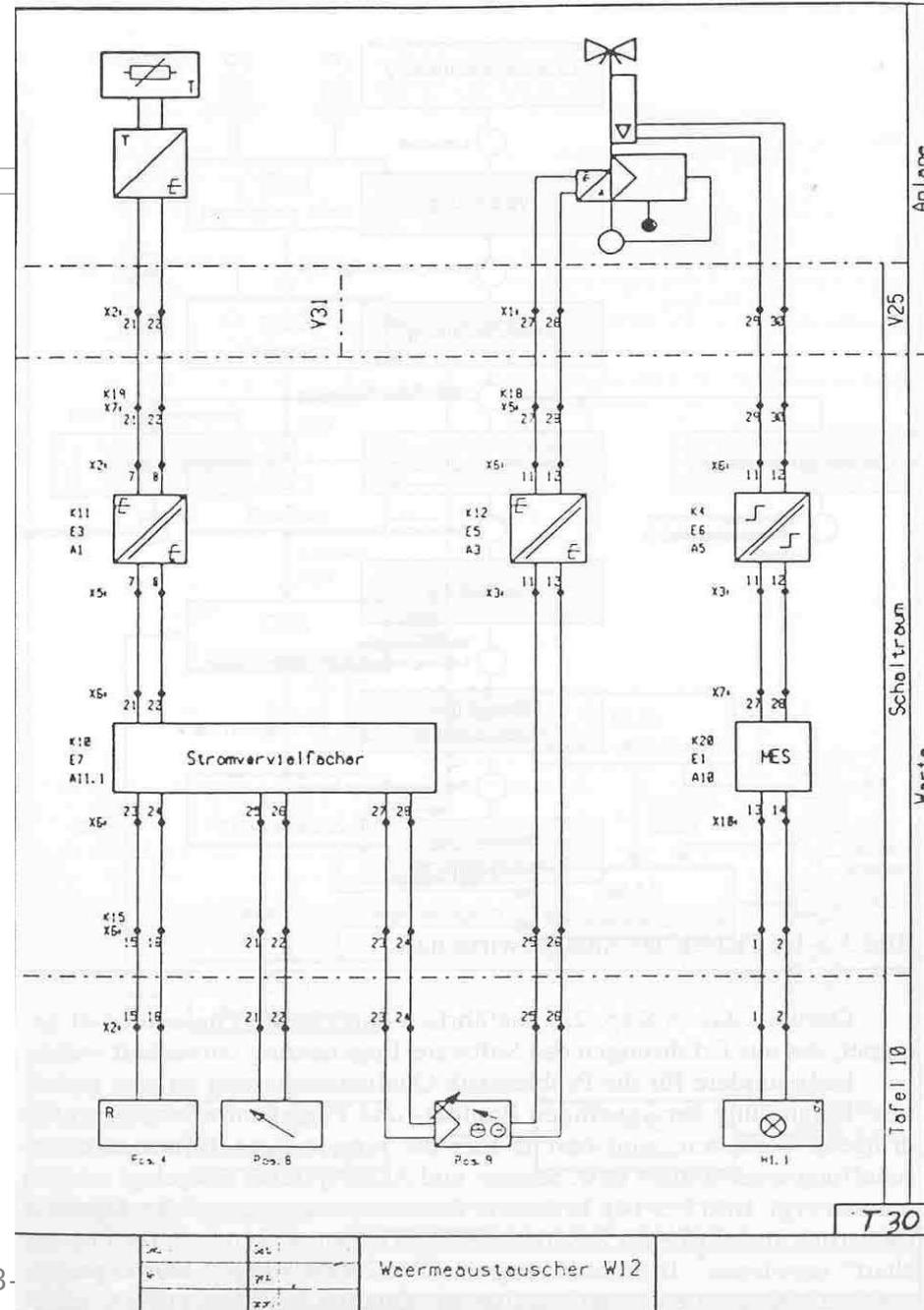
- Instrumentierung (Feld)
 - Sensoren
 - Messblende für Durchfluss + Messumformer
 - Aktoren
 - Kontinuierlich arbeitendes Ventil V-1 mit lokalem Stellungsregler (Positioner)
 - Auf/Zu Ventil V-2
- Recheneinheit SPS (Leitebene)
 - PID-Reglerbaustein (FRC)
 - Grenzwertüberwachung (Z+)
 - Meldebaustein (A+)
- Einheitliche Signalübertragung?

Anforderungen an Signalübertragung

- Messumformer
 - Wandlung physikalischer Größen in elektrisches Signal
- Forderungen an elektrisches Signal
 - Freie Kombinierbarkeit von Geräten
 - Weitgehende Unabhängigkeit von
 - Signalgeber, Übertragungsleitung, Signalempfänger
 - Strom:
 - Innenwiderstand \gg Summe Leitungs- und Eingangswiderstände
 - Spannungssignal:
 - Innenwiderstand \ll Summe Leitungs- und Eingangswiderstände

Konventionelle Signalübertragung

- Leitungsverbindung zwischen jedem Messumformer und PLS
- Stromversorgung der messumformer
 - mit Signalübertragung: 2-Leiter-Anschluss
 - Separat: 4-Leiter-Anschluss



Strukturierte Verkabelung

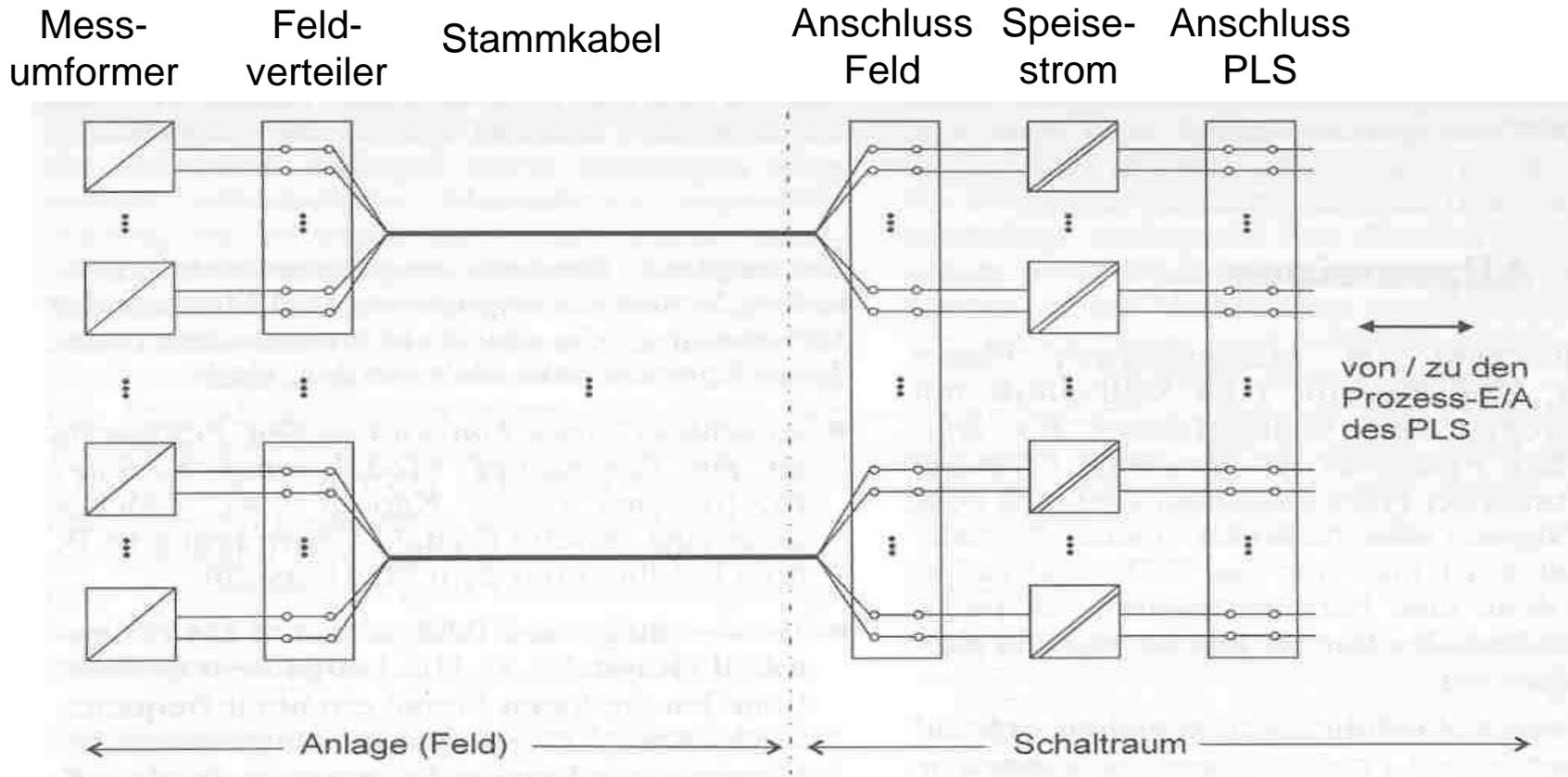


Bild 1: Verkabelung von Feldgeräten (hier mit 2-Leiter-Anschluss).

Stromsignal 4..20 mA

- Das Standardsignal für beliebige analoge Größen
- Normen und Richtlinien
 - NE 06(Signalpegel)
 - NE 43(Ausfallinformation)
 - DIN IEC 60381

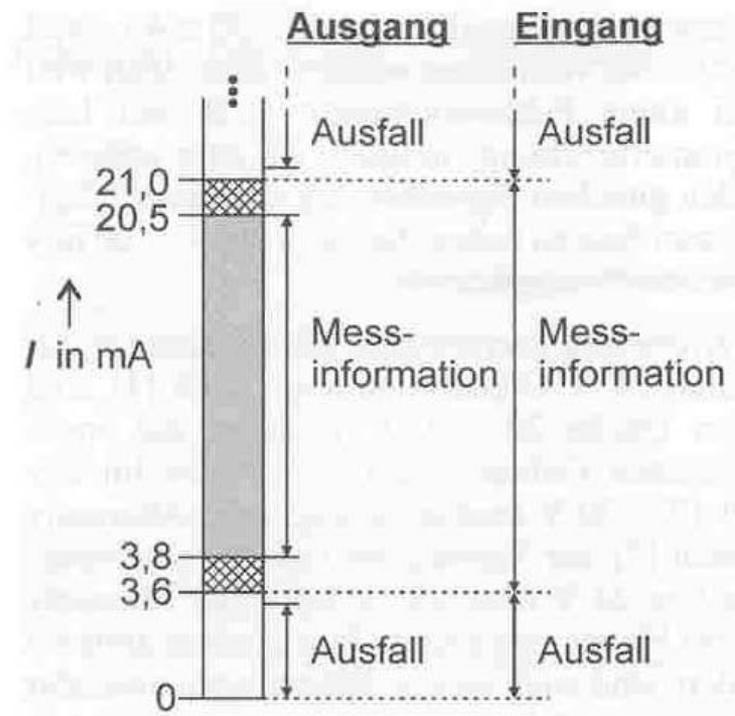
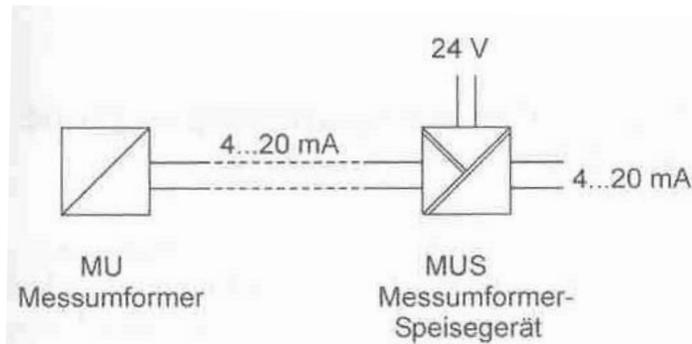


Abbildung physikalisches Signal auf Messbereich 4..20mA

- Physikalisches Signal: [M1 ... M2]
- Stromausgangsbereich: [I1 ... I2]
- Messwert M mit $M1 \leq M \leq M2$
- Ausgangsstrom des Messumformers

$$I = I_1 + \frac{M - M_1}{\Delta M} \Delta I$$

- Einstellung des Messbereichs am Gerät (Poti, Trimmer, Brücken, Vorortbedienung) oder ggf. digitale Kommunikationsschnittstelle

Explosionsschutz

- Stäube, brennbare Flüssigkeiten und Gase können mit Sauerstoff (Luft) explosionsfähige Gemische bilden
- Explosion:
 - Brennbarer Stoff +
 - Sauerstoff +
 - Zündenergie



(Quelle R.Stahl)

Zonen und Geräte

- Zoneneinteilung (Richtlinie 1999/92/EG, Deutsches Recht: Anhang 3 der Betriebssicherheitsverordnung)
 - Zone 0 – explosionsfähige Atmosphäre (Gas + Luft) ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden vorhanden
 - Zone 1 – gelegentlich bei Normalbetrieb
 - Zone 2 – normalerweise nicht oder nur kurzzeitig
 - Zone 20 - explosionsfähige Atmosphäre (Staub + Luft) ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden
 - Zone 21 - gelegentlich bei Normalbetrieb
 - Zone 22 –normalerweise nicht oder nur kurzzeitig
- Gerätekategorien (Richtlinie 94/9/EG, Deutsches Recht: ExVO)
 - Kategorie 1 – Zone 0, 20
 - Kategorie 2 – Zone 1, 10
 - Kategorie 3 – Zone 2, 22

Ermittlung explosionsgefährdeter Bereiche

- Frage 1) Sind brennbare Stoffe vorhanden?
- Frage 2) Kann durch ausreichende Verteilung in der Luft explosionsfähige Atmosphäre entstehen?
- Frage 3) Ist die Bildung eines explosionsgefährdeten Bereiches möglich?
- Exschutzmaßnahmen erforderlich!
- Frage 4) Ist die Bildung eines explosionsgefährdeten Bereiches zuverlässig verhindert?
- Frage 5) Ist die Entzündung in einem explosionsgefährdeten Bereich zuverlässig verhindert?

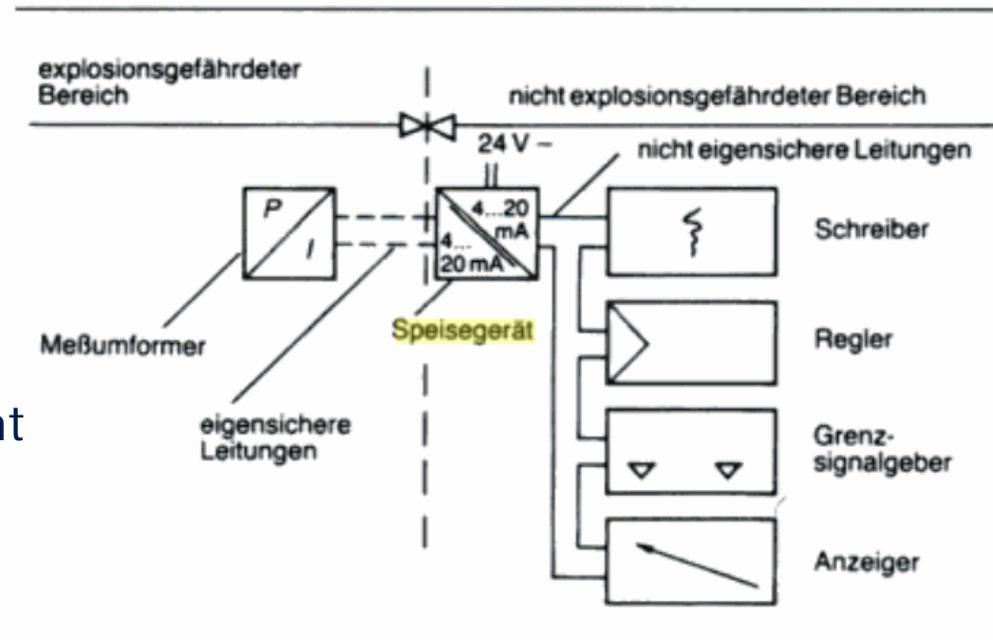
Zündschutzarten VDE 0170/0171 *

- Beschränkung der Energie
 - Eigensicherheit Ex i
 - Strom, Spannung, Kapazität, Induktivität
- Bauartbedingte Verhinderung von Funkenbildung
 - Erhöhte Sicherheit Ex e
- Beschränkung der Explosion auf kleine Räume
 - Druckfeste Kapselung Ex d
- Ausschluss explosionsfähiger Atmosphäre um die Zündquelle
 - Sandkapselung Ex q
 - Vergußkapselung Ex m
 - Ölkapselung Ex o
 - Überdruckkapselung Ex p

* DIN EN 60079-x, DIN EN 61241-x (alt DIN EN 50014-50020)

Trennung durch Speisegerät

- Speisegerät
 - Versorgt Messumformer mit Energie
 - Trennt Messgerät und Signalverarbeitungsgeräte
 - Trennt eigensichere Schleife im Feld von nicht eigensicheren Leitungen in Warte & Schaltraum
 - Ermöglicht Anschluss mehrerer Signalsenken



Probleme konventioneller Signalübertragung

- Viele, ggf. lange Signalleitungen
 - Lösungsansatz Remote I/O
- Hoher Inbetriebnahmeaufwand
 - Loopcheck & Kalibrierung über gesamte Leitung
 - Einstell- und Diagnosemöglichkeit nur am Gerät
- Lösungsansatz digitale Kommunikation
 - Eine Leitung / viele (diskrete) Nachrichten
 - Gleiche Ausfallsicherheit?



