



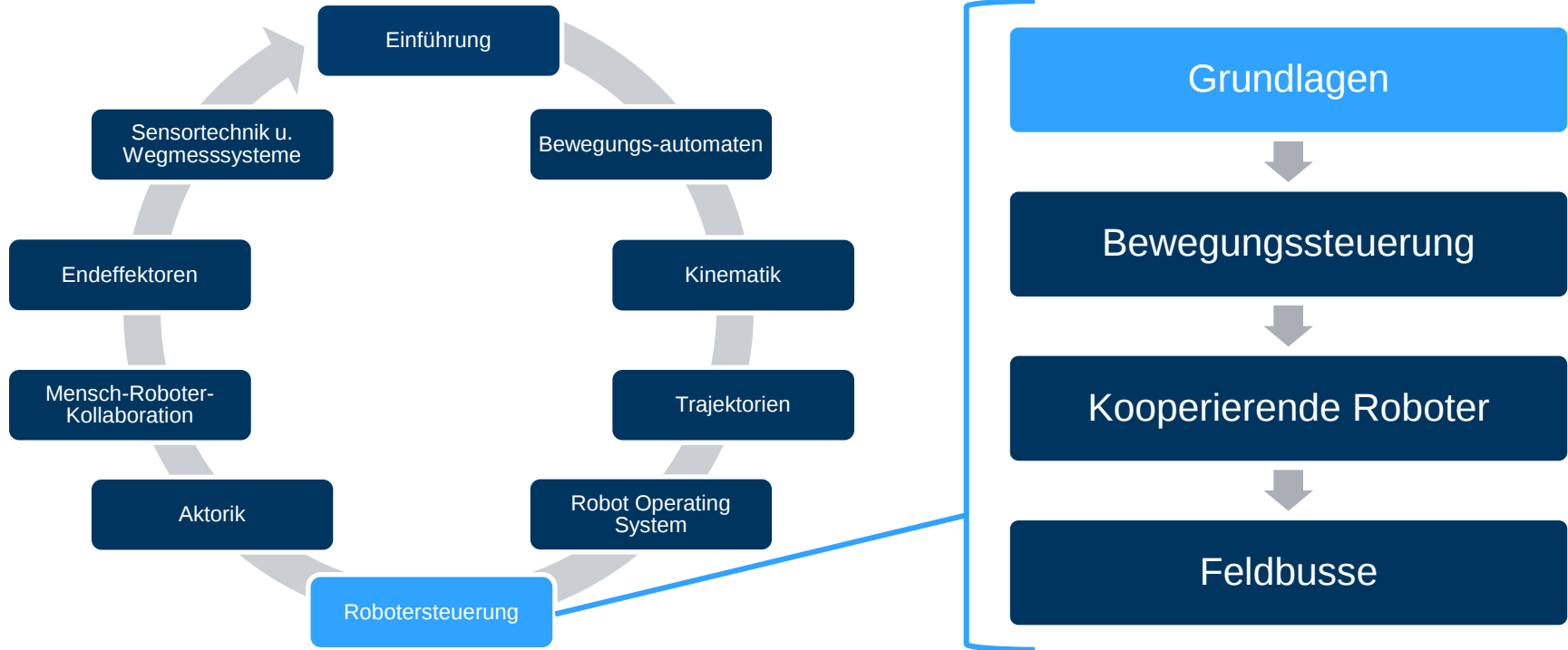
Technische Hochschule Georg Agricola

ROBOTIK ROBOTERSTEUERUNG

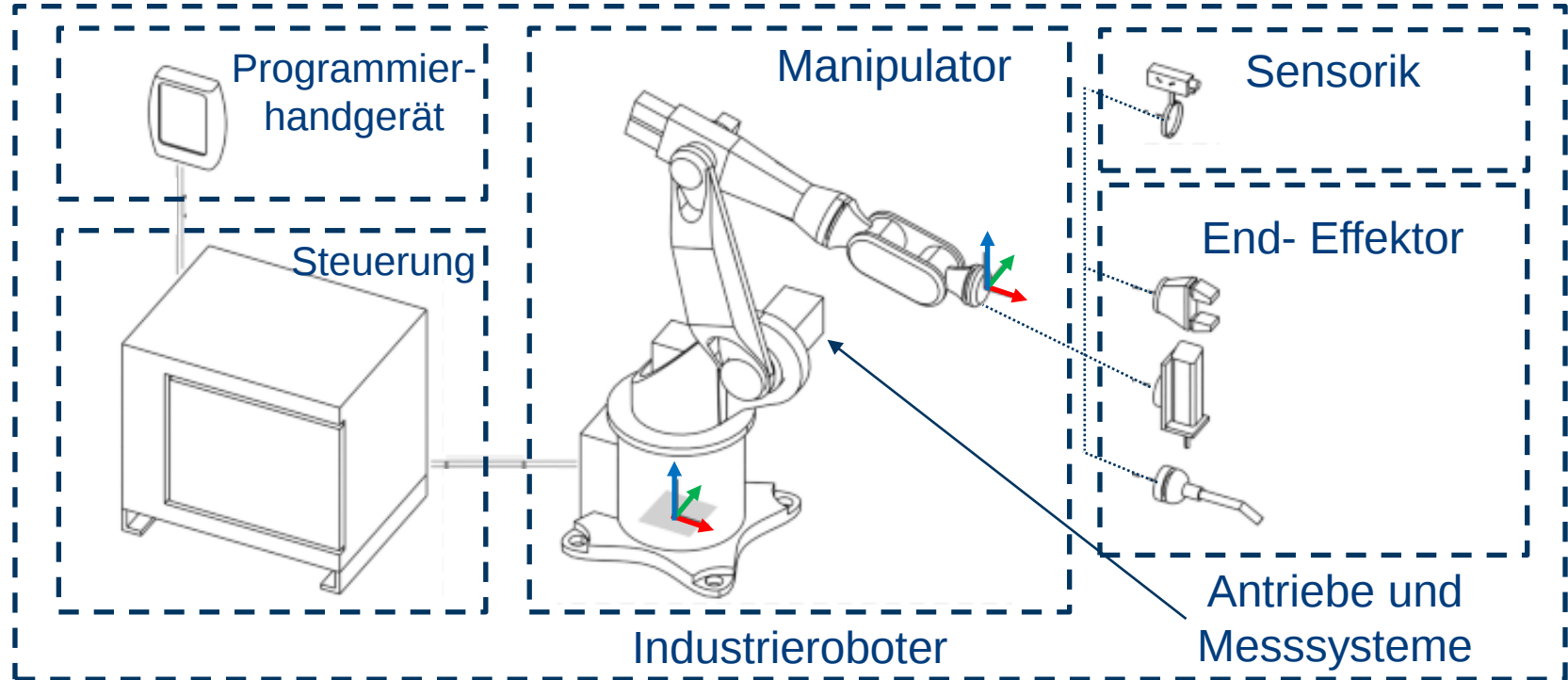
27.11.2025 Bochum

Dr.-Ing. Lars N. Josler

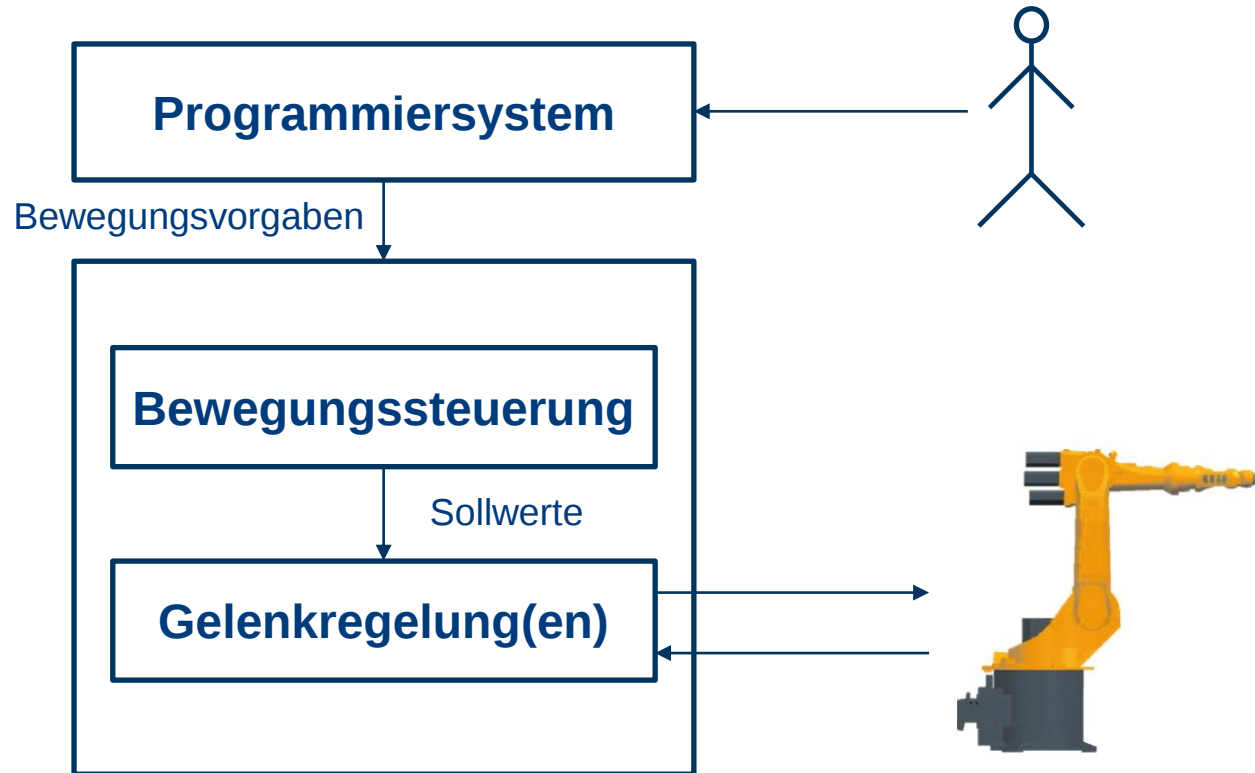
VORLESUNGSINHALTE



KOMPONENTEN VON INDUSTRIEROBOTERN

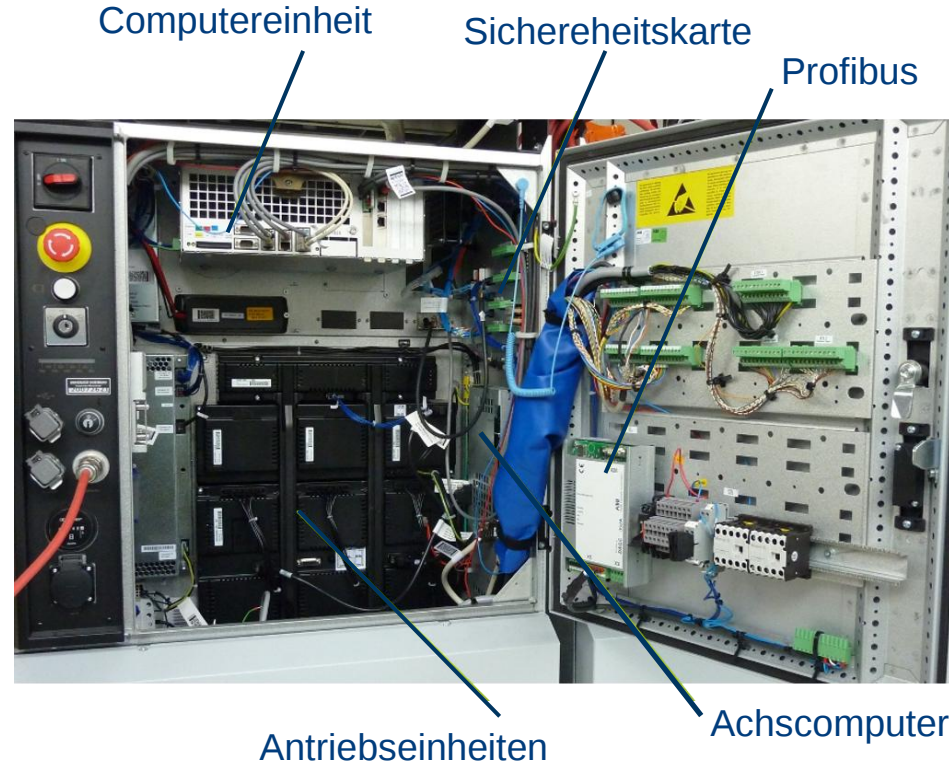


ROBOTERSTEUERUNGEN

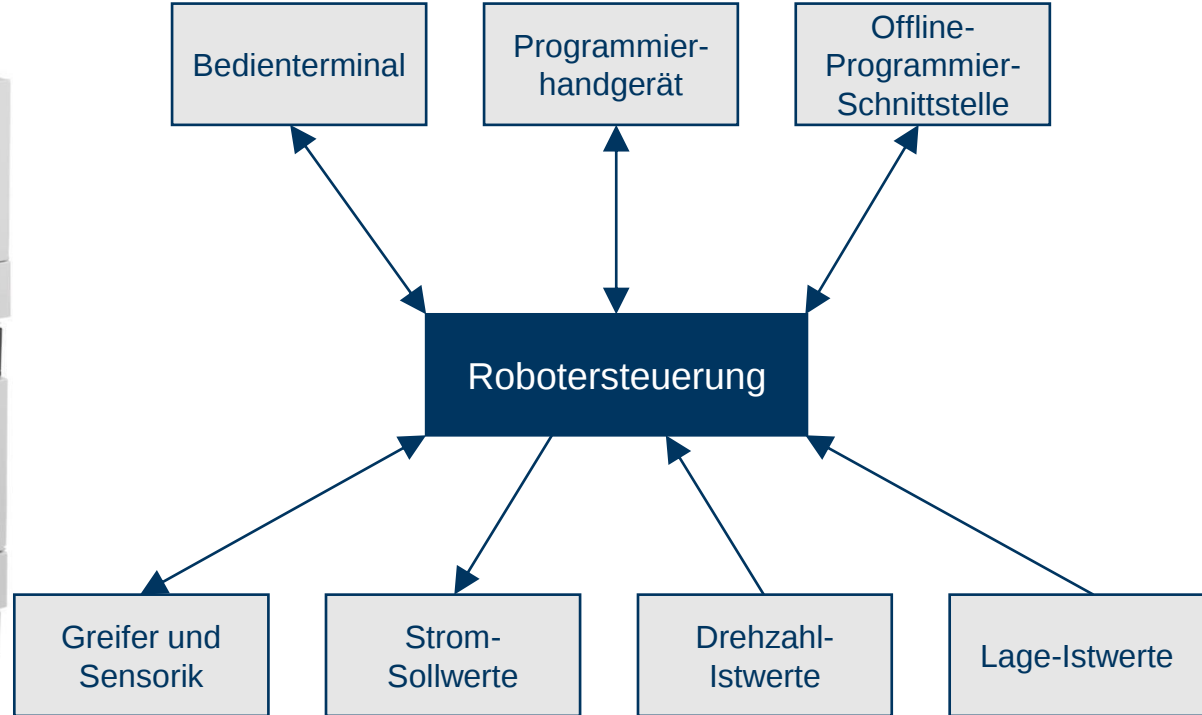