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

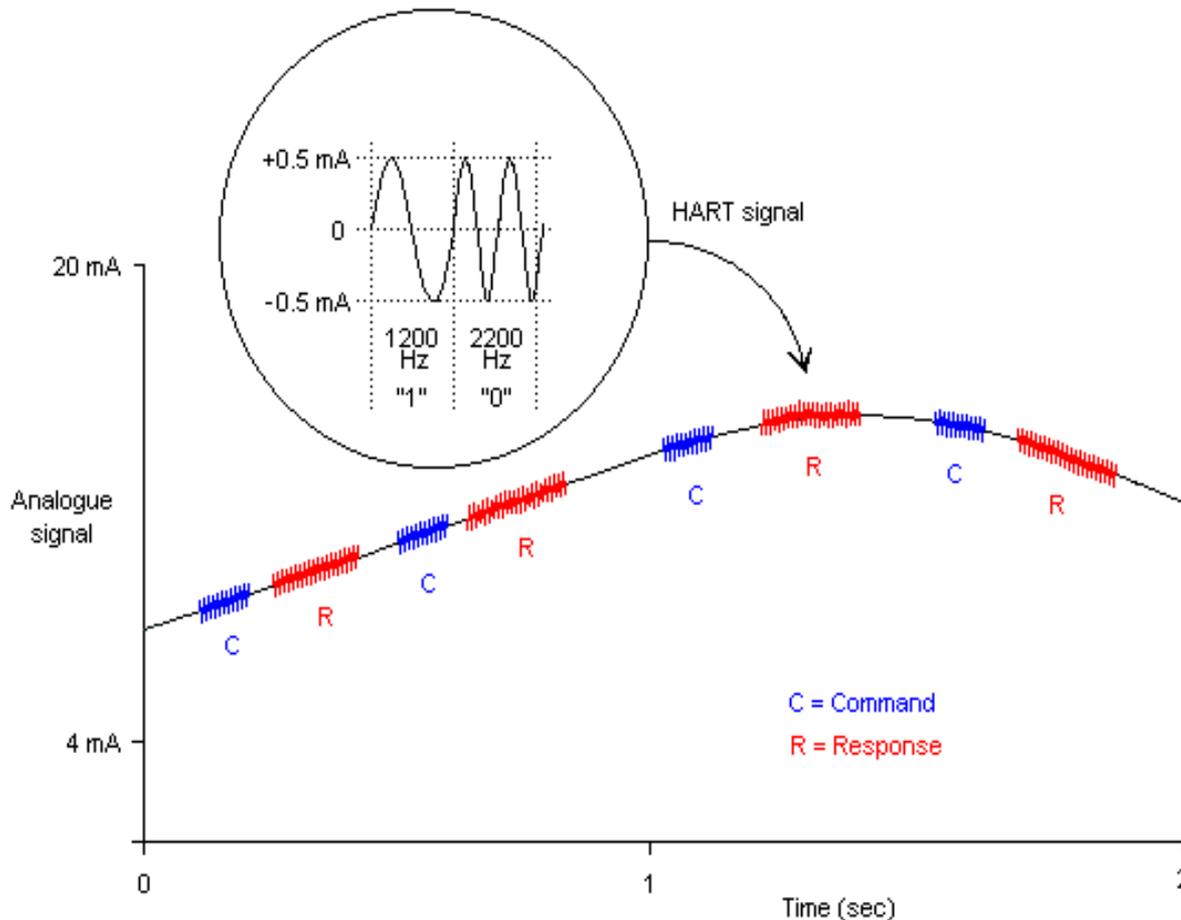
Fak. Elektrotechnik & Informationstechnik · Institut für Automatisierungstechnik · Professur für Prozessleittechnik

Digitale Signalübertragung

Inhalt

- HART
- Geometrische Anordnung - Netzwerktopologie
 - Zweipunktverbindung, Linienstruktur, Baumstruktur, Ringstruktur, Sternstruktur
- Kommunikationsmodell - ISO/OSI-Referenzmodell
- Beispiele von Feldbusse für die Automatisierungstechnik **ASi**, Interbus, CAN, CANopen, **PROFIBUS**, Ethernet

- HART: **H**ighway **A**dressable **R**emote **T**ransducer
 - Digitaler Datenaustausch zwischen Feldgerät und einem Master durch Überlagerung der digitalen Kommunikation über dem analogen Stromsignal
- Signalübermittlung: Überlagerung des Stromsignals mit einem Frequenzsignal
 - Frequenzschiebeverfahren (Frequency Shift Keying (FSK))
 - 2400Hz=0, 1200Hz=1
- Protokoll: Master-Slave mit max. 2 Master
 - 500-800ms / Transaktion
 - Universelle Kommandos (Universal Commands, Alle Geräte)
 - Identifikation des Geräts
 - Auslesen von max. 4 Messwerten incl. phys. Einheit
 - Schreiben Messstellenkennzeichen, Geräteadresse, etc.
 - Allgemeine Kommandos (Common Practice Commands, Viele Geräte)
 - Setzen von Parametern wie Integrationszeit, Nullpunkt, Spanne, Einheiten
 - Gerätespezifische Kommandos (Device Specific Commands)
 - Nicht standardisierte, geräteabhängige Kommandos

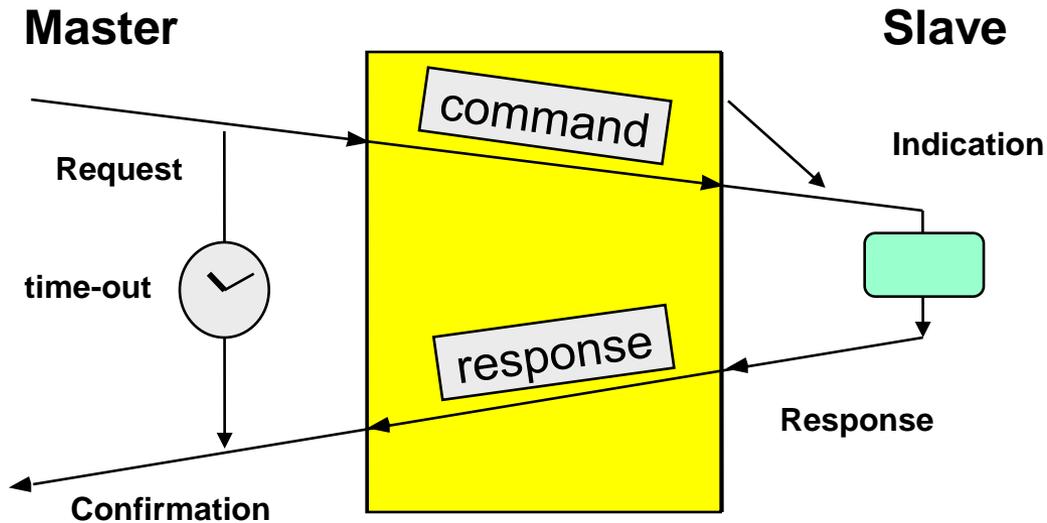


HART modulates the 4-20mA current with a low-level frequency-shift-keyed (FSK) sine-wave signal, without affecting the average analogue signal.

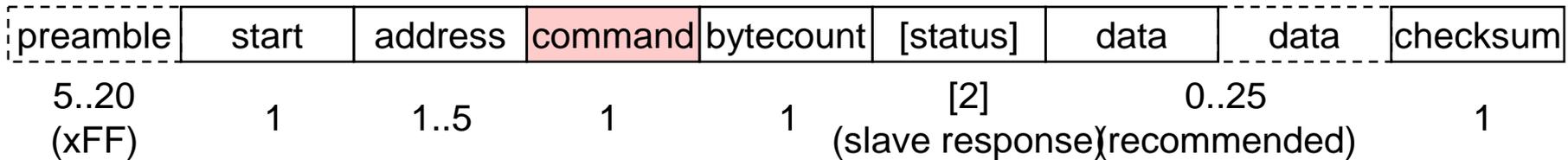
HART uses low frequencies (1200Hz and 2200 Hz) to deal with poor cabling, its rate is 1200 Bd - but sufficient.

HART uses Bell 202 modem technology, ADSL technology was not available in 1989, at the time HART was designed

Punkt-zu-Punkt Kommunikation unter Kontrolle des Masters (z.B. Hand-Held)



HART frame format (character-oriented):

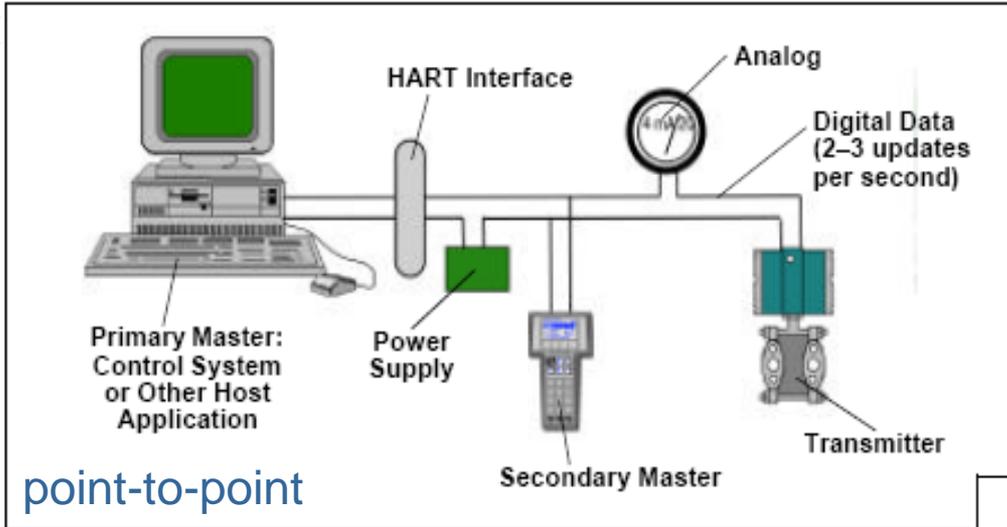


HART-Telegrammübertragung:

Byte pro Telegramm:	25 Nachrichten-	+ 10 Steuerzeichen	
Telegrammgröße:	35 Zeichen*	11 Bit	= 385 Bit
Nutzdatenanteil:	25 * 8 Bit /	385 Bit	= 52 %
Zeit pro Bit	1 / 1200 Bit/s		= 0.83 ms
Übertragungszeit:	385 * 0.83 ms		= 0,32 s
Zeit je Nutzbyte	0.32 s / 25 Byte		= 13 ms

- Universal commands (mandatory):
 - identification (each manufactured device is identified by a 38-bit unique identifier), primary measured variable and unit (floating point format), loop current value (%) = same info as current loop
 - read current and up to four predefined process variables
 - write short polling address
 - sensor serial number
 - instrument manufacturer, model, tag, serial number, descriptor, range limits, ...
- Common practice (optional)
 - time constants, range, EEPROM control, diagnostics,...
- total 44 standard commands
- Transducer-specific (user-defined)
 - calibration data, trimming,...

Installation

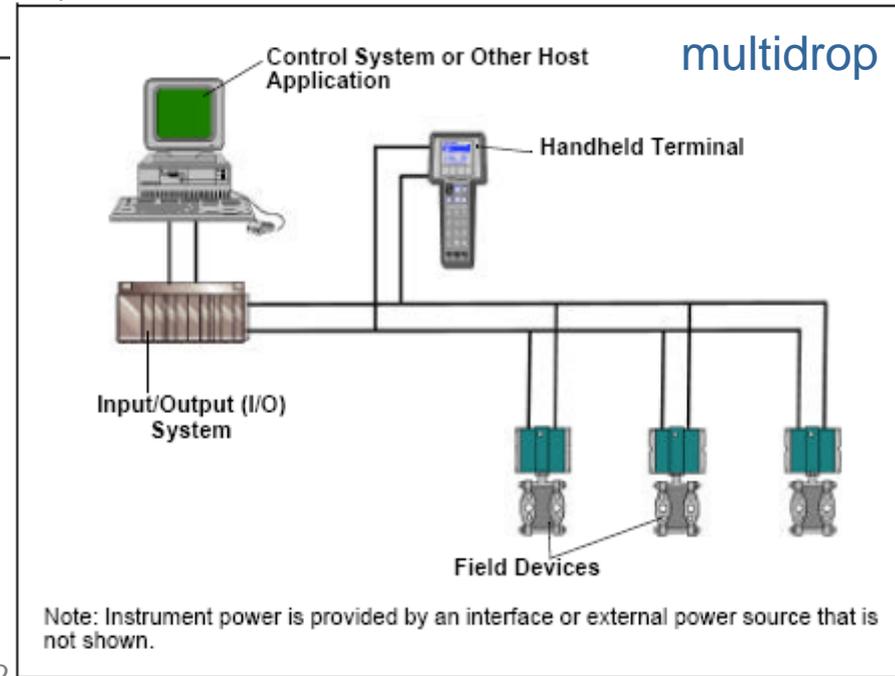


universal hand-help terminal



taken from: www.hartcomm.org

07. & 21.06.11



PLT1 (c) 2008-2011, ST

PLT1 (c) 2008-2011, ST

- Device Description Language (HART DDL)
 - Beschreibung von Kommandos, Dateninhalten und Bediensequenzen
 - Interpretation durch HART-Master
- Field Device Tool / Device Type Manager (FDT/DTM)
 - Gerätespezifische ActiveX-Komponente für das Engineering: Regeln, Dialoge, Benutzeroberfläche, Plausibilisierung, Lesen & Schreiben, Diagnose
 - „Unabhängig“ von Engineering-Tool

Verbindungsstrukturen

Temporäre Punkt-zu-Punkt-Verbindung

Multiplexer

Multidrop

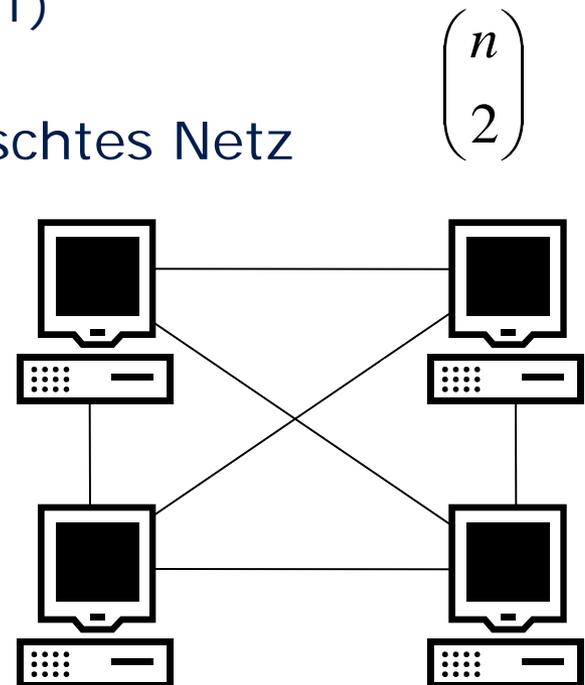
Direkter Systemanschluß

Netzwerktopologie

- Geometrische Anordnung
 - Physikalische Verbindungen zwischen den Teilnehmern
- Logische Anordnung
 - Kommunikationsverbindung
 - Häufig unabhängig von Geometrie

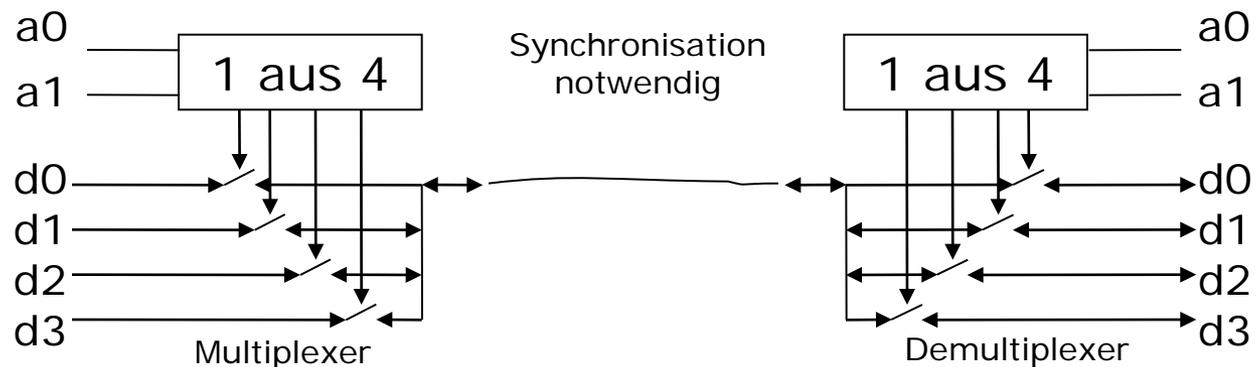
Zweipunktverbindung

- Beispiele
 - PC: Modem, Drucker, Tastatur
 - AT: NAMUR Einheitssignal (+ HART)
- Verbindung von n Teilnehmer mit Zweipunktverbindungen → vermaschtes Netz
 - Schnittstellen: $n * (n-1)$
 - Verbindungen: $n!/(2!(n-2)!)$
 - Kosten: hoch
 - Ausfall: 1 Teilnehmer/1Kanal
 - Diagnose: Einfach



Zweipunktverbindung mit Multiplexer

- Mehr als 2 Teilnehmer auf einer Zweipunktverbindung
 - Gegenseitige Signalbeeinflussung
- Lösung: Multiplexverfahren
 - Zeitmultiplexverfahren
 - Basisbandübertragung 0 – Grenzfrequenz
 - Simplex, Halbduplexbetrieb
 - Beispiel AT: HART-Multiplexer

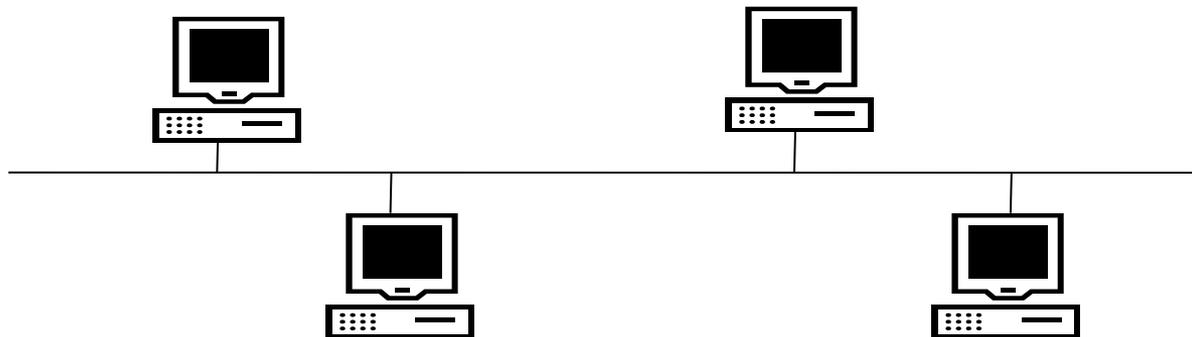


Zweipunktverbindung mit Multiplexer

- Frequenzmultiplexverfahren
 - Übertragungskanal wird in mehrere, voneinander unabhängige Frequenzbänder mit definierter Bandbreite aufgeteilt
 - Bidirektionale Übertragung möglich (Vollduplex)
- Modulationsarten
 - Amplitude
 - Frequenz
 - Phase
- Baugruppen zur Modulation i.A. teurer als MUX/DEMUX → Einsatz vorwiegend in Weitverkehrsnetzen (WAN)

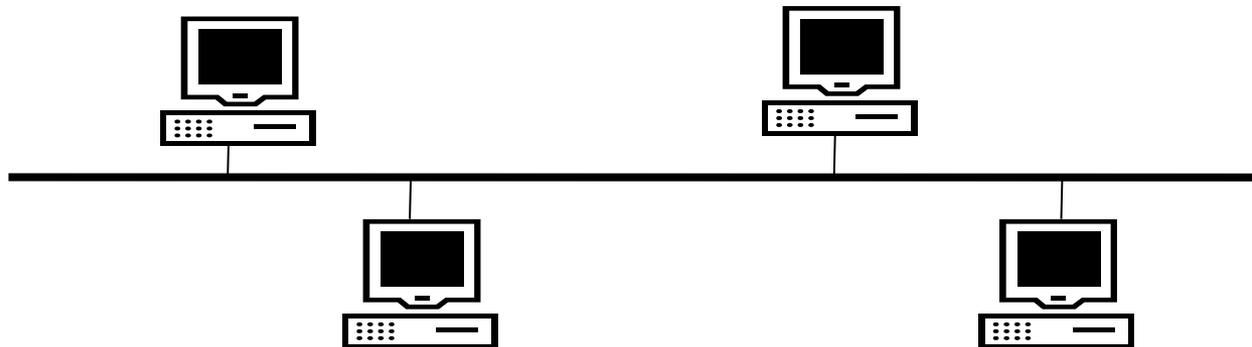
Bus-Struktur (Linienstruktur)

- Alle Teilnehmer kommunizieren über eine gemeinsame Leitung
 - Anbindung an Buskabel über kurze Stichleitung (Dropkabel)
 - Vorteil: weniger Kabel, weniger Schnittstellen
 - Nachteil: Regeln zur Festlegung des Zugriffsrechts notwendig → Buszugriffsverfahren



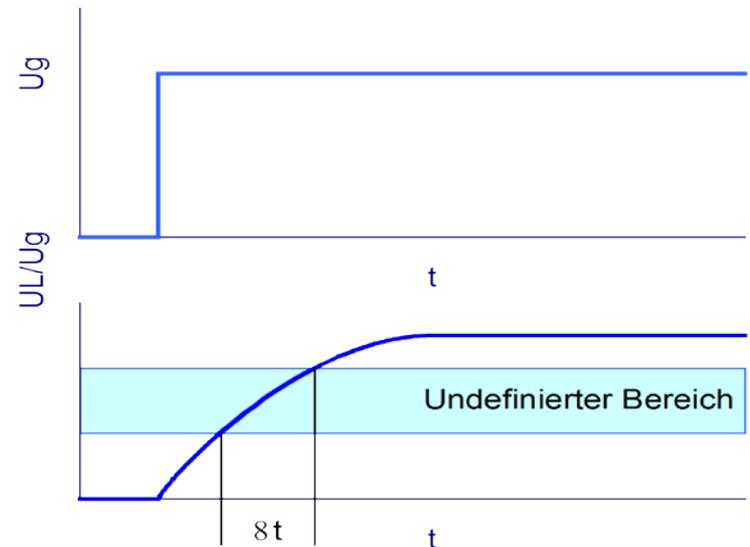
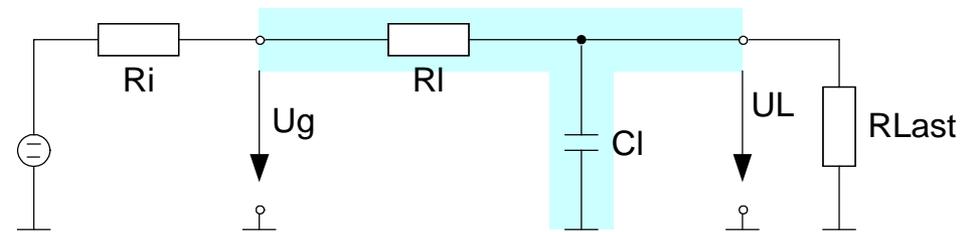
Begrenzung der Teilnehmer an einer Bus-Struktur

- Forderung nach beliebigem Datenverkehr:
 - Alle Teilnehmer hören mit
→ Belastung des Senders steigt mit wachsender Teilnehmerzahl, da parallel geschaltet.
- Busleitungslänge ggü. Wellenlänge nicht mehr klein ($l > \lambda_{\max} / 10$)
 - Wellenwiderstände an Leitungsenden um Reflexionen zu vermeiden
 - Weitere Belastung des Senders



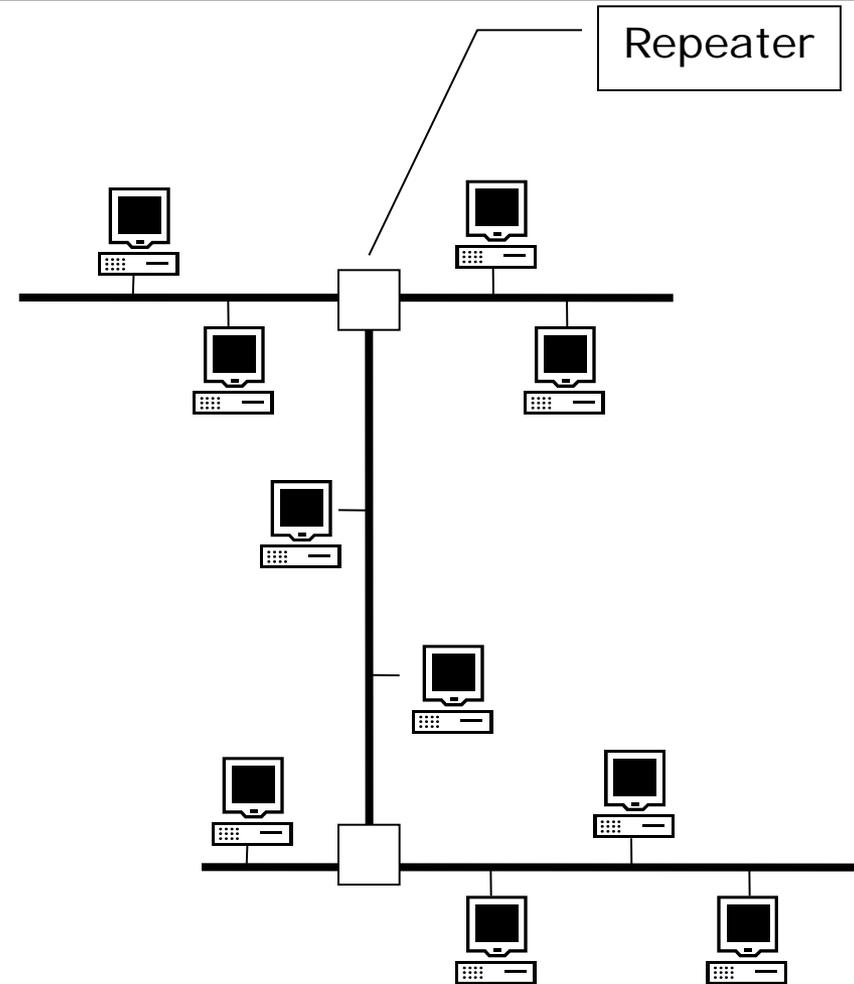
Begrenzung der Länge des Buskabels

- Buskabel \sim RC-Glied
- $R_l, C_l = f(\text{Leitungslänge})$
- Spannungssprung durch Sender
 - exponentieller Verlauf von U_{Last}
 - Zeitkonstante = $f(R_i, R_l, C_l, R_{\text{Last}})$
 - $f_{\text{max}} \ll 1/\Delta t$
- Verknüpfung von maximaler Leitungslänge und maximaler Übertragungsrate



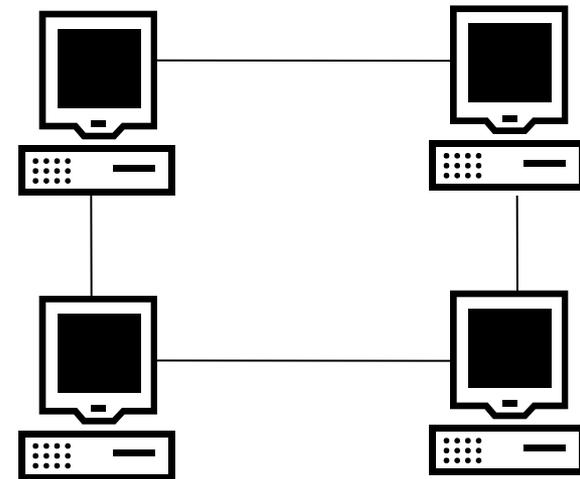
Baumstruktur

- Weiterentwicklung der Linienstruktur
 - Begrenzungen wie bei Linienstruktur
 - Vergrößerung der Werte durch Repeater (bidirektional arbeitende Verstärker)
- Größere Leitungslänge
 - Potentialunterschiede → Galvanische Trennung der Teilnehmer (i.d.R im Eingang)
 - EMV → differentielles Signal + verdrillte Leitungen



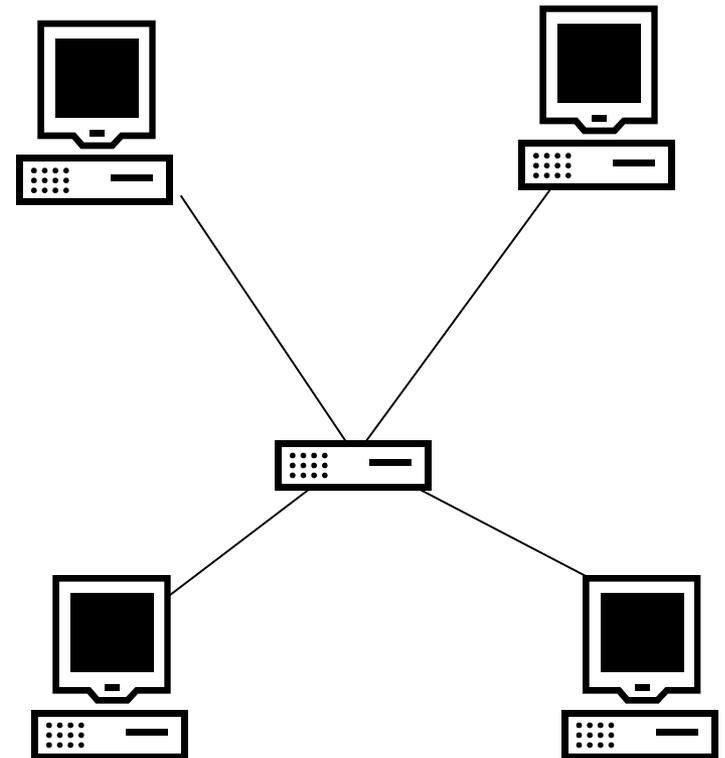
Ringstruktur

- Zweipunktverbindungen realisieren einen Ring
 - Information wird von Teilnehmer zu Teilnehmer gereicht
 - Zu einem Zeitpunkt darf nur ein Teilnehmer senden → Buszugriffsverfahren notwendig
 - Jeder Teilnehmer wirkt als Repeater → große Ausdehnungen bei hohen Datenraten möglich
- Ausfall Teilnehmer/Strecke → Ausfall Netz
 - Redundanz + Übertragung in beide Richtungen



Sternstruktur

- Verbindung einer Zentralstation mit Teilnehmern
- Sternkoppler (Hub)
 - Weiterleiten von Signalen
 - Aktiv/passiv
- Intelligente Zentralstation
 - Steuerung der Kommunikation
- Kommunikation erfolgt immer über Zentralstation → Ausfall Hub = Ausfall Netz





ISO/OSI-Referenzmodell

ISO/OSI-Referenzmodell

- Seit 70er: ISO Arbeitsgruppe Standardisierung von Rechnerkommunikation
 - 1983 ISO-Norm 7498 „Basic Reference Model for Open Systems Interconnection (OSI)“
 - als X.200 von CCITT übernommen
- **Abstrakte** Beschreibung der Kommunikation von Partnerprozessen
 - Abstraktion der Kommunikation in sieben Ebenen (Schichten) mit festgelegten Teilaufgaben und Funktionen
 - Jeder Kommunikationspartner enthält alle sieben Schichten
 - Die Schichten kommunizieren über genau definierte Schnittstellen → Austausch von Schichten möglich

Schichten des ISO/OSI-Referenzmodells

Nr.	Bezeichnung	Erläuterung
7	Anwendungsschicht (Application Layer)	Stellt den Netzwerkdienst für die Programme des Endanwenders bereit (Datenübertragung, e-mail)
6	Darstellungsschicht (Presentation Layer)	Legt Anwenderdatenstrukturen fest und konvertiert die Daten (Formatierung, Verschlüsselung, Zeichensatz)
5	Sitzungsschicht (Session Layer)	Auf- und Abbau einer Sitzung (logische Kanäle des Transportsystems)
4	Transportschicht (Transport Layer)	Stellt fehlerfreie logische Kanäle für den Datentransport bereit
3	Netzwerkschicht (Network Layer)	Transportiert Daten von der Quelle zum Ziel und legt die Wege der Daten im Netz fest
2	Datenverbindungs-schicht (Data Link Layer)	Datenformate für die Übertragung und Zugriffsart zum Netz.
1	Physikalische Schicht (Physical Layer)	Elektrische und mechanische Eigenschaften der Leitung

Physikalische Schicht (Bitübertragungsschicht)

- Elektrische und mechanische Eigenschaften der Übertragung
 - Art der Codierung
 - Spannungspegel
 - Zeitdauer / Bit
 - Art der Übertragungsleitung
 - Endsystemkopplung (Stecker)
 - Zuordnung der Anschlüsse (Pinbelegung)

Sicherungsschicht (Datenverbindungsschicht)

- Sicherer Transport der Daten von einer Station zur anderen
 - Organisation des Zugriffs auf das Medium
 - Datensicherung während der physikalischen Übertragung: Daten werden so „verpackt“, dass Übertragungsfehler erkannt werden können
 - Einteilung des Stroms in Rahmen (Data Frames) mit maximaler Länge an Nutzdaten
 - Rahmen enthält Rohdaten + Zusatzinformationen aus Sicherungsschicht, z.B. Prüfsumme, Anfangs- und Endeinformation

Netzwerkschicht

- Betrachtung des gesamten Netzwerks
 - Transport der Daten von Quelle bis Ziel, ggf. über Zwischenstationen
 - Routing (festlegen des Weges der Daten im Netz)
 - Packen und Auspacken von Paketen für Schicht 2
- Verbindungsorientierte Dienste
 - Virtueller Kanal zwischen Ziel und Quelle
 - Aufbau, Austausch, Abbau nach Telefonprinzip
- Verbindungslose Dienste
 - Daten werden mit Zieladresse ins Netz gegeben nach Postkartenprinzip

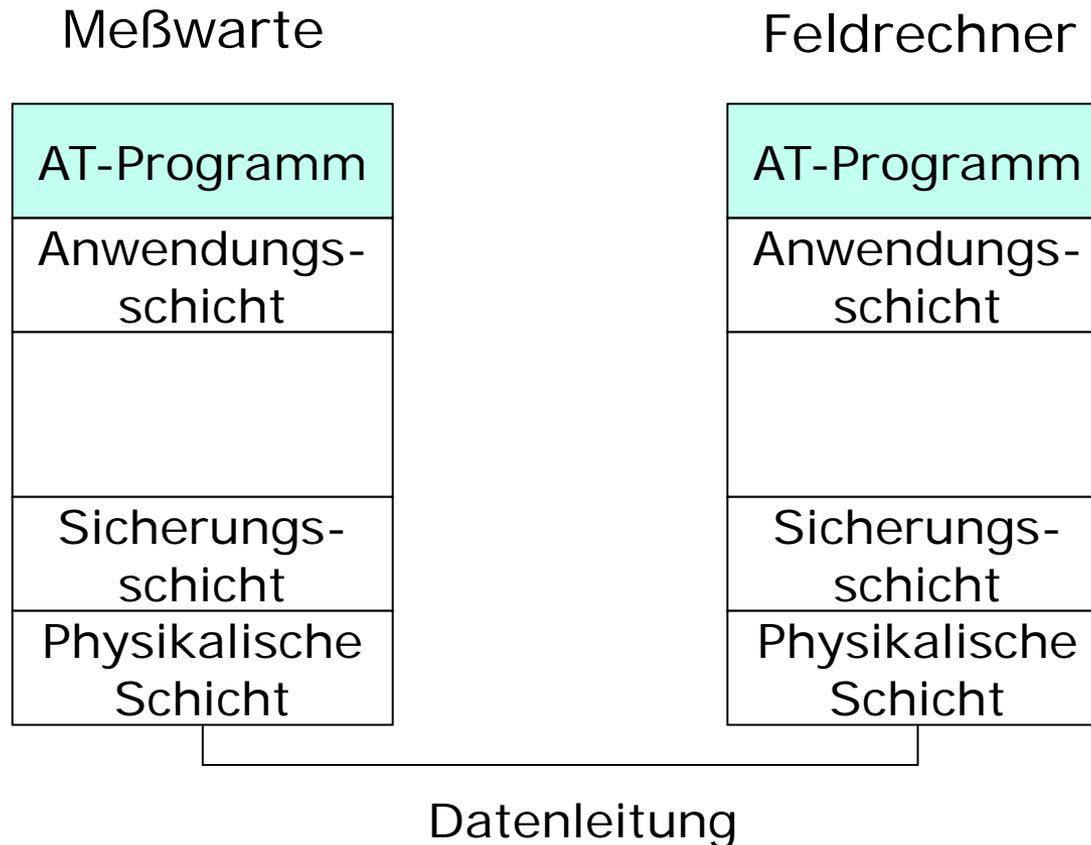
Transportschicht

- Kommunikation zwischen Prozessen
 - Namensgebung für die Rechner (Hosts)
 - Adressierung der Teilnehmer
 - Auf/Abbau von Transportverbindungen
 - Fehlerbehandlung, Flusskontrolle
 - Multiplexing von Datenströmen auf einem Kanal
 - Synchronisation der Hosts
 - Wiederherstellen einer Verbindung bei Fehlern im darunter liegenden Netzwerk
 - Internetworking

Kommunikation zwischen den Schichten

- Jede Schicht bietet der darüberliegenden ihre Dienste an:
 - Schicht N: service provider
 - Schicht N+1: service user
- Dienste sind an ausgezeichneten Zugangspunkten verfügbar: service access points
- Dienstprimitive
 - Anforderung request
 - Anzeige/Indikation indication
 - Antwort response
 - Bestätigung confirmation