Quelle: nach Weber

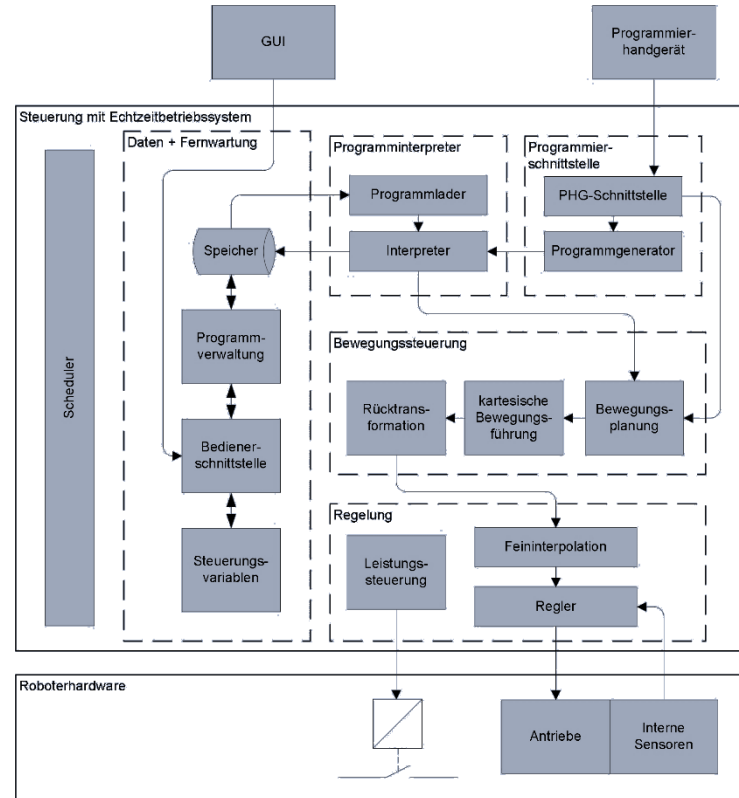
AUFBAU ROBOTERSTEUERUNG



SCHEMATISCHER AUFBAU EINER ROBOTERSTEUERUNG

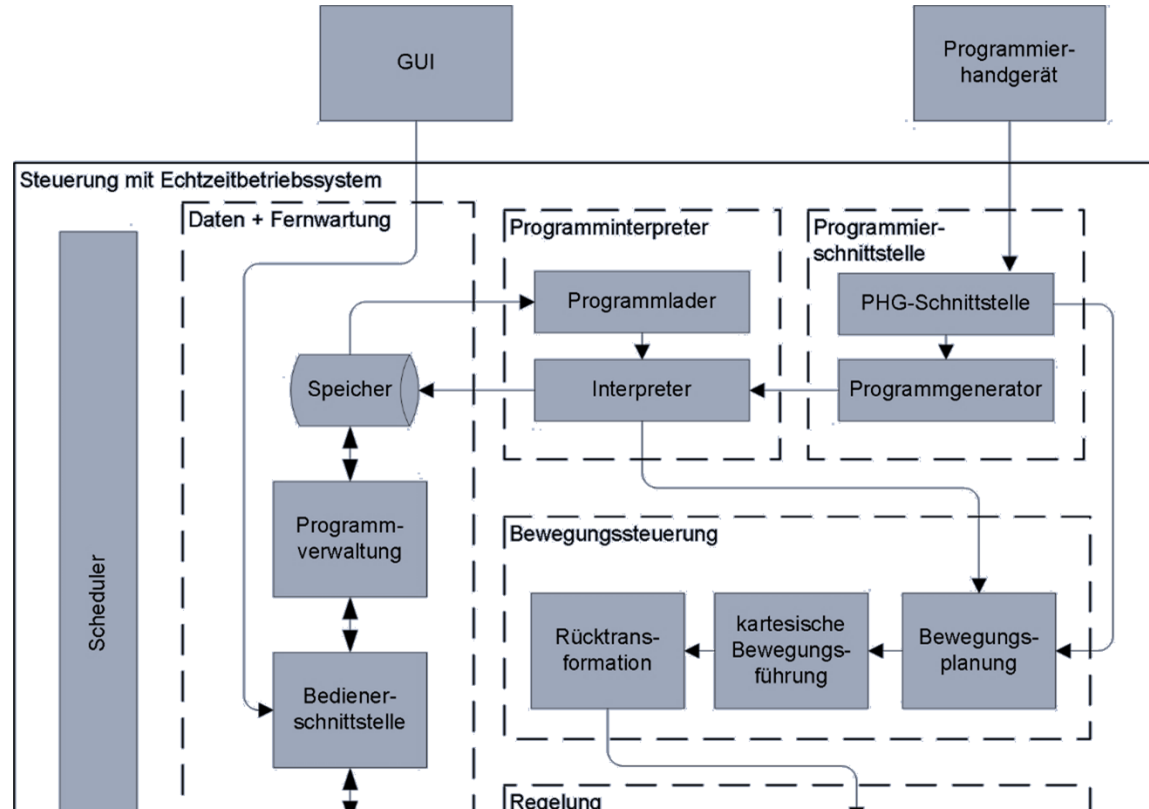


MODULARE ARCHITEKTUR ROBOTERSTEUERUNG



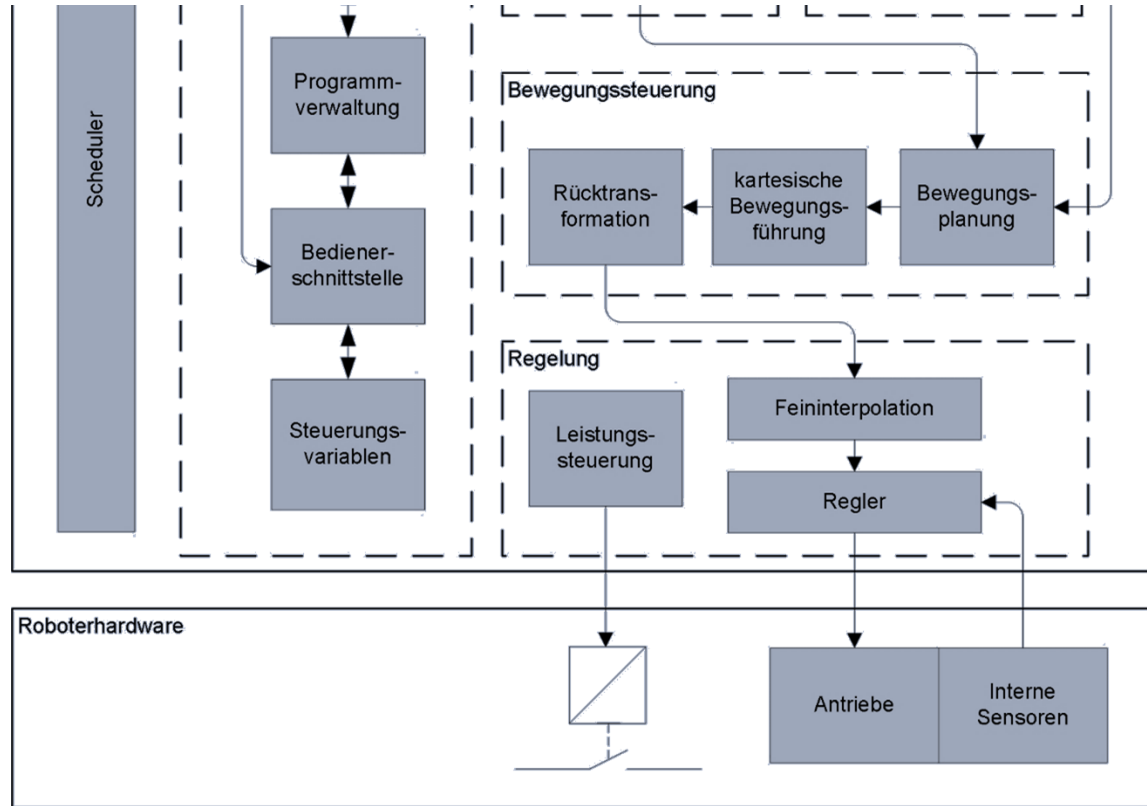
Quelle: Prof. Dr. Freund

MODULARE ARCHITEKTUR ROBOTERSTEUERUNG



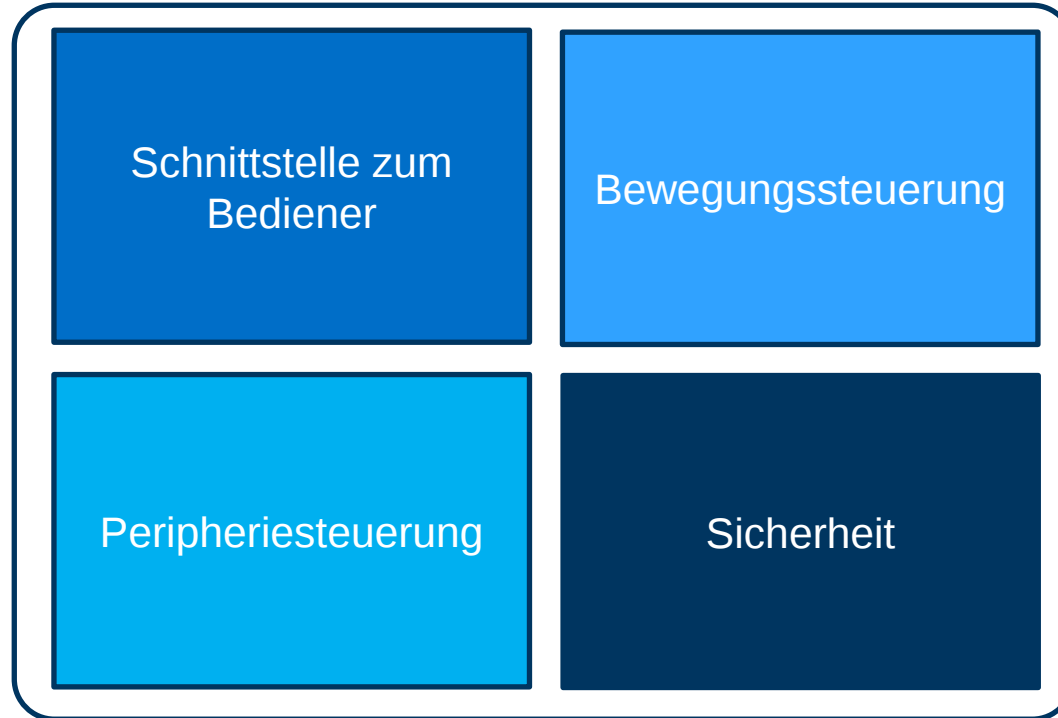