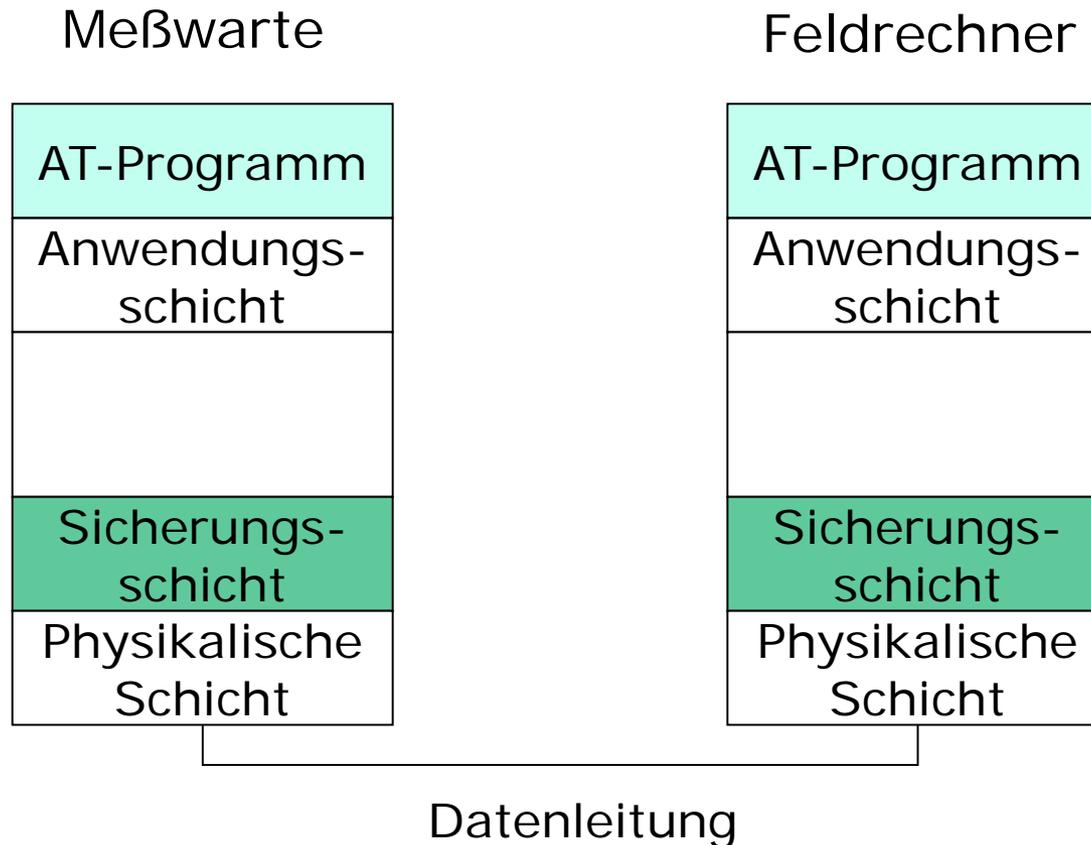
Kommunikation im OSI-Modell





Sicherungsschicht – Zugriffskontrolle und Datensicherung

ISO/OSI-Kommunikationsmodell



Buszugriffsverfahren

- Engl. Media Access Control (MAC)
- zu einem Zeitpunkt darf nur ein Sender auf das gemeinsame Medium zugreifen
- Kontrolliert (deterministisch)
 - Zentrale Bussteuerung : Master/Slave
 - Dezentrale Zuteilung: Tokenbus, Tokenring
- Zufällig
 - Carrier Sense Multiple Access
 - Collision Detection (Ethernet)
 - Collision Avoidance (CAN)

Kontrollierte Buszugriffsverfahren

- Kontrollierte Buszuteilung
 - Sender wird vor Sendebeginn eindeutig bestimmt
- Vergabearten
 - Zentral von einer „Leit“station
 - Dezentral durch mehrere Steuerienheiten
- Echtzeitfähige Kommunikation
 - Definition: Maximale Zeitdauer bis Daten übertragen sind ist berechenbar.
 - Voraussetzung: Zeitraum oder Datenlänge für einen Kommunikationszyklus ist begrenzt.

Master / Slave - Verfahren

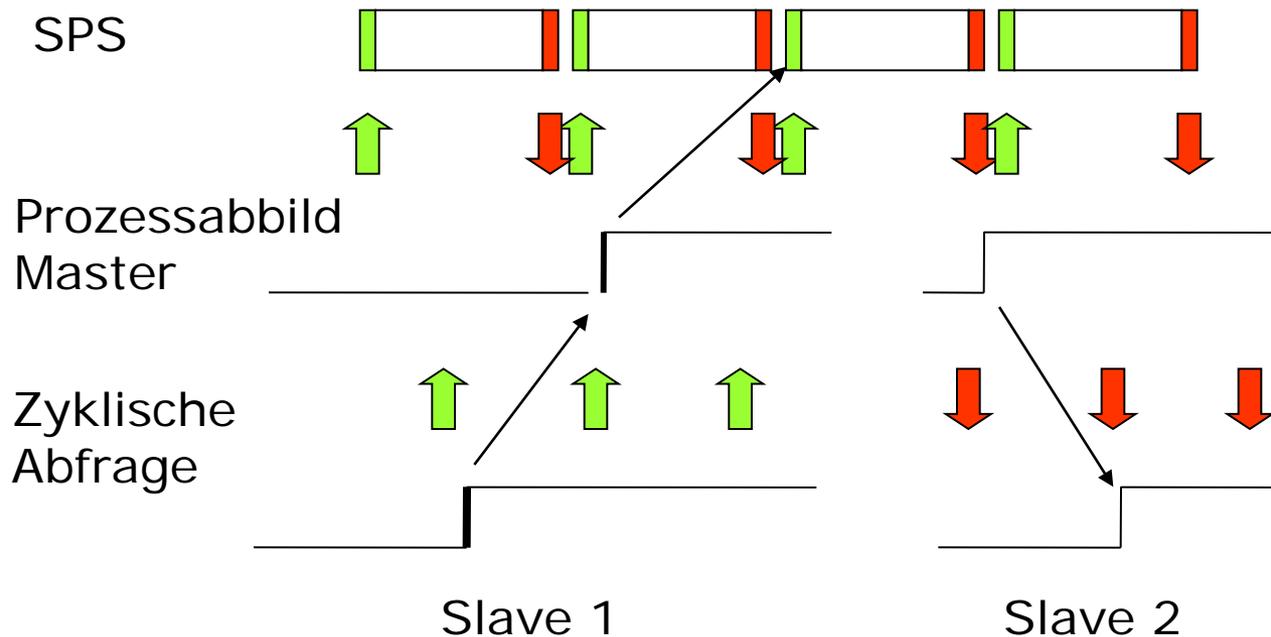
- 1 Master (Bussteuerienheit)
- n Slaves (passiv)
- Kommunikationsablauf:
 - Master stellt Verbindung zu Slave her, Slave antwortet unmittelbar
- Zyklische Abfrage
 - Master führt Prozessabbild durch zyklische Abfrage aller Slaves (Polling)
 - Priorisierung einzelner Slaves durch mehrfache Abfrage innerhalb eines Zyklus

Eigenschaften Master/Slave

- Busanschaltung von Slaves extrem einfach → geringe Kosten
- Ausfall Master → Ausfall jeder Kommunikation
- Worst-Case für Datenaustausch zwischen zwei Slaves
 - Maximale Reaktionszeit = $2 * \text{Buszykluszeit} + 2 * \text{SPS-Zykluszeit}$
- BUS@AT: AS-Interface, Profibus DP
Monomastersystem

Maximale Reaktionszeit

- $2 * \text{Buszyklus} + 2 * \text{SPSzyklus}$

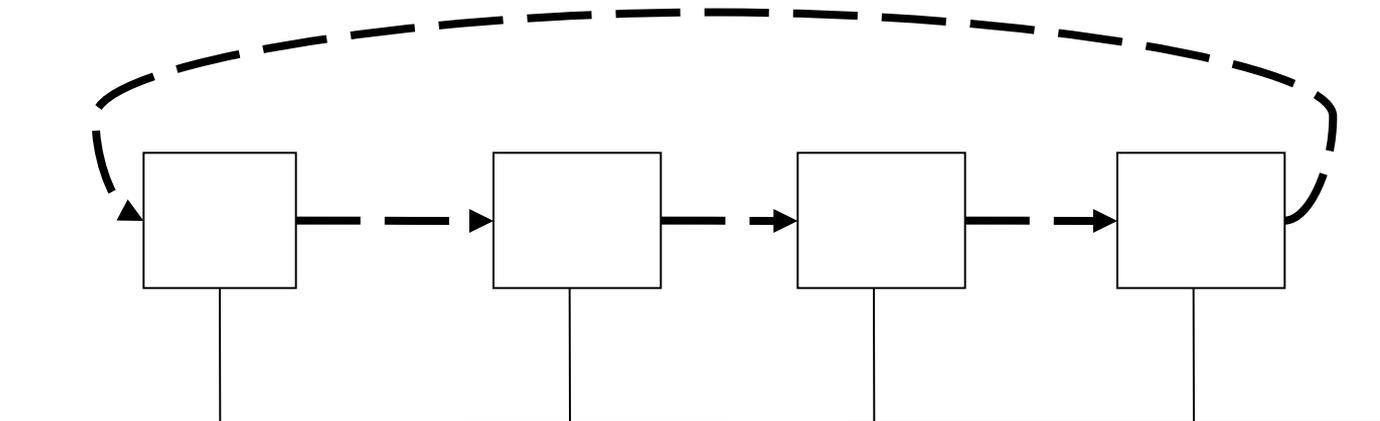


Token-Prinzip

- Alle Teilnehmer können Bussteuerung übernehmen
- Berechtigung zum Buszugriff wird über spezielles Zeichen/Nachricht genau einem Teilnehmer zugeteilt
- Token wird nach Datenübertragung an nächsten Teilnehmer weiter gereicht
- Wenn Zeitdauer des Token-Besitzes deterministisch beschränkt → echtzeitfähig

Token-Bus

- Token-Bus: (IEEE 802.4)
 - Physikalisch Linienstruktur, logisch Ring
 - Token wird über spezifische Nachricht weiter geleitet

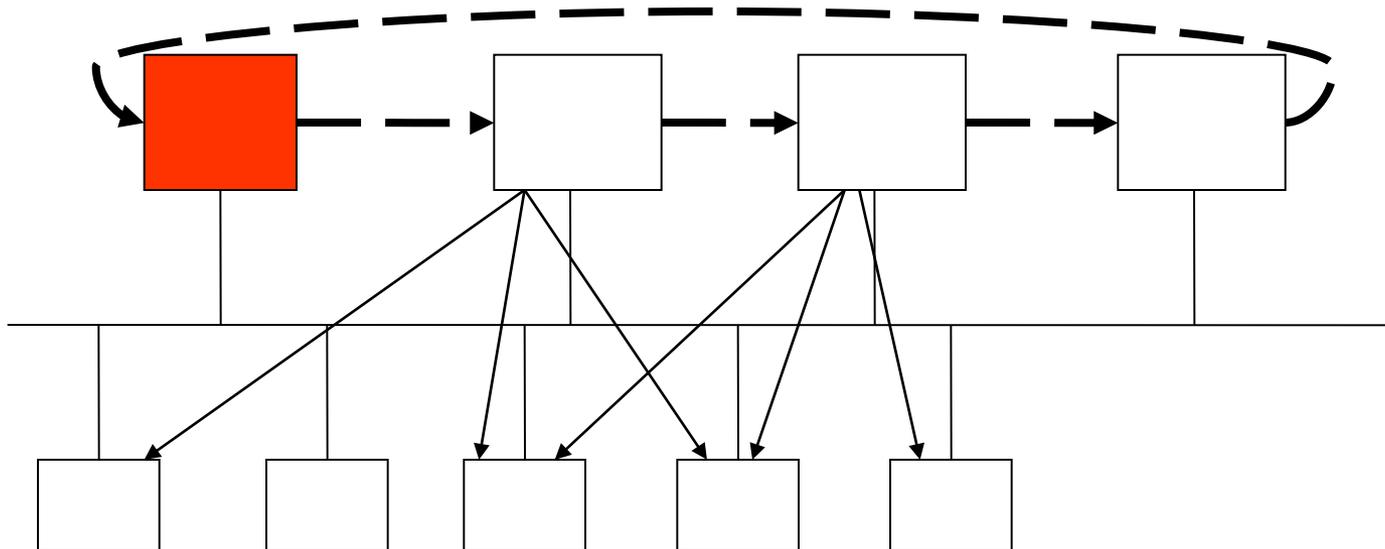


Eigenschaften Token-Bus

- Priorisierungsmöglichkeiten:
 - Mehrfachzuteilung innerhalb eines Zyklus
 - Unterschiedliche maximale Datenmengen
- Überwachungsfunktionen
 - Kein/Mehrere Token: Token erzeugen/löschen
 - Initialisierung
 - Entfernung von Stationen aus dem logischen Ring
 - Aufnahme hinzugekommener Stationen

Token-Passing

- Kombination aus Token-Bus und Master/Slave



Zufällige Verfahren - CSMA

- CSMA
 - Carrier Sense – Sendewilliger Teilnehmer horcht Bus ab und sendet wenn frei
 - Multiple Access – Wenn belegt versucht Teilnehmer zu einem späteren Zeitpunkt wieder zu senden
- Zufälliges Verfahren
 - Sendezeitpunkt nicht bekannt
 - Unbelegtheit des Busses kann nicht garantiert werden
 - Maximale Übertragungszeit kann nicht bestimmt werden
→ nicht echtzeitfähig

Verhalten nach Belegterkennung

- Ethernet
 - Zurückziehen und zufällige Zeit warten
 - Falls Bus erneut belegt, wieder zurückziehen und länger warten
- IEEE 802.3:
 - Senden sofort nach frei werden des Busses
- Was passiert wenn zwei gleichzeitig senden?
 - Nachricht wird zerstört
 - Kollisionserkennung durch Abhören der eigenen Nachricht



Sicherungsschicht: Datensicherung

Störung der Datenübertragung

- Störquellen
 - Elektromagnetische Einstreuungen
 - Rauschen
 - Potentialdifferenzen
 - Alterung der Bauteile
- Digitale Übertragung
 - Störung → (ungewollte) Bitinvertierung

Maßnahmen gegen Störungen

- Technische Vorkehrungen um WS einer Störung zu verringern
 - geschirmte Kabel
 - Glasfaser
 - potentialfreie Übertragung
- Überwachung der Nachricht auf Fehler
 - Fehler erkennen
 - Gegenmaßnahmen treffen
- DIN EN 60870 Fernwirkrichtungen und -systeme - Teil 5: Übertragungsprotokolle; Hauptabschnitt 1: Telegrammformate (IEC 60870-5-1:1990)

Fehlerarten

- Betrachtung transparenter Codes
 - Alle Bitkombinationen erlaubt → Aus Bitkombination kann nicht auf Fehler geschlossen werden
- Fehlerarten
 - Erkennbare und korrigierbare Fehler
 - Erkennbare und nicht korrigierbare Fehler
 - Nicht erkennbare Fehler
- Fehlerkorrektur
 - Relativ selten da kompliziert, häufig einfach Wiederholung der Übertragung

Bitfehlerrate p

- Maß für Störempfindlichkeit des Übertragungskanals

$$p = \frac{\text{Anzahl fehlerhafter Bits}}{\text{Anzahl gesendeter Bits}}$$

- Worst Case: $p = 0.5$
 - $p=1$: jedes Bit fehlerhaft (invertiert) \rightarrow Nachricht bleibt vollständig erhalten
- Mit üblichem technischem Aufwand realisierbar:
 - $p = 10^{-4} \rightarrow$ ca. 1 von 10.000 Bits ist fehlerhaft
 - Bei 10 Bit/Zeichen ca. ein Fehler/Schreibmaschinenseite

Fehlerkorrektur durch Wiederholung

- ARQ: Error Detection with Automatic Request Repeat
 - Keine Änderung der Bitfehlerrate, aber
 - Wahrscheinlichkeit p^* der Störung an der selben Stelle:
 - $p^* = p^a$
 - p – Bitfehlerrate
 - a – Anzahl Übertragungen
- Effektiv und einfach!