Quelle: Prof. Dr. Freund

MODULARE ARCHITEKTUR ROBOTERSTEUERUNG



Quelle: Prof. Dr. Freund

AUFGABEN UND FUNKTIONEN DER ROBOTERSTEUERUNG

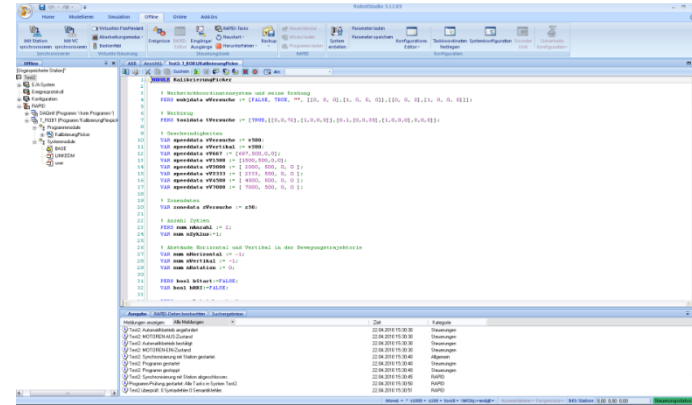


TEILAUFGABEN DER STEUERUNG EINES INDUSTRIEROBOTERS



- **Schnittstelle zum Bediener**
 - Kommunikation mit dem Bediener
 - Unterstützung bei der Programmgenerierung
 - Programmverwaltung
- **Bewegungssteuerung**
 - Programminterpretation
 - Generierung von Sollwerten in Gelenkkoordinaten aus Werkzeugkoordinaten
 - Regelung auf diese Sollwerte
 - Modifikation der Sollwerte (durch Sensoren oder Peripherie)
- **Peripheriesteuerung**
 - Generierung von Informationen für Peripherie
 - Kommunikation mit anderen Komponenten der Arbeitszelle
- **Sicherheit**
 - Garantie eines sicheren Betriebszustandes

SCHNITTSTELLE ZUM BEDIENER



- Eingabe von Arbeitsparametern, Programm-Start/-Stopp, Programme laden/speichern und Betriebsartenwahl (Einrichten, Test, Automatik)
- Programmierkomponente der Robotersteuerung für die Erstellung, Wartung und Verwaltung von Programmen
- Oberfläche stellt Editor, Debugger, Compiler bereit



Betriebsart	Beschreibung	Typische Sicherheitsfunktionen
Standby	Bereitschaftszustand ohne aktive Bewegung, z. B. bei Produktionspause oder Wartezustand. Bremsen aktiv.	■ Fehlerüberwachung ■ Selbsttestfunktion
Automatikbetrieb	Vollautomatischer Programmablauf im abgeschirmten Bereich ohne menschlichen Eingriff.	■ Arbeitsbereichsabgrenzung (z. B. Lichtgitter, Schutzzaun) ■ Fehlerüberwachung ■ Selbsttestfunktion
Handbetrieb (Einrichtbetrieb)	Manuelles Einrichten und Programmieren durch Bedienpersonal mit direktem Zugriff auf den Roboter.	■ Totmannschalter / Zustimmungstaster erforderlich ■ Leistungsreduzierung (z. B. max. 250 mm/s) ■ Fehlerüberwachung
Testbetrieb (Manuell FS)	Überprüfung von Bewegungsabläufen und Programmen, oft mit reduzierter Geschwindigkeit (volle Geschwindigkeit möglich).	■ Totmannschalter / Zustimmungstaster erforderlich ■ Ggf. Leistungsreduzierung ■ Fehlerüberwachung ■ Selbsttestfunktion

ABB FLEXPENDANT OMNICORE



A	Steckverbinder
B	RFID reader
C	Touchscreen
D	Not-Aus-Einrichtung
E	Joystick
F	Reset button
G	USB port
H	Dreistufige Freigabevorrichtung
J	Daumentaste

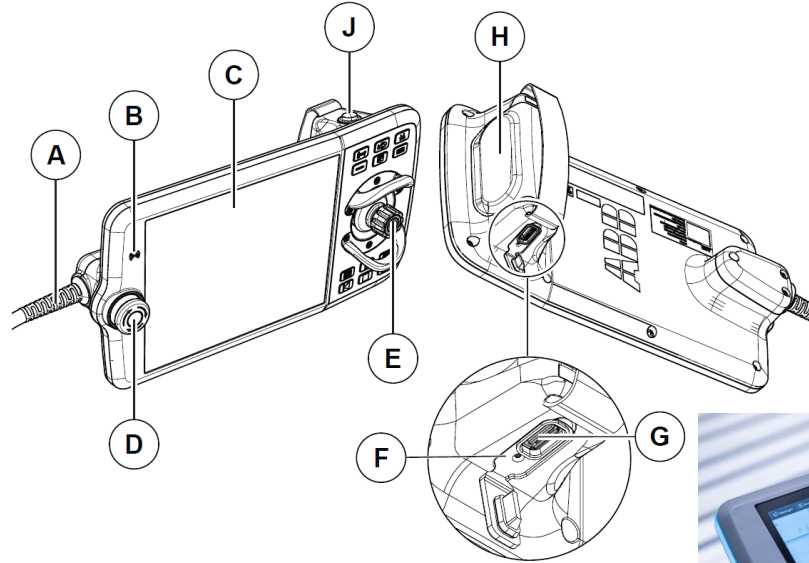


Abb - Operating manual - Integrator's guide Omnicore

ABB FLEXPENDANT



ABB Programmiergerät (ABB FlexPendant) leicht erklärt



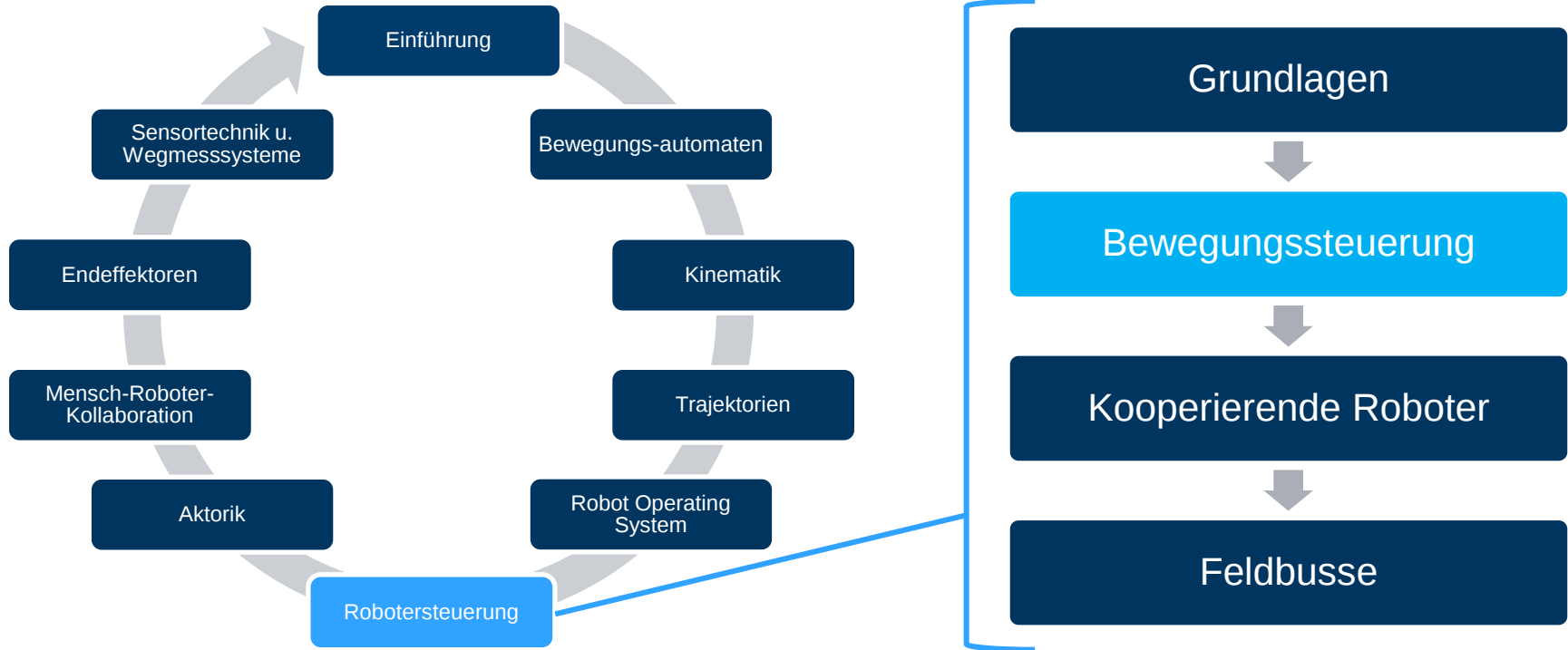
- **Schnittstellen der Steuerung ermöglichen:**
 - Regelung
 - Adaption
 - Kommunikation und Interaktion
- **Schnittstellen nach Verwendungszweck:**
 - Interne Sensorschnittstelle zur Positionsregelung
 - Regelungssensorik
 - Externe Sensorschnittstelle zur Programmadaption
 - Ablaufsensorik
 - Bewegungssensorik
 - Peripherieschnittstellen zur Kommunikation
 - Digital / Analog IO
 - Feldbusse
 - Ethernet
 - Serielle Schnittstellen