Fehlererkennung

- Grundprinzip:
 - Redundante Information → Übertragung von Prüfbits
 - Gemeinsame Berechnungsvorschrift für Prüfbit(s) bei Sender und Empfänger
 - Telegramm: Informationsbits + Prüfbits (+ Synchronisationsbits)
- Zielkonflikt
 - Wieviele Fehler bleiben unerkannt - Restfehlerrate
 - Wieviel Redundanz war dafür notwendig - Telegrammübertragungseffizienz

Restfehlerrate R

- Aussage über die unerkannten Fehler nach Anwendung einer Fehlererkennungsstrategie

$$R = \frac{\text{Anzahl unerkannter fehlerhafter Bitkombinationen}}{\text{Anzahl möglicher Bitkombinationen}}$$

- Maß für Datenintegrität (Unversehrtheit der Daten)
- **Achtung!** Betrachtungseinheiten sind jetzt Codes (Telegramme), nicht mehr das einzelne Bit

Mittlere Zeit zwischen zwei Fehlern T

$$T = \frac{n}{v \cdot R}$$

R: Restfehlerrate

n: Telegrammlänge in Bit

v: Übertragungsgeschwindigkeit in Bit/s

- Anforderungen aus DINEN60870

n=100, v=1200 Baud

R	T	Anwendung
1.00E-05	1 Tag	Zyklisches Auffrischen von Daten
1.00E-09	26 Jahre	Ereignisgesteuerte Übertragung
1.00E-13	260T Jahre	Fernsteuerung

Hamming-Distanz d

- Maß für die Störfestigkeit eines Codes
 - e : Anzahl der sicher erkennbaren Fehler
 - $d = e + 1$
- Beispiel
 - Durch das Bilden eines Paritybits ist **ein** Fehler sicher erkennbar $\rightarrow d = 2$
 - Minimalanforderung an Datenübertragung!
- Übliche Feldbusse:
 - $d \geq 4$
- Feldbusse mit hohen Sicherheitsanforderungen:
 - $d=6$

Zusammenhang mit p und R

- Restfehlerrate R ist Funktion der Bitfehlerrate p
- Hamming-Distanz lässt sich aus $R(p)$ und p berechnen:

$$d = \frac{\lg R(p_1) - \lg R(p_2)}{\lg p_1 - \lg p_2}, p_1 > p_2$$

- Beispiel:
 - $R(10^{-3}) = 10^{-4}$, $R(10^{-4}) = 10^{-6} \rightarrow d = 2$

Telegrammübertragungs-effizienz

- Effizienz = Nutzen / Aufwand

$$E = \frac{\text{fehlerfreie Informationsbits}}{\text{Gesamtzahl übertragener Bits}} = \frac{k \cdot q^n}{n}$$

k: Anzahl Informationsbits / Telegramm

q: WS des Empfangs unverfälschter Bits (1-p)

n: Gesamtzahl ALLER Bits / Telegramm incl.
Synchronisations- und Fehlerprüfbits

Beispiele für $q=10^{-3}$

- UART-Telegramm
 - 1 Startbit, 8 Datenbits, 1 Parität, 1 Stopbit
 - $k=8$, $n=11$
 - $E = 72\%$
- Telegramm mit
 - 8 Startbit, 8 Datenbits, 8 CRC
 - $k=8$, $n=24$
 - $E = 32\%$

Strategien der Fehlererkennung

- Senden zusätzlicher - aus den Informationsbits abgeleiteter - Information
- Paritätsbit
 - Gerade/Ungerade Quersumme der Informationsbits
- Blocksicherung
 - Gerade/Ungerade Quersumme der „Spalten“ mehrerer Codes
- Cyclic Redundancy Check
 - Rest der Division der als Zahl aufgefassten Informationsbits durch ein m-stelliges CRC-Polynom

Paritätsbit

- Algorithmus
 - Sender:
 - Bilde die Quersumme über alle Informationsbits
 - Wenn Quersumme ungerade füge ein Paritätsbit $P=1$ ansonsten $P=0$ hinzu
 - Empfänger:
 - Bilde Quersumme über Informationsbits und Paritybit
 - Wenn Quersumme ungerade Fehler in der Datenübertragung
- Hamming-Distanz
 - Sicher erkannt wird $e = 1$ Fehler
 - Eine gerade Anzahl (2,4, ...) an Fehlern wird nicht erkannt
 - 3,5, ... Fehler werden erkannt, können aber nicht von einem Fehler unterschieden werden

Cyclic Redundancy Code (CRC)

- Algorithmus
 - Sender
 - Die Sequenz der Informationsbits wird (unabhängig von Länge und Bedeutung) als Zahl I aufgefasst.
 - Die Zahl I^* wird durch eine feste Zahl G (das Generatorpolynom) geteilt.
 - Der Rest R wird an die zu übertragende Information angehängt, gesendet wird also IR
 - Empfänger
 - Die empfangene Zahl IR wird durch das gleiche Generatorpolynom G geteilt
 - Bei fehlerfreier Übertragung ist $R=0$
- I^* wird aus I dadurch gewonnen, dass r Nullen an I angehängt werden. R entspricht dem Rang des Generatorpolynoms (Anzahl Stellen Generatorpolynom - 1)

Beispiel

- Nachricht I: 110101
- Generatorpolynom: 1011
- \rightarrow Divisor I^* : 110101000
 - $I^*/G = Q + R/G$
 - $110101000/1011 = 1111011 + 111/1011$
- Sende $I^* + R$: 110101111
- Empfänger
 - $(I^* + R)/G = Q' + R'/G$
 - $110101111 / 1011 = 1111011, R' = 0$
- $R' = 0 \rightarrow$ Fehlerfreie Übertragung

Literaturhinweise

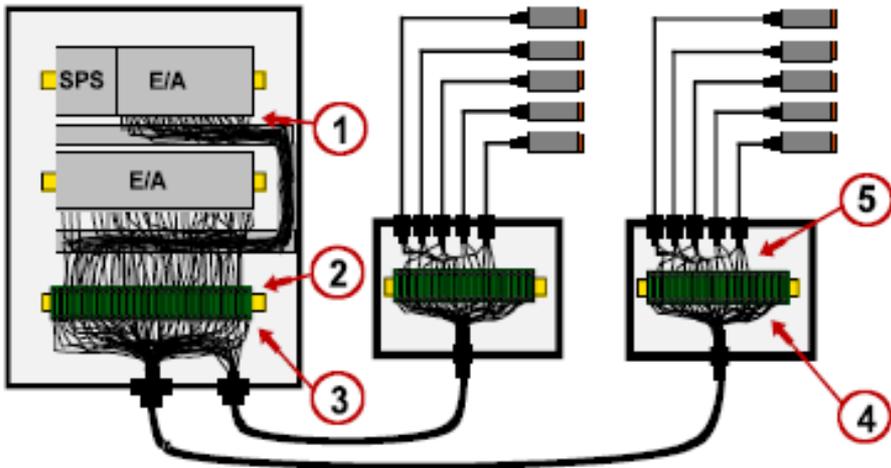
- Schnell, G., & Wiedemann, B. (2006) Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik, 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg
- Kriesel, Heibold, Telschow (1999) Bustechnologien für die Automation.
- Weigemann, J. & Killian, K. (2002)(Hrsg.) Dezentralisieren mit Profibus-DP/DPV1
- Dietrich, D. & Bangemann, Th. (2006) Profibus PA. Instrumentierungstechnologie für die Verfahrenstechnik
- Verhappen, I. & Pereira, A. (2002) Foundation-Fieldbus: A Pocket Guide
- EN 60870 Fernwirkleinrichtungen und –systeme
 - Teil 5: Telegramme
 - Teil 6: Internationale Protokolle (IEC 870-6)
- EN 61158 Digitale Datenkommunikation in der Leittechnik – Feldbus für industrielle Leitsystem
- EN 61784 Digitale Datenkommunikationen in der Leittechnik -
- NE 105 Anforderungen an die Integration von Feldbusgeräten in Engineering-Tools für Feldgeräte



Beispiel Aktor Sensor Interface (ASi)

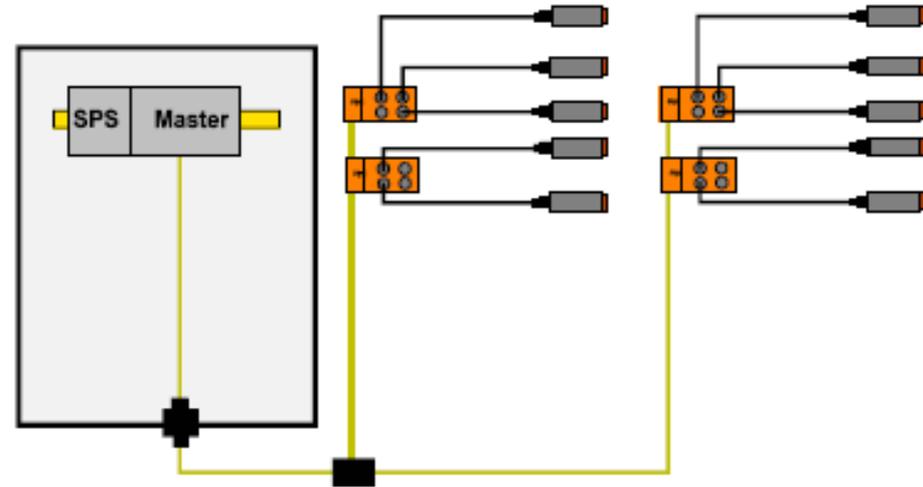


- Direkter, verpolsicherer Anschluss von Sensoren/Aktuatoren und Modulen an jeder beliebigen Stelle bis Schutzart IP67 ohne Ablängen und Abisolieren.
- Kein Leitungsschirm, keine Leitungsterminatoren, trotzdem große Störsicherheit
- Kostengünstige und einfache Anbindung vorwiegend binärer Signale an existierende Feldbusse oder direkt an die Steuerung.
- Möglichst keine Beschränkungen der Struktur.
- Ersatz von E/A-Karte und Kabelbaum



- (1) EA-Karten
- (2) Rangierklemmen
- (3) Kabelbaum
- (4) Unterverteiler
- (5) Sensoranschlüsse

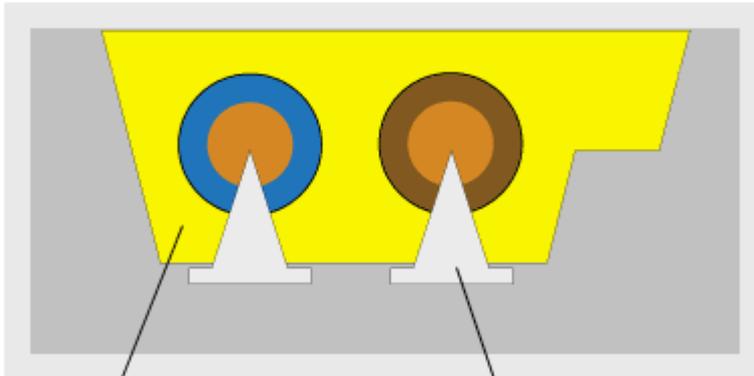
Konventionelle Verdrahtung



Verdrahtung mit AS-Interface



AS-Interface Elektromechanik



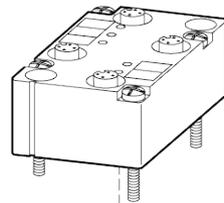
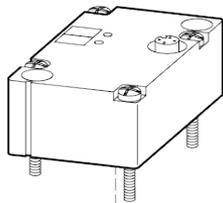
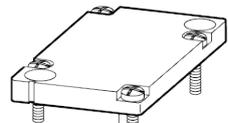
Verporsichere Flachleitung

Durchdringungsdorne

Deckel

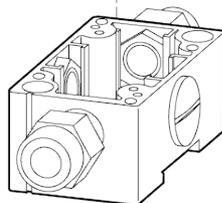
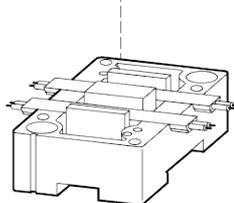
Passives Sensormodul

Aktives Sensor/
Aktuormodul E/A-Modul



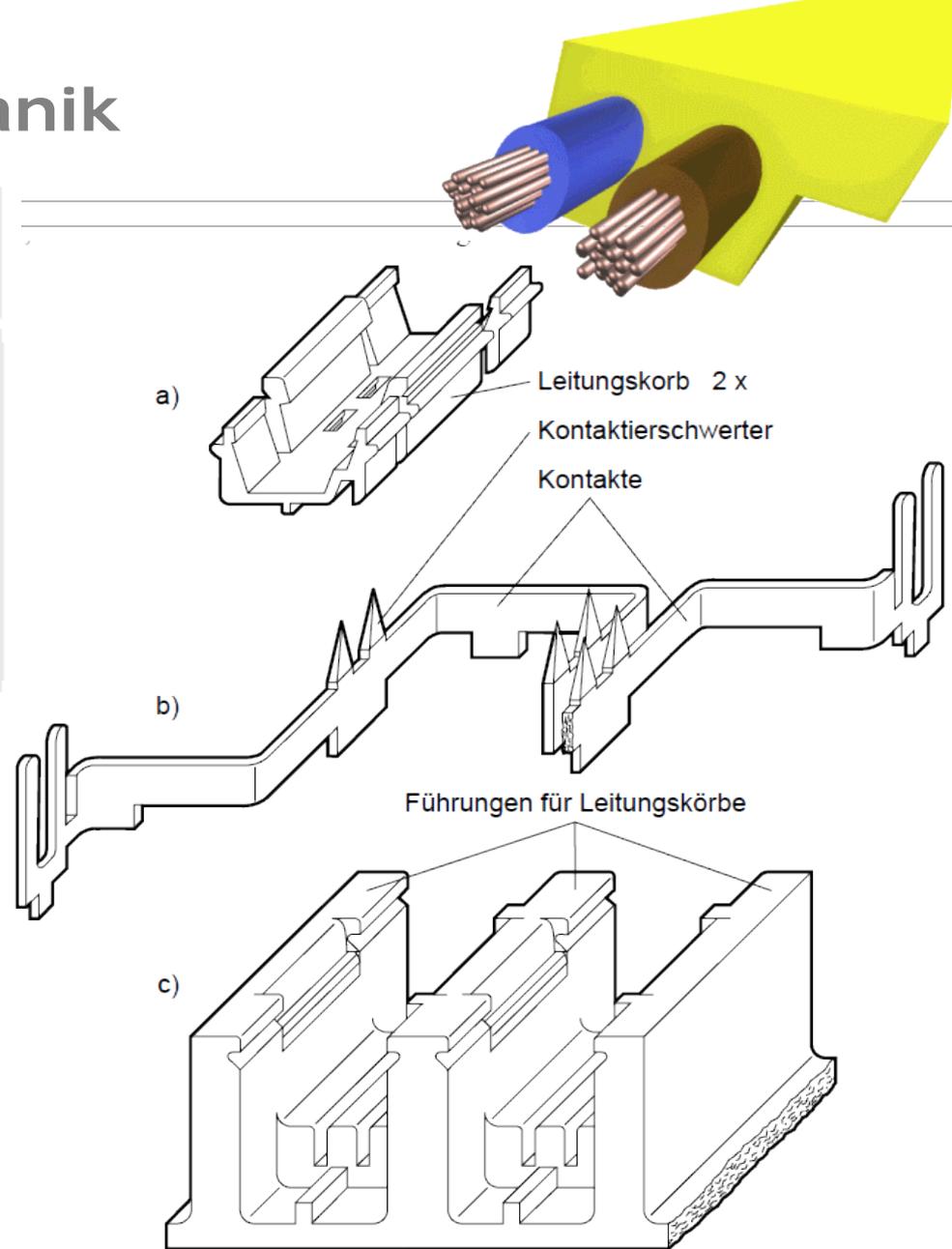
Anwender-
Module

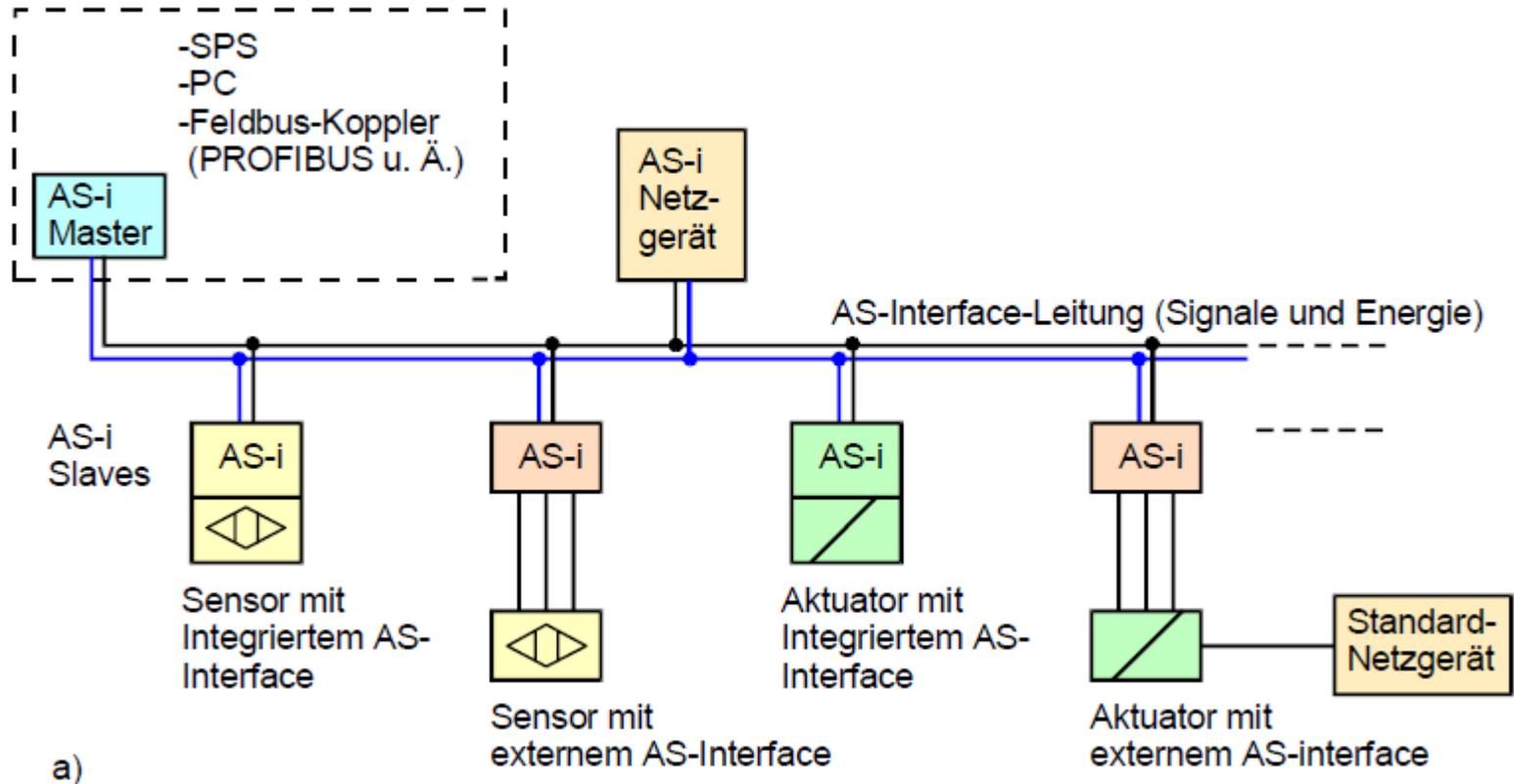
Koppel-
Module



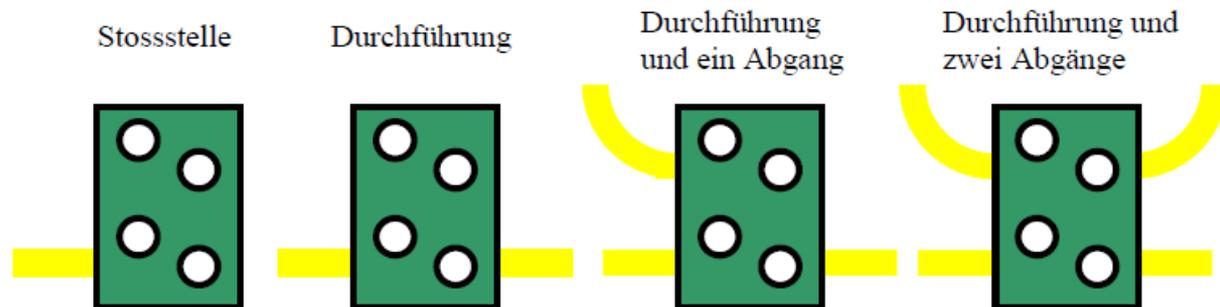
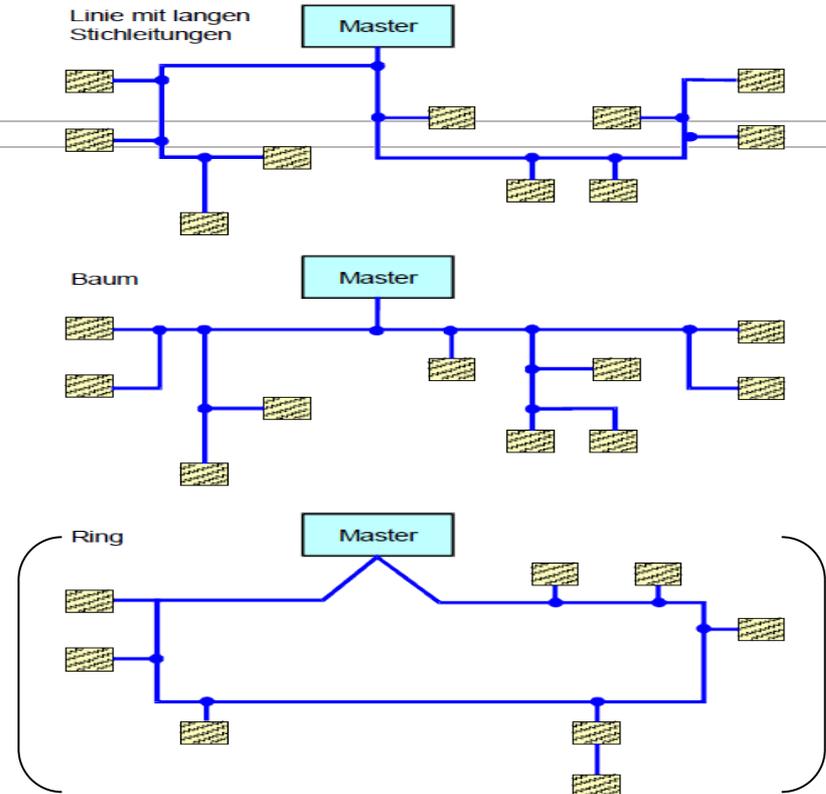
Flachkabelmodul

PG-Schraubmodul



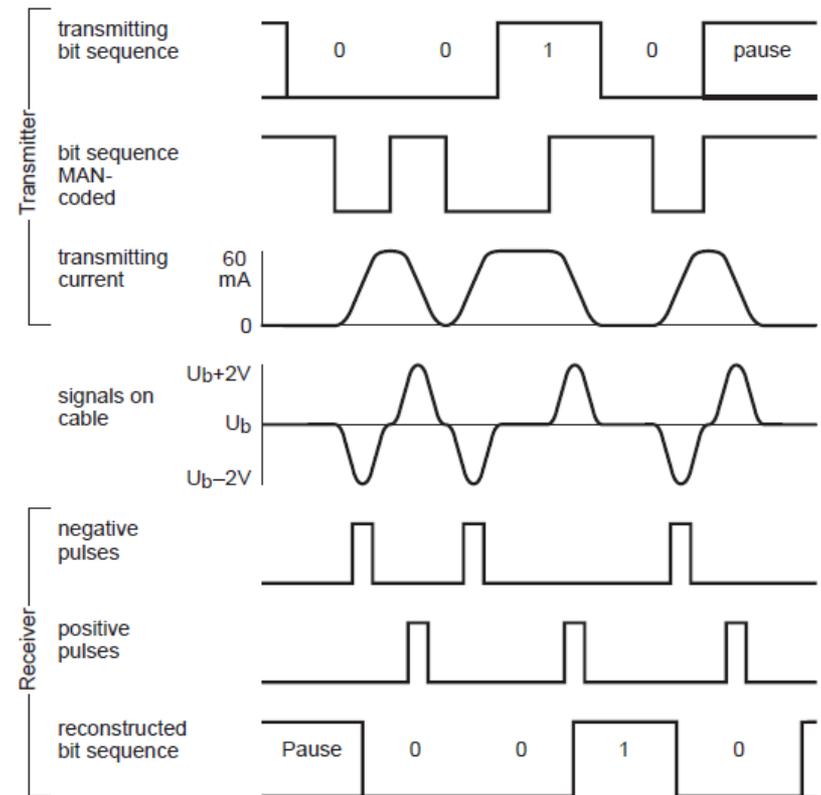


- Beliebige Strukturen
 - Baum, Linie
 - Ring technisch möglich aber nicht in Norm!
- Gesamtkabellänge < 100 Meter
- Bis zu zwei Repeater -> 300m



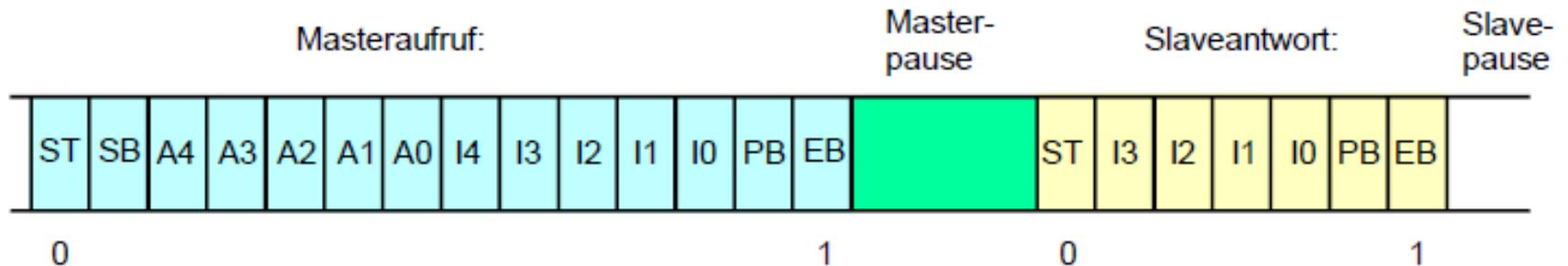


- APM – Alternierende Puls Modulation
- Phasenumtastung (MAN)
- Sendestrom + Induktivität = Signalspannung
- Dekodierung und Rekonstruktion im Empfänger





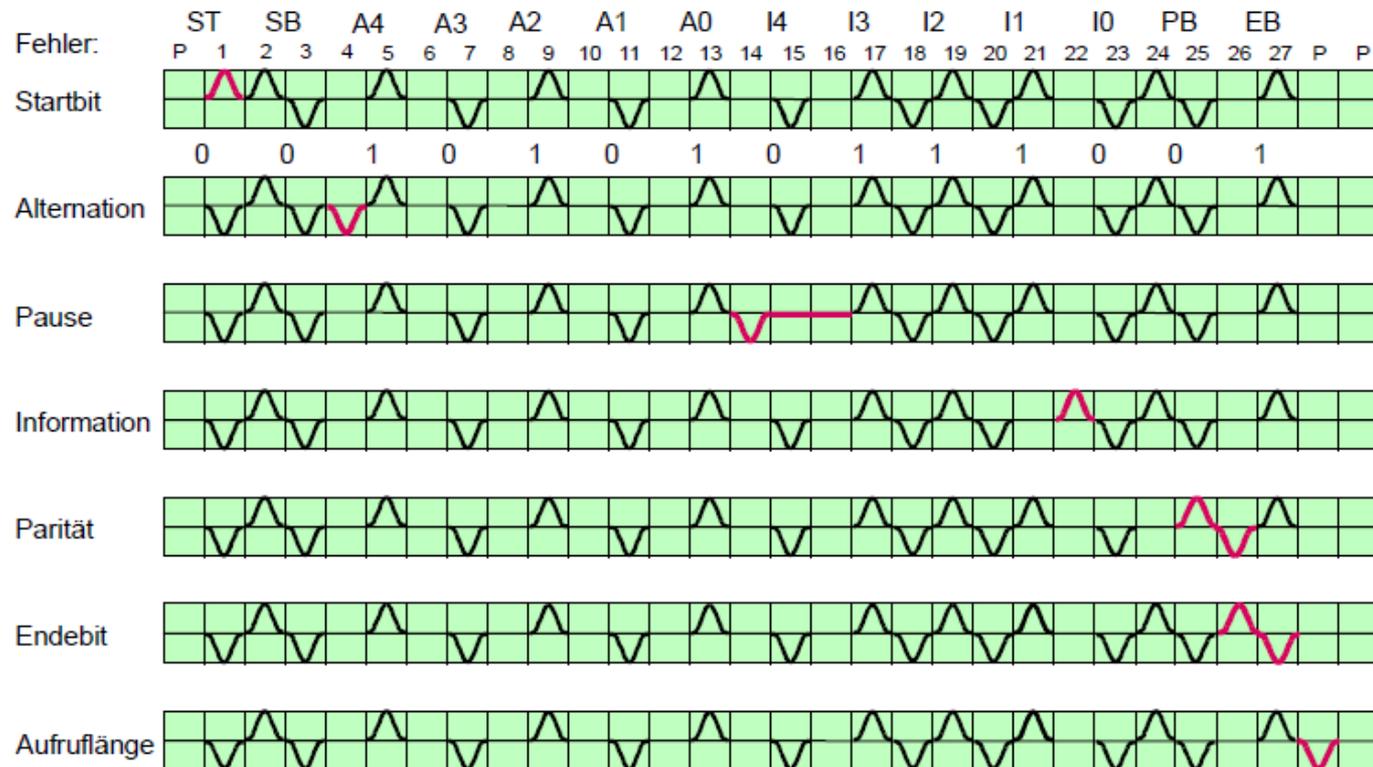
- Übertragungsrate 167 kbit/s □ Bitzeit 6 μ s
- Masteraufruf 14 Bit, Masterpause: 2-10 Bit, Slaveantwort 7 Bit, Slavepause: 2 Bit



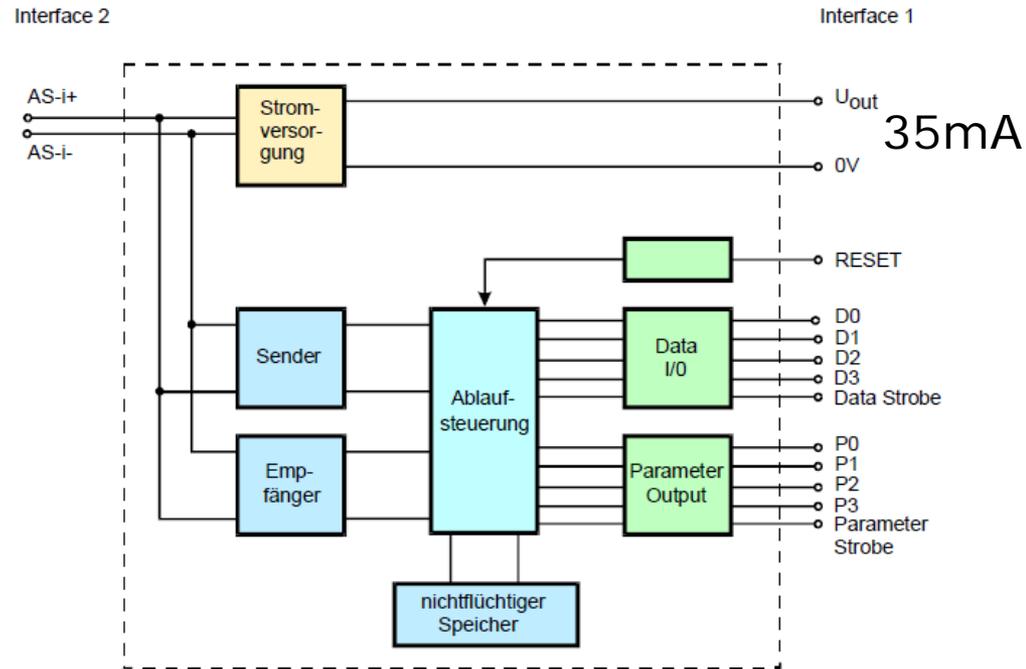
ST Startbit
SB Steuerbit
A4...A0 Adresse des Slaves (5 bit)
I4...I0 Informationsteil von Master an Slave (5 bit) , davon nur 4 als IBit genutzt
und von Slave an Master (4 bit)
PB Paritätsbit
EB Endbit

- Master/Slave Zyklus 25-33 Bit/MS (150-198 μ s)
- Zykluszeit abhängig von Anzahl Slaves:
 - Bei ca. 150 μ s und 31 Slaves:
Zykluszeit = 4743 μ s ~ **5 ms**
- Protokolleffizienz:
 - $E = \text{Nutzdaten/Übertragene Daten} = 8/25 = 32\%$
- Bei Störungen werden einzelne Telegramm vom Master sofort genau einmal wiederholt
 - Nach drei aufeinanderfolgenden Störungen wird Slave aus der Kommunikationsliste genommen

- Nutzung von Redundanzen im Code und fester Länge der Telegramme \square HD=5



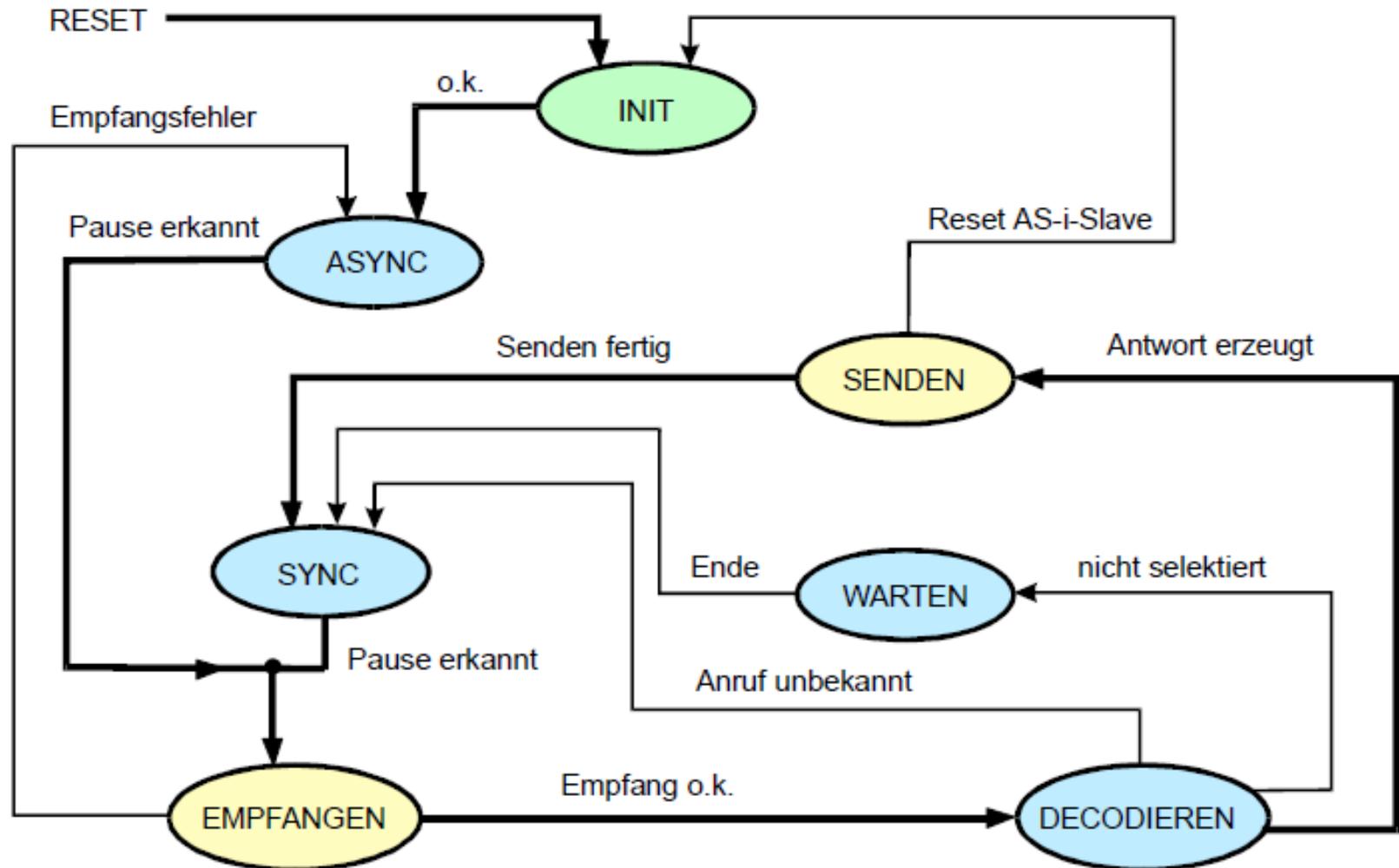
- Slave-Koppelelektronik als ASIC
- Hersteller AMS, AMI
- Register:
 - Adressregister (5)
 - E/A-Konf.Reg. (4)
 - ID-Code.Reg. (4)
 - Datenausgabe (4)
 - Parameterausgabe
 - Empfangsreg. (12)
 - Sendereg. (5)
 - Statusreg. (5)





- Datenaustausch
 - Setzen von Ausgängen, lesen von Eingängen
- Parameterschreiben
 - Setzen der Parameterausgänge des Slaves
- Adresse zuweisen
 - Setzen der Adresse eines Slaves mit Adresse 00H
- Reset AS-Interface Slave
 - Grundzustand herstellen
- Betriebsadresse löschen
 - Löschen der Adresse
- E/A-Konfiguration lesen
 - Dient mit ID-Code lesen zur eindeutigen Identifizierung
- ID-Code lesen
 - Dient mit E/A-Konfiguration lesen zur eindeutigen Identifizierung
- Status lesen
 - Auslesen des Statusregisters
- Status lesen und löschen
 - Auslesen und löschen des Statusregisters

Zustandsdiagramm der Ablaufsteuerung im Slave



- Funktionstest
- Einbinden des AS-Interface-Masters in des Anwenderprogramm der SPS
- Hardware-Test des Netzes mit SPS
- Programmtest mit SPS-Software
- Automatische Adressierung von AS-Interface-Teilnehmern

- <http://www.as-interface.com/>
- Kriesel, Madlung (1999)(Hrsg.) AS-Interface – Das Aktuator-Sensor-Interface für die Automation. München: Hanser



Beispiel Profibus DP/PA



Historie PROFIBUS

- **1987:** Start der PROFIBUS-Entwicklung (PROFIBUS FMS)
- **1993:** Spezifikation des einfachen und schnellen PROFIBUS DP (Decentralized Peripherals)
- **1995:** Erweiterung der PROFIBUS-Physik um eine Variante für gleichzeitige Kommunikation und Speisung (PROFIBUS PA)
- **1997:** Applikationsprofil PROFIdrive: Geräteverhalten und Zugriffsverfahren auf Antriebsdaten von drehzahl-veränderbaren elektrischen Antrieben am PROFIBUS
- **1998:** Applikationsprofil PA Devices: Eigenschaften, Leistungsmerkmale und Verhaltensweisen für Geräte bestimmter Geräteklassen (z.B. Druck, Temperatur oder Durchfluss)
- **1999:** Applikationsprofil PROFIsafe: PROFIBUS-Kommunikation zwischen Sicherheitssteuerungen und sicherheitsgerichteten Geräten für sicherheitsgerichtete Automatisierungsaufgaben bis KAT4 nach EN954, AK6 oder SIL3 nach IEC 61508