- **Sicherheitsfunktionen der Robotersteuerung**

- Leistungsreduzierung in einigen Betriebsarten
- Arbeitsbereichsbegrenzung
 - Software-Endschalter
 - Endschalter
 - Mechanisch (Steuerungsunabhängig)
- Totmannschalter, Zustimmungstaster
- Selbsttestfunktionen
 - CPU, Speicher
 - Watchdog-Funktion
- Fehlerüberwachung
 - Überprüfung der Sollwerte
 - Erreichbarkeit
 - Schrittweite
 - Schleppfehlerüberwachung
- Plausibilitätsprüfung der internen Sensorik

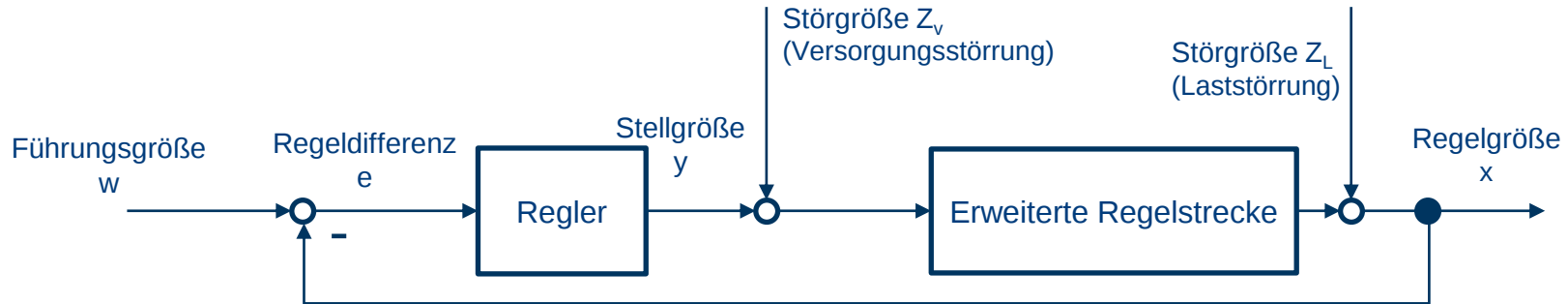
VORLESUNGSIHALTE





■ Regelung

- Das Regeln – die Regelung – ist ein Vorgang, bei dem eine Größe, die zu regelnde Größe (Regelgröße), fortlaufend erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.
- Kennzeichen für eine Regelung ist also der Soll-Istwert-Vergleich

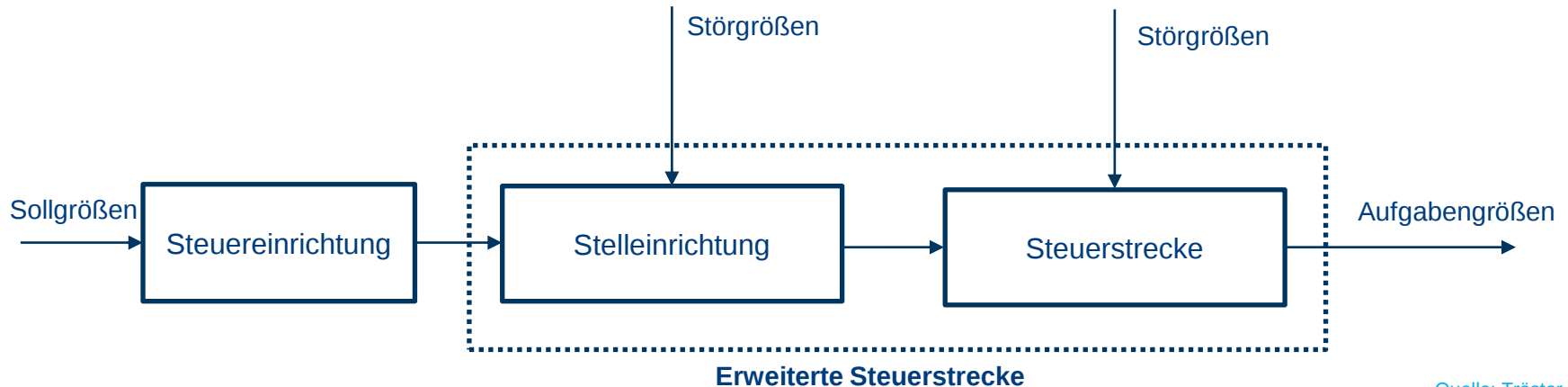


UNTERSCHIEDE STEUERUNG / REGELUNG



■ Steuerung

- Das Steuern – die Steuerung – ist ein Vorgang, bei dem eine Größe, die zu steuernde Größe (Steuergröße), durch eine andere Größe, die Eingangsgröße (Führungsgröße), beeinflusst wird, ohne dass die Steuergröße selbst rückwirkend erfasst und zur Korrektur verwendet wird.
- Kennzeichen für eine Steuerung ist also das Fehlen eines Soll-Istwert-Vergleichs – die Steuerung erfolgt offen, ohne Rückkopplung.



Quelle: Tröster

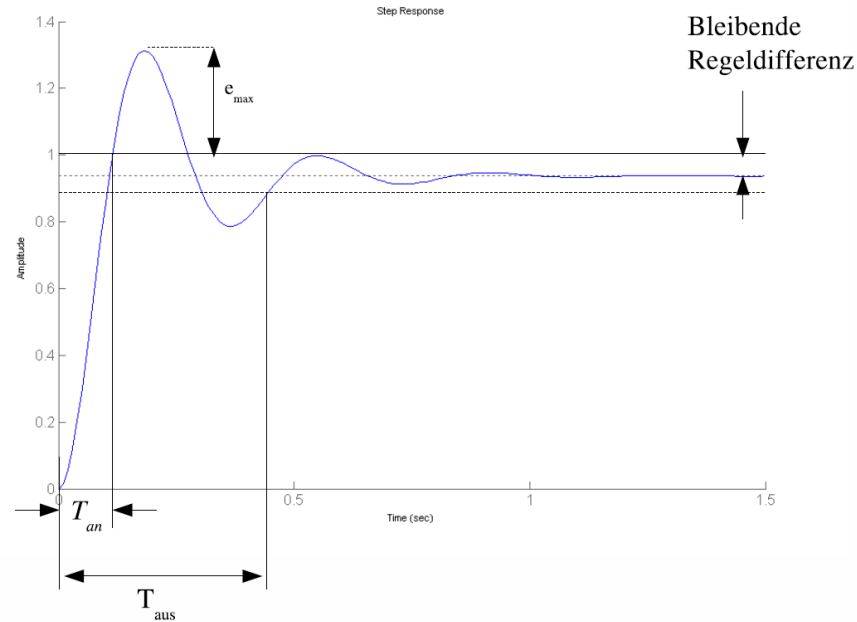


■ Regelfunktion mit Kenngrößen

Anregelzeit = T_{an}

Ausregelzeit = T_{aus}

Maximale
überschwingweite = e_{max}

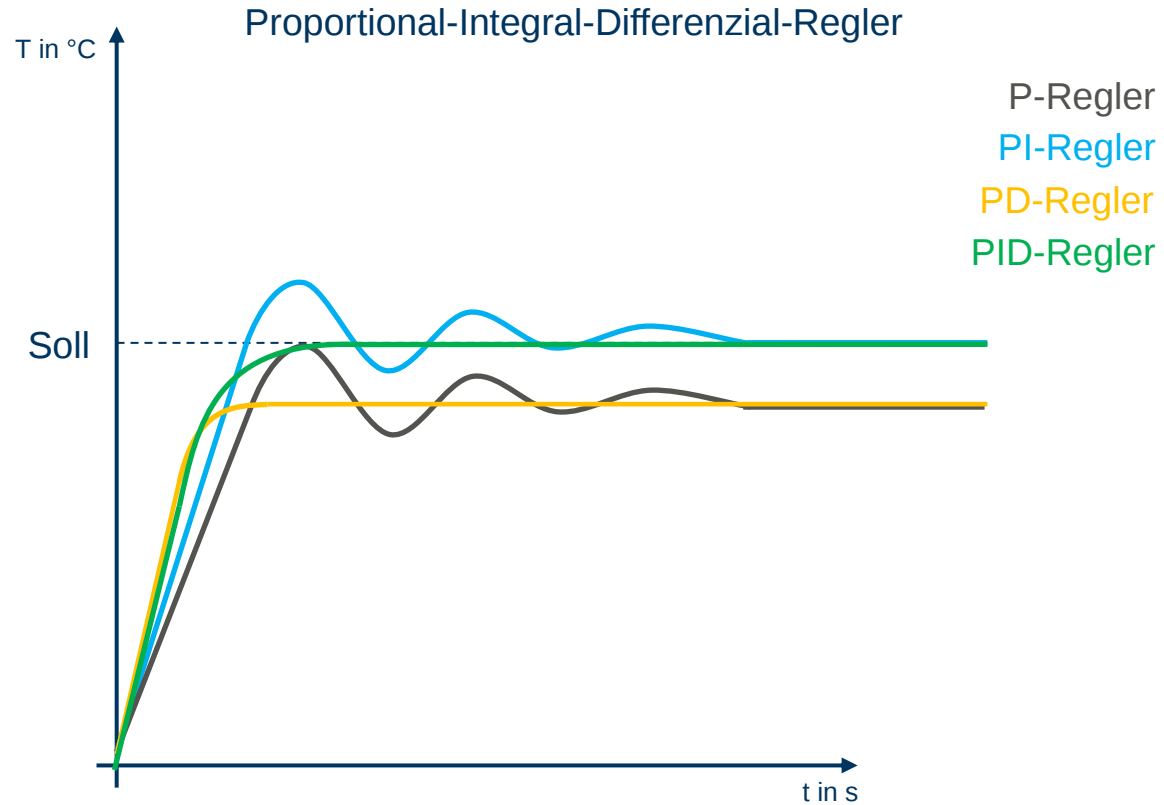


ANFORDERUNGEN AN REGELUNGEN



- **Kleine bleibende Regelabweichung**
- **Geringes Überschwingen**
- **Kleine Anregelzeit**
- **Kleine Ausregelzeit**

PID-REGLER



MERKMALE ELEMENTARER REGLER



Regeler	Anregelzeit	Überschwinger	Ausregelzeit	Regelabweichung
K_p	sinkt	wächst	geringe Änderungen	sinkt
K_I	sinkt	wächst	wächst	0
K_D	geringe Änderung	sinkt	sinkt	geringe Änderung

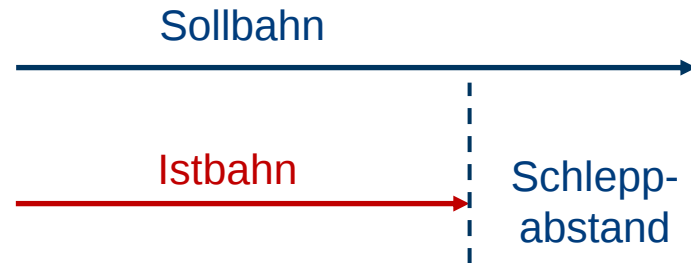
VIDEO: PID ANTEIL



SCHLEPPABSTAND AN REGELUNGEN



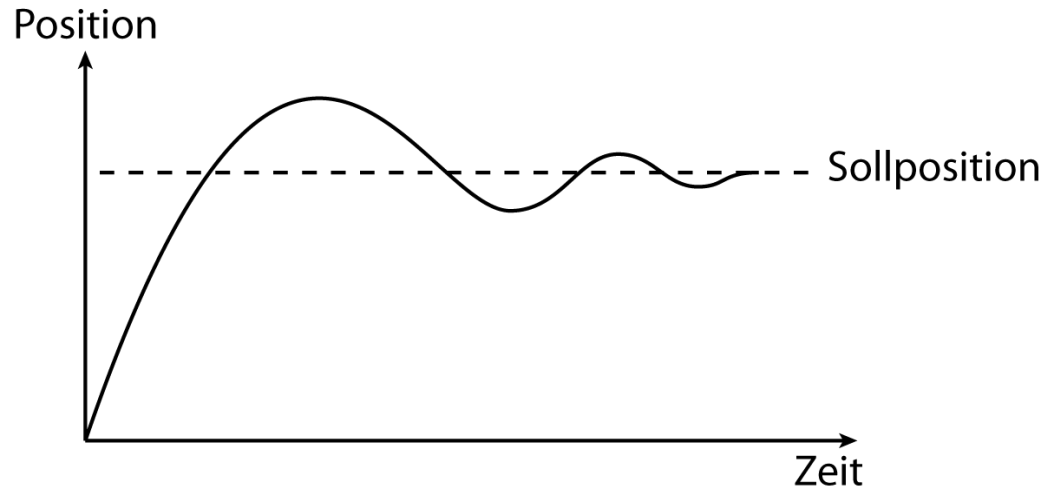
- Lageregeldifferenz, d.h. tatsächliche Position läuft der Sollposition hinterher
- bei größerer Geschwindigkeit nimmt dieser Abstand zu
- **Problem:**
 - bei Richtungsveränderungen resultieren aus dem Schleppabstand dynamische Bahnfehler