Standardisierung

- **1991**: nationale Norm DIN 19245
- **1996**: Europäische Norm EN 50170.
- Seit **1999** Integration in den internationalen Normen IEC 61158 und 61784
- IEC 61158 - Digital data communication for measurement and control - Fieldbus for use in industrial control systems
 - Part 2: Physical layer specification and service definition
 - Part 3: Data link service definition
 - Part 4: Data link protocol specification
 - Part 5: Application layer service definition
 - Part 6: Application layer protocol specification
- IEC 61784 - Digital data communications for measurement and control
 - Part 1: Profile sets for continuous and discrete manufacturing relative to fieldbus use in industrial control systems

61784 / 61158 / 50170 / 50254

Zusammenhang zwischen den Kommunikations- und Protokollfamilien nach DIN EN 61784, Protokollen nach den Normen der Reihe DIN EN 61158, DIN EN 50170 und DIN EN 50254

Kommunikationsprofilfamilie nach DIN EN 61784-1 ¹⁾	beschrieben in Abschnitt der DIN EN 61784-1	Kommunikationsprofil nach DIN EN 61784-1	zugehörige Typen nach DIN EN 61158-2, DIN EN 61158-6	war enthalten in
1 Foundation Fieldbus	5	1/1 H1	1,9	DIN EN 50170/A1
1 Foundation Fieldbus	5	1/2 HSE (High Speed Ethernet)	5	-
1 Foundation Fieldbus	5	1/3 H2	1,9	-
2 ControlNet	6	2/1 ControlNet	2	DIN EN 50170/A3
2 ControlNet	6	2/2 EtherNet/IP	2	-
3 Profibus	7	3/1 asynchrone Übertragung	3	DIN EN 50170/2 DIN EN 50254
3 Profibus	7	3/2 synchrone Übertragung	3	DIN EN 50170/2 DIN EN 50254
3 Profibus	7	3/3 ISO/IEC 8802-3 (ProfiNet)	10	-
4 P-NET	8	4/1 EIA 485	4	DIN EN 50170/1
4 P-NET	8	4/2 RS 232	4	DIN EN 50170/1
5 World-FIP	9	5/1, 5/2, 5/3	1,7	DIN EN 50170/3 und DIN EN 50254
6 INTERBUS	10	6/1, 6/2, 6/3	8	DIN EN 50254
7 Swift-Net		7/1, 7/2	6	-

Verschiedene Ausprägungen

Profibus PA

(Prozessanschluss)

- 2-Drahttechnik (Bus Powered)
- Kurze Kommunikationszeiten (> 10 ms)
- Linien- oder Baumstruktur mit Segmentkabel­längen bis 1.900 m
- Einfache Sensoren & Aktoren
- FISCOModell für Ex-Bereich

Profibus FMS

- Subset von MMS (nicht mehr aktuell?)

Profibus DP

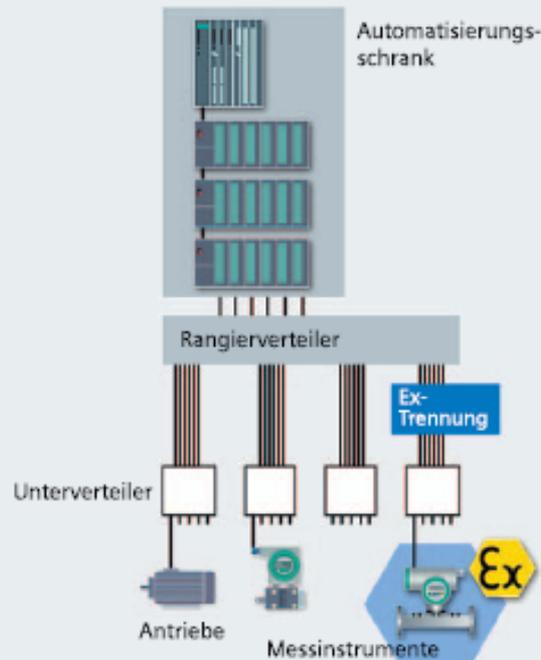
(Dezentrale Peripherie)

- Hohe Datenübertragungsraten (< 12 Mbit/s) und
- kurze Reaktionszeiten (> 1 ms)
- intelligente Feldgeräte und dezentrale Peripheriegeräte
- Linien-, Baum-, Sternstrukturen bis max. 10 km

Anwendungsbereich

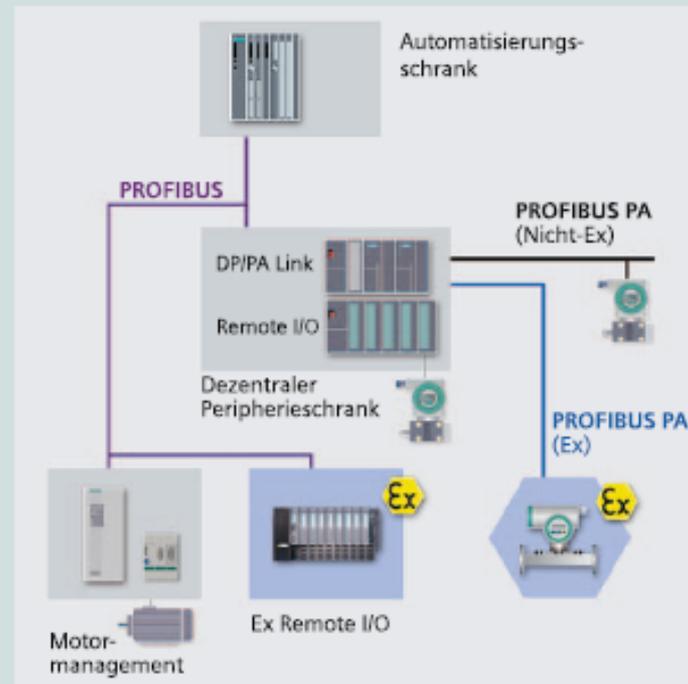
Aufbautechnik

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

*Siemens,
2005*

Übersicht

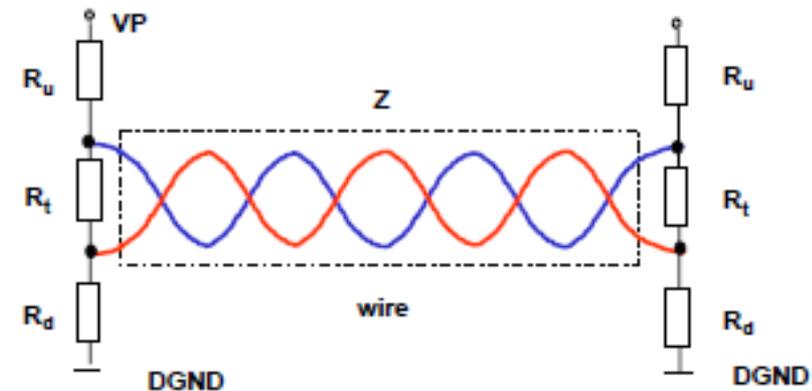
- Profibus DP
 - Physikalische Schicht
 - Komponenten und Strukturen
 - Telegramme
 - Multimaster-Betrieb
 - Zyklischer Datenaustausch
- Profibus PA
 - Physikalische Schicht
 - Eigensichere Busanschaltung
 - Profibus PA Segmentkoppler

Profibus DP: Physikalische Schicht

- RS485
 - symmetrische 2-Drahtleitung
 - max. 32 TN/Segment, max. 3 Repeater zwischen 2 Stationen, max. 126 TN
 - Aktiver Abschlusswiderstand an **beiden** Enden!
 - SUB-D 9 Stecker oder Klemme
 - 3: RxD/TxD-P
 - 8: RxD/TxD-N
 - 5: DGND
 - 6: VP (5V)
 - NRZ-Kodierung
- RS485-iS (für Ex-Bereiche)
- Lichtwellenleiter
 - Kunststoff < 50m
 - Glasfaser < 1 km

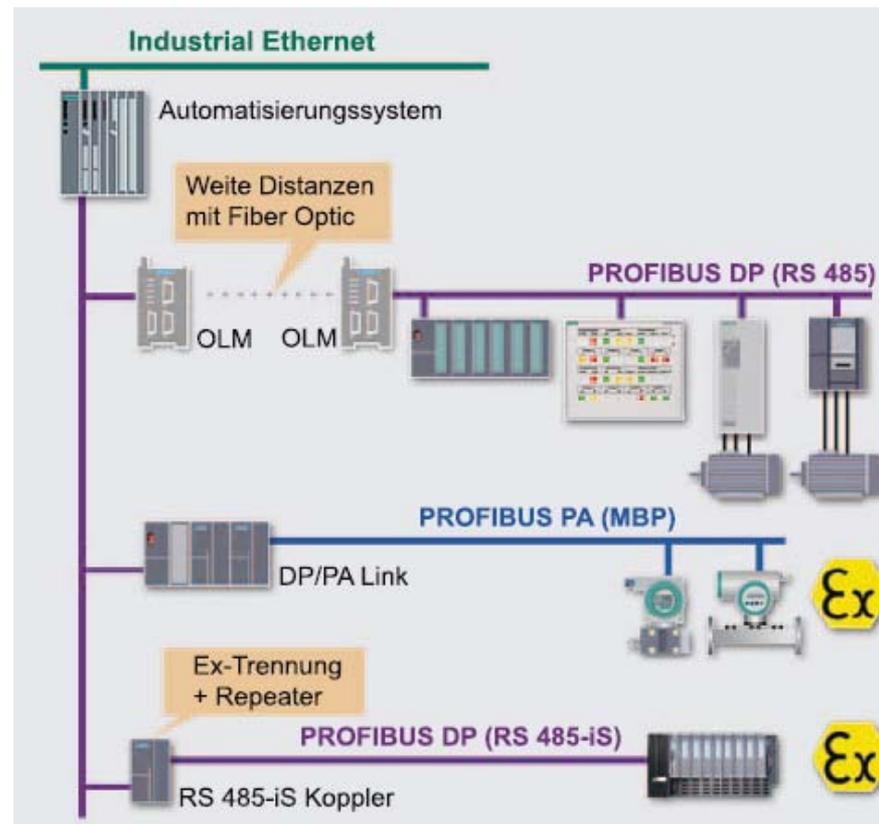
Übertragungsrate [kbit/s]	Länge [m]	Topologie
9,6; 19,2; 93,75	1200	Linie, Stichleitung
187,5	1000	Linie, Stichleitung
500	400	Linie, (Stichleitung)
1500	200	Linie, keine Stichleitung
12000	100	Linie, keine Stichleitung

(Wollschlaeger 2005)



(Wollschlaeger 2005)

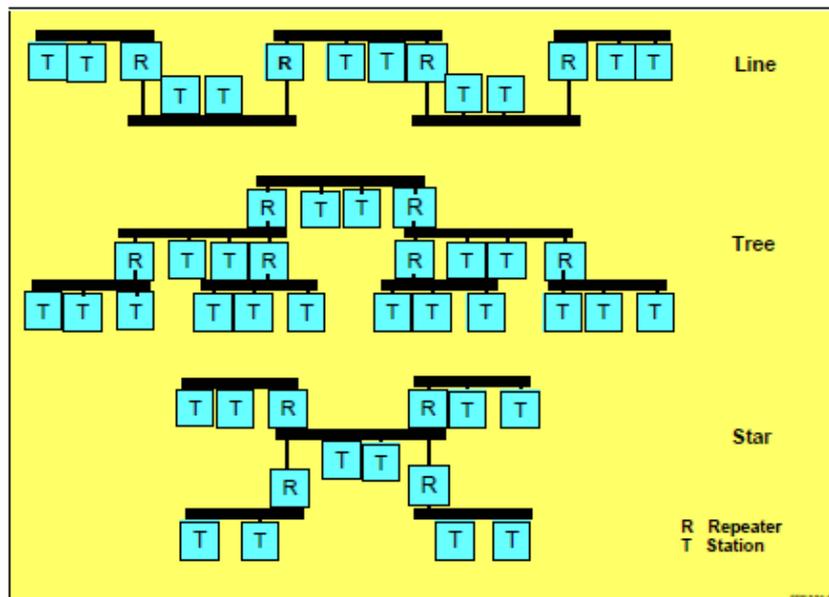
Komponenten



(Siemens 2005)

Strukturen

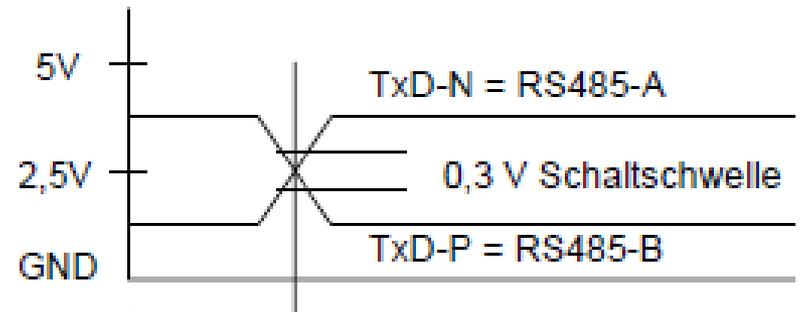
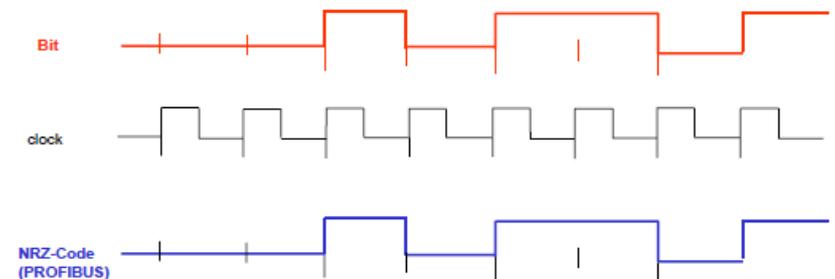
- Line, Baum, Stern mit kurzen Stichleitungen
- Maximal 3 Repeater zwischen zwei TN



(Wollschlaeger 2005)

Bitübertragung

- NRZ: No Return to Zero
- Ausgewertet wird die Differenzspannung zwischen den Leitungen TxD-N und TxD-P
- 1: $-0.3 > U_D > -6 \text{ V}$
AND
TxD-P > TxD-N
- 0: $+0.3 < U_D < 6 \text{ V}$
AND
TxD-P < TxD-N



(Wollschlaeger 2005)

Schicht 1 Telegramme – RS485 UART



ST: Start bit, always binary 0

2^0 - 2^7 : Information significant bits, binary 0 or binary 1

P: Parity bit , even parity (binary 1 have to be a even number)

SP: Stop bit, always binary 1

Bit Synchronizing:

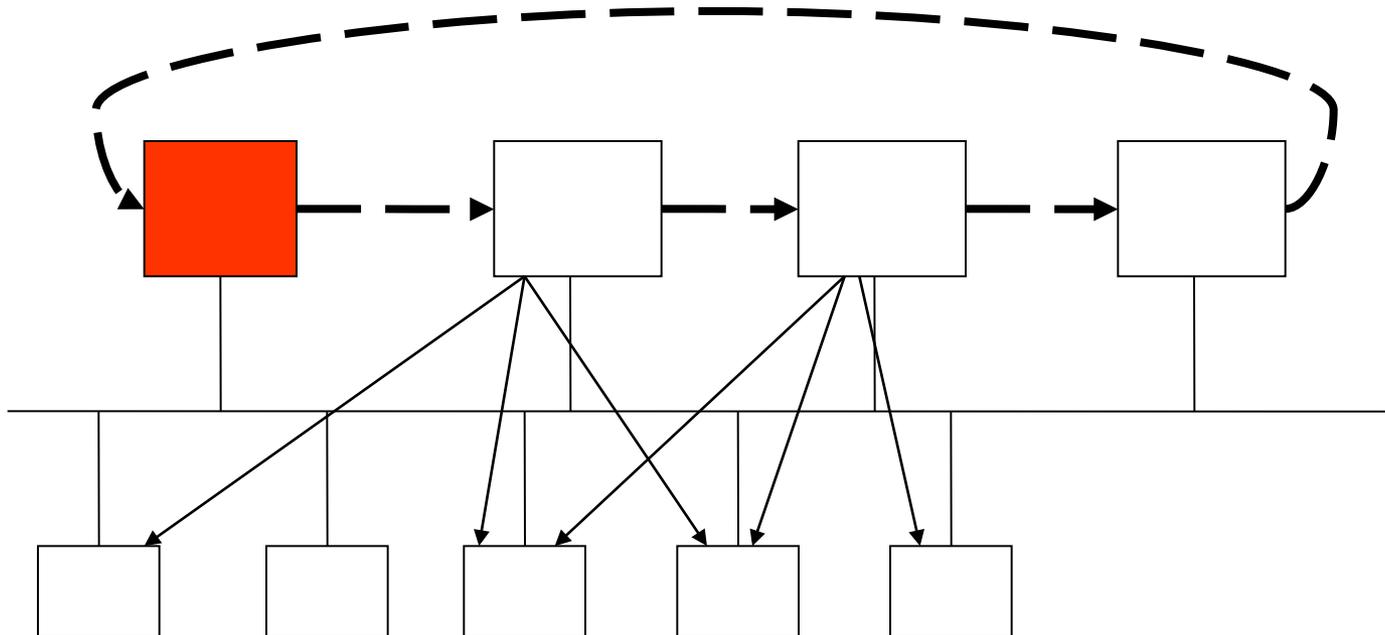
starts always with falling edge of the start bit and ends with the stop bit

+/- 0,3% maximum deviation of the nominal signalling rate for transmission and receipt is allowed

(Wollschlaeger 2005)

Hybrides Buszugriffsverfahren

- Buszugriffsberechtigung für Aktive Teilnehmer (Master) über Token Passing
- Master/Slave Kommunikation während Tokenhaltezeit



Datenübertragungsdienste

- SDN: Send Data with No Acknowledge
 - Unquittierte Nachrichten, Broadcast/Multicast
- SDA: Send Data with Acknowledge
 - Empfang von Daten wird quittiert
- SRD: Send and Request Data
 - Sowohl Aufruf als auch Antwortteil enthalten Daten
- CSRD: Cyclic Send and Request Data
 - Zyklisches Polling zum Update eines lokalen Abbilds anhand Pollliste soweit Tokenhaltezeit erlaubt.
 - wesentliches Kommunikationsmittel im Profibus-DP
- Anforderer eines Dienstes ist IMMER der Teilnehmer im Tokenbesitz!

Schicht 2 - Telegramme

□ SD1 Request-FDL-Status Telegramm ohne Daten

SD	DA	SA	FC	FCS	ED
10h	x	x	x	x	16h

□ SD2 Telegramm mit variabler Datenlänge

SD	LE	LEr	SD	DA	SA	FC	DSAP	SSAP	DU	FCS	ED
68h	x	x	68h	x	x	x	x	x	...	x	16h

□ SD3 Telegramm mit fester Datenlänge

SD	DA	SA	FC	DU	FCS	ED
A2h	x	x	x	...	x	16h

□ SD4 Token-Telegramm

SD	DA	SA
DC1h	x	x

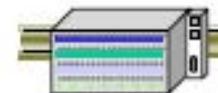
Kurzquittung

E5h

(Wollschlaeger 2005)

DP-Teilnehmer

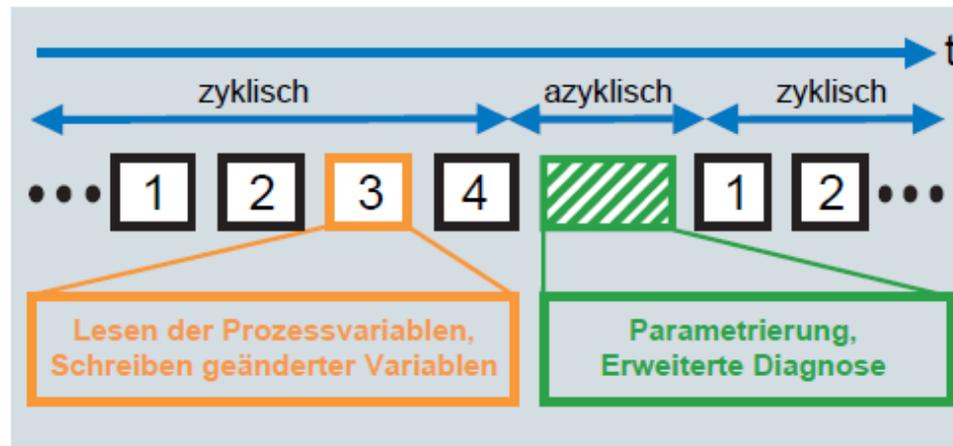
- **DP-Master Klasse 1 (DPM1)**
 - Zentrale Steuerung, die Daten mit den dezentralen E/As (DP-Slaves) austauscht
 - Mehrere DPM1 sind erlaubt, typische Geräte sind SPS, PC, CNC
- **DP-Master Klasse 2 (DPM2)**
 - Projektierungs-, Überwachungs- oder Engineering-Werkzeug, das zur Inbetriebnahme oder Parametrierung/Überwachung der DP-Slaves dient
- **DP-Slave**
 - Dezentrales Gerät mit direkter Schnittstelle zu den Ein-/Ausgabesignalen
 - Typische Geräte sind E/As, Antriebe, Ventile, Bediengeräte...



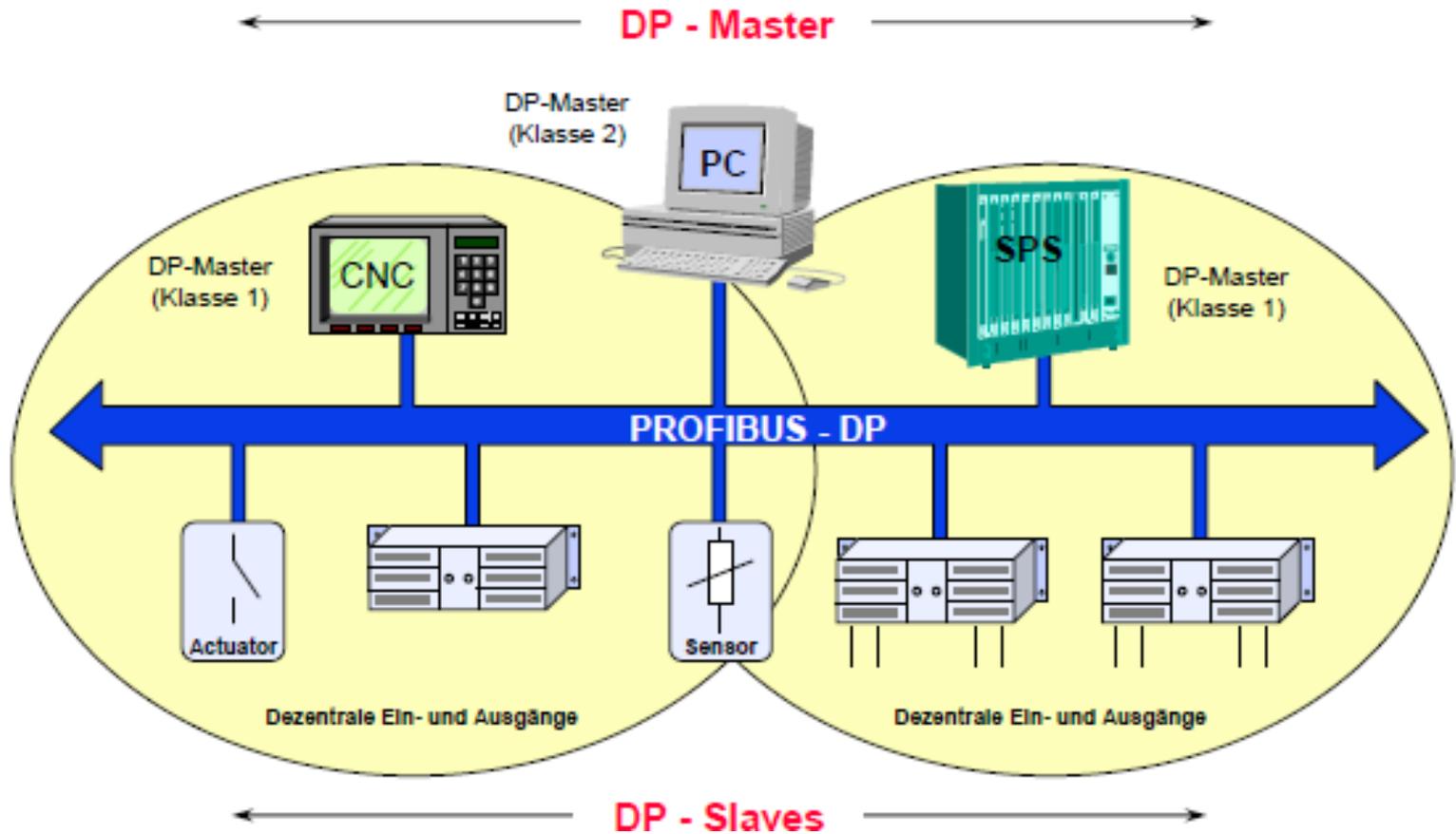
(PNO 2004)

Deterministische Kommunikation

- Zyklische Dienste (CSR, DP-Master Klasse 1)
 - Lesen und Schreiben des Prozessabbilds der Steuerung
- Azyklische Dienste (SDA, SRD, DP-Master Kl. 1 & 2)
 - Parametrierung und Diagnose



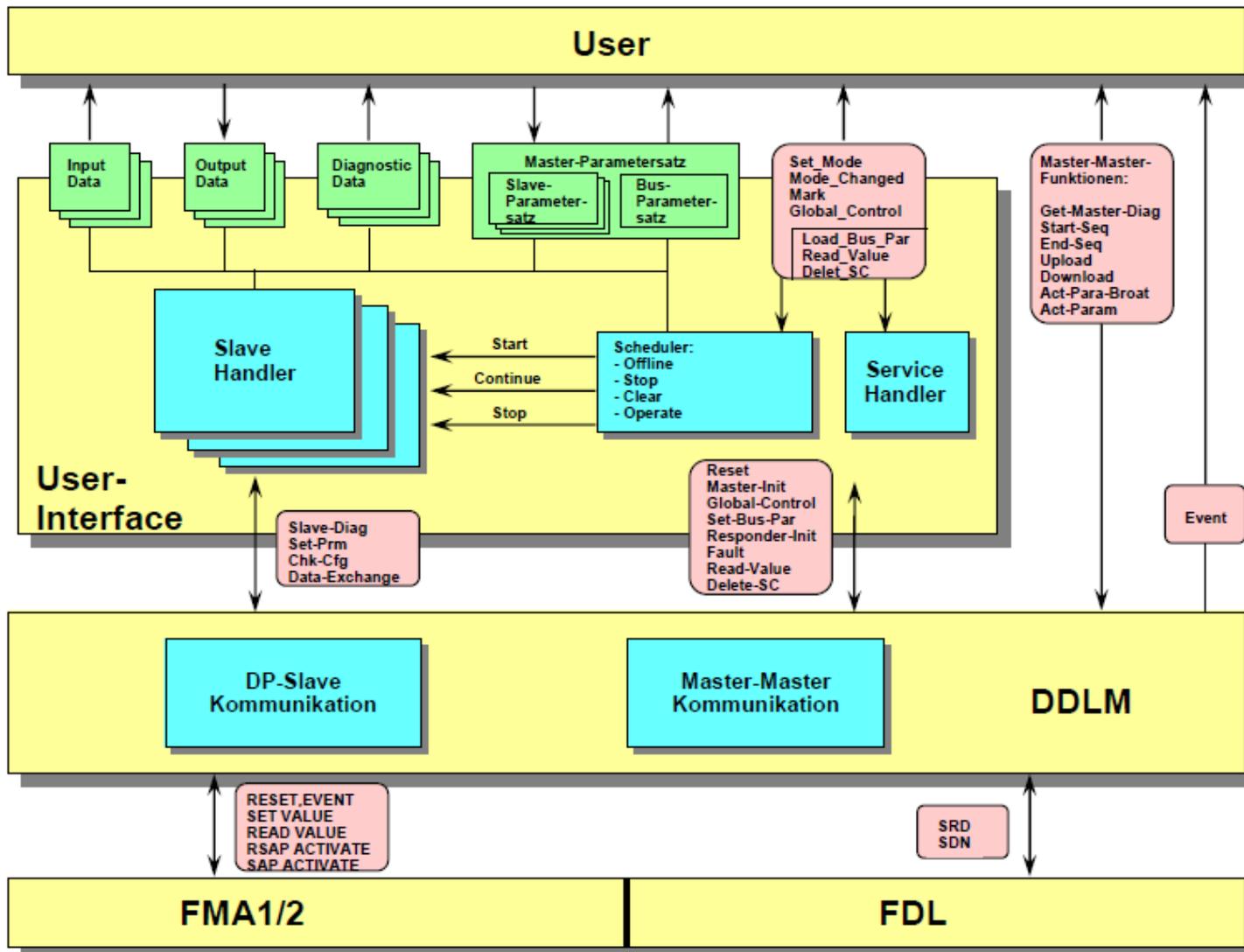
(Siemens 2005)



(PNO 2004)

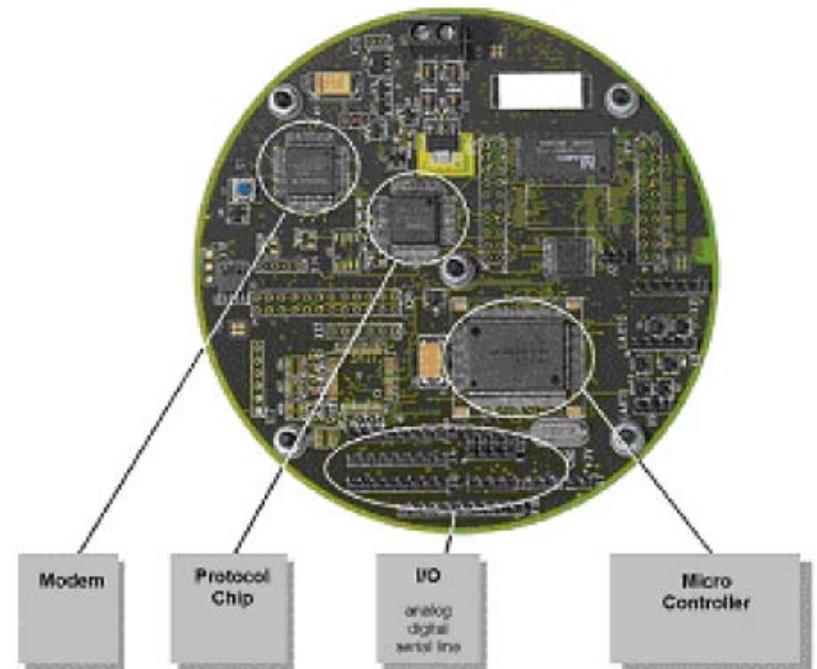


Aufbau DP-Master



Aufbau Profibus DP Slave

- Kleine Stückzahlen:
Schnittstellenmodule als
Aufsteckkarten mit
kompletter Slavelogik
- Große Stückzahlen: Spezielle
Chips
 - Protokollchips zum Anschluss
an μC
 - ASIC mit μC und
Protokollchips
- www.profibus.com/productguide.html





Profibus PA



Profibus PA

- Profibus DP im Ex-Bereich schwierig, Wunsch nach 2-Drahttechnik mit Datenübertragung und Energieversorgung auf einer Leitung und günstigere Ankopplung und transparenter Anbindung an Profibus DP → Profibus PA
- Pneumatischen Aktoren, Magnetventilen und Sensoren für Mess- und Analyseaufgaben in Umgebungen bis Ex-Zone 0 oder 1
- Anbindung an Profibus DP → Segmentkoppler

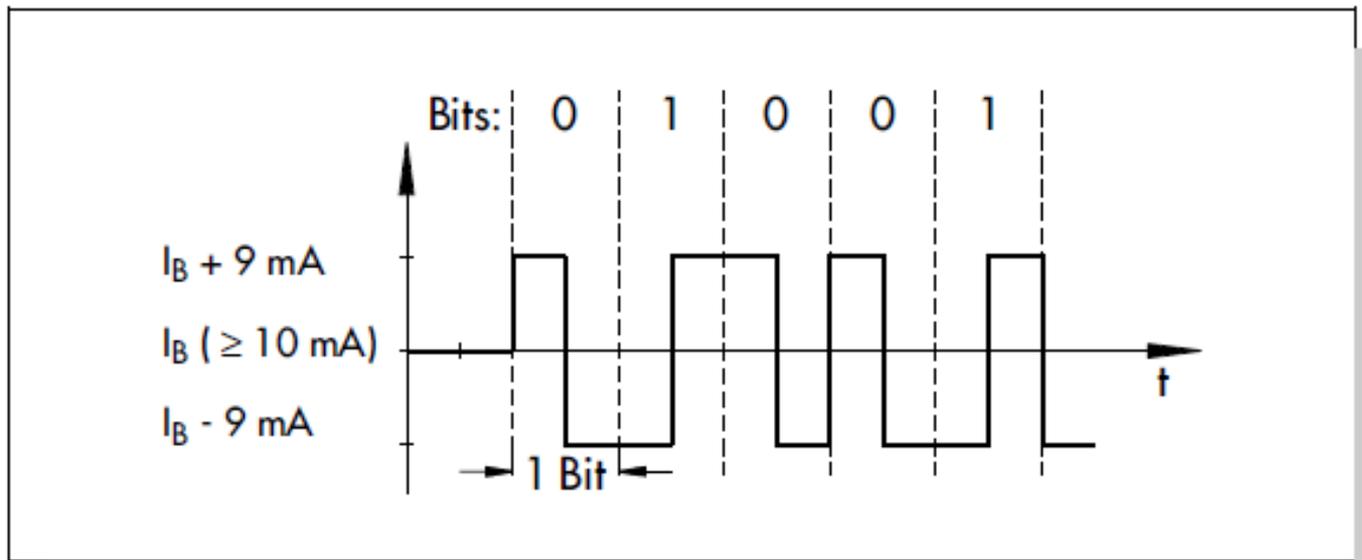
Bitübertragungsschicht IEC 61158-2

- IEC 61158-2 transmission technique
 - digital, bitsynchronous data transmission,
 - data transmission rate: 31.25 kbit/s,
 - Manchester coding without mean values, with a current/amplitude modulation of ± 9 mA (Fig. 11),
 - remote DC voltage power supply: up to max. 32 volts (with EEx ia IIC: 14 to 20 V),
 - signal transmission and remote power supply over twisted two-wire line
 - 126 addressable devices,
 - line or tree topology possible,
 - up to 1900 m total line length (with EEx ia IIC: 1000 m),
 - stub lines to the devices: up to 120 m; in hazardous areas maximum 30 m,
 - up to 32 devices per line segment (in hazardous areas depending on the supply current) and
 - the network is expandable by max. 4 repeaters (line amplifiers).

Anzahl der an einem PA Segment betreibbaren Geräte

- Anzahl wird beeinflusst von
 - Verbrauch der Geräte
 - Leitungswiderstand
 - Strom/Spannung am Ausgang des DP/PA-Kopplers
- Anwendung Ohmsches Gesetz
 - Anzahl = Strom am Kopplerausgang [mA] / typischer Stromverbrauch pro PA-Gerät [mA]
 - Ex-Bereich: $110 \text{ mA} / 12 \text{ mA} = 9$ Geräte
 - Nicht-Ex: $1000 \text{ mA} / 12 \text{ mA} = 83$, begrenzt durch Norm auf 31
- Leitungslänge (bezogen auf Anzahl Geräte)
 - Leitungslänge [km] = $(\text{Spannung am Kopplerausgang [V]} - \text{min.Versorgungsspannung PA-Gerät [V]}) / (\text{Summe Stromverbrauch [A]} * \text{Leitungswiderstand } [\Omega/\text{km}])$
 - Ex-Bereich: $(13,5\text{V}-9\text{V})/(0,11 \text{ A} * 44 \Omega/\text{km}) \sim 0,92 \text{ km}$
 - Nicht-Ex: $(31\text{V} - 9\text{V})/(500 \text{ mA} * 44 \Omega/\text{km}) \sim 1 \text{ km}$
 - Maximallängen nach Norm: Ex: 1,0 km, Nicht-Ex: 1,9 km

Manchester Codierung



(Samson 1999)

Weiterführende Literatur

- <http://www.profibus.com>
- <http://www.profibus.com/rpa/germany/>
- Popp, M. (1998) Profibus DP – Grundlagen, Tips und Tricks. Heidelberg: Springer.
- Weigmann, J. & Kilian, G. (2002) Dezentralisieren mit Profibus-DP/DPV1, 3. Aufl., Erlangen : Publicis
- Diedrich, Ch. & Bangemann, Th. (2006) Profibus PA. Instrumentierungstechnologie für die Verfahrenstechnik. 2. Aufl., München : Oldenbourg