OVERSHOOT/ÜBERSCHWINGEN

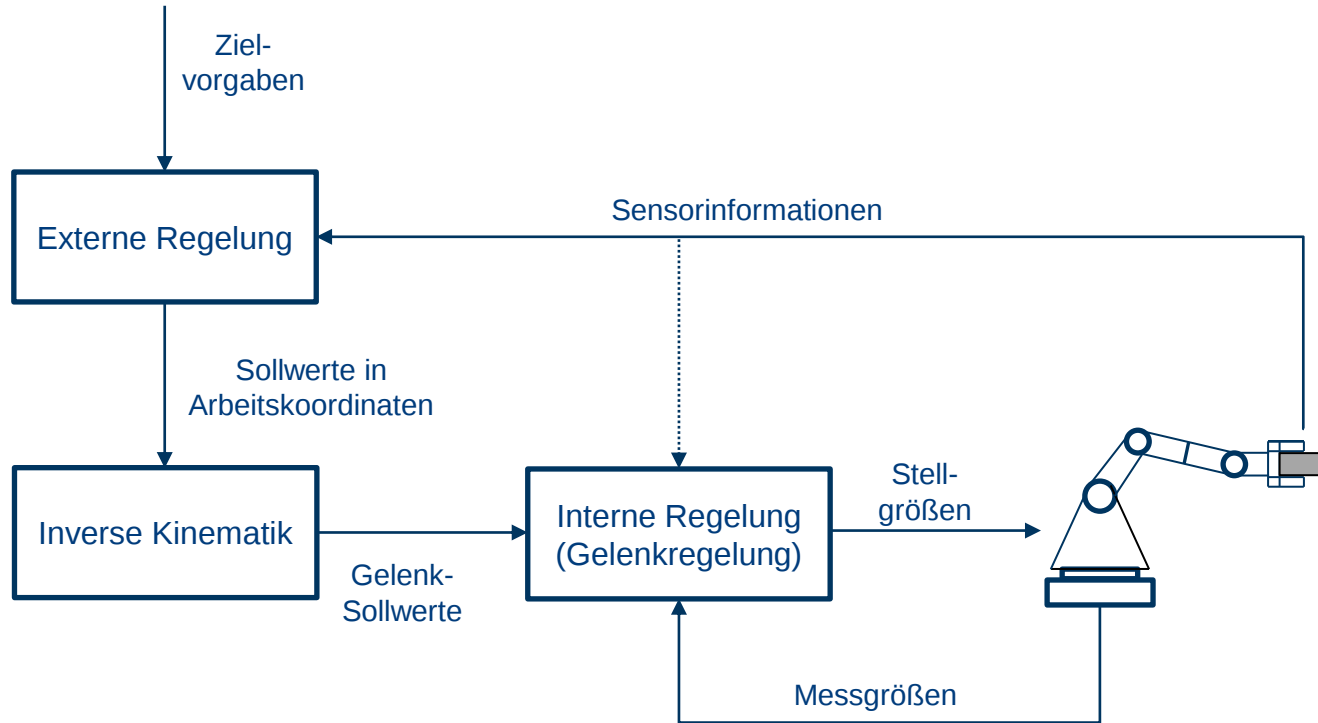


- **Problem:**
 - Verrundungsfehler
 - der Fehler muss unterdrückt werden, wenn hohe Bahngenauigkeiten erforderlich sind





- **Antriebsmotoren der Einzelgelenke müssen so angesteuert werden, dass die Gelenkwinkel sich auch unter Einwirkung von Störgrößen hinreichend genau einstellen.**
- **Um die Gelenkwinkel regeln zu können, müssen die Winkel über Messaufnehmer erfasst werden.**
- **Die aufgenommenen Werte werden dann in der Gelenkregelung mit den Solldaten verglichen und anschließend zu einer Stellgröße verarbeitet.**



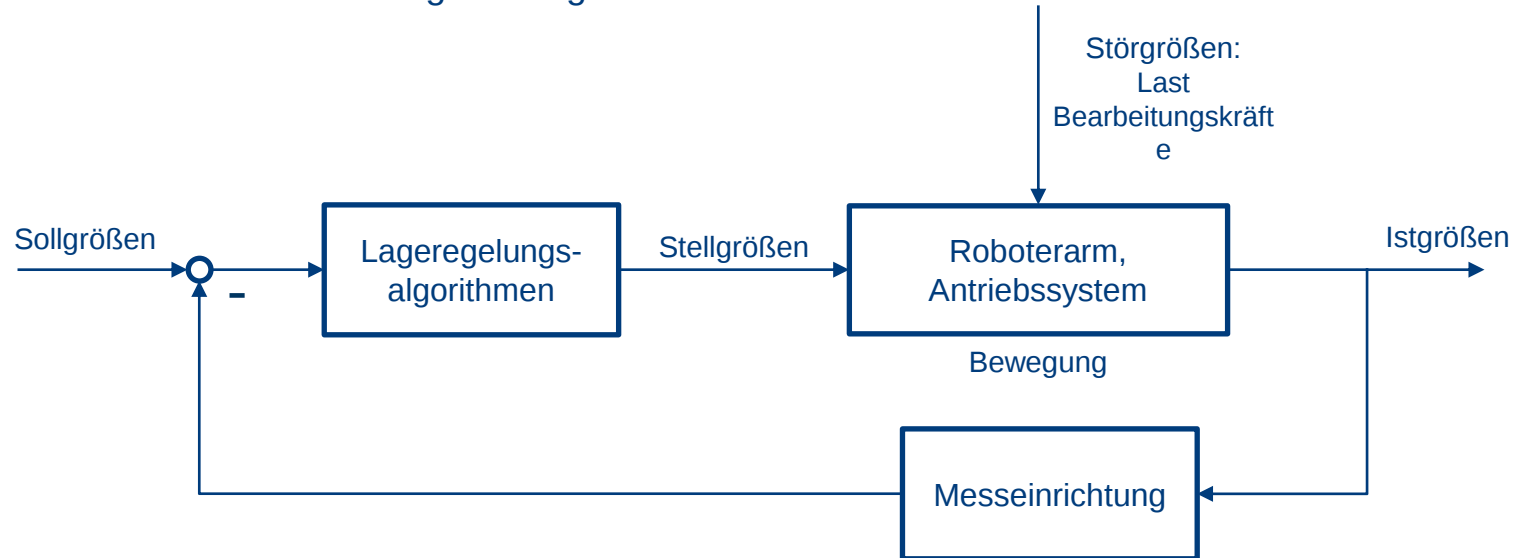


- **Die Gelenkregelung von Robotersteuerungen kann durch verschiedene Reglertypen umgesetzt werden:**
 - Lageregelung
 - Kraftregelung
 - hybride Regelung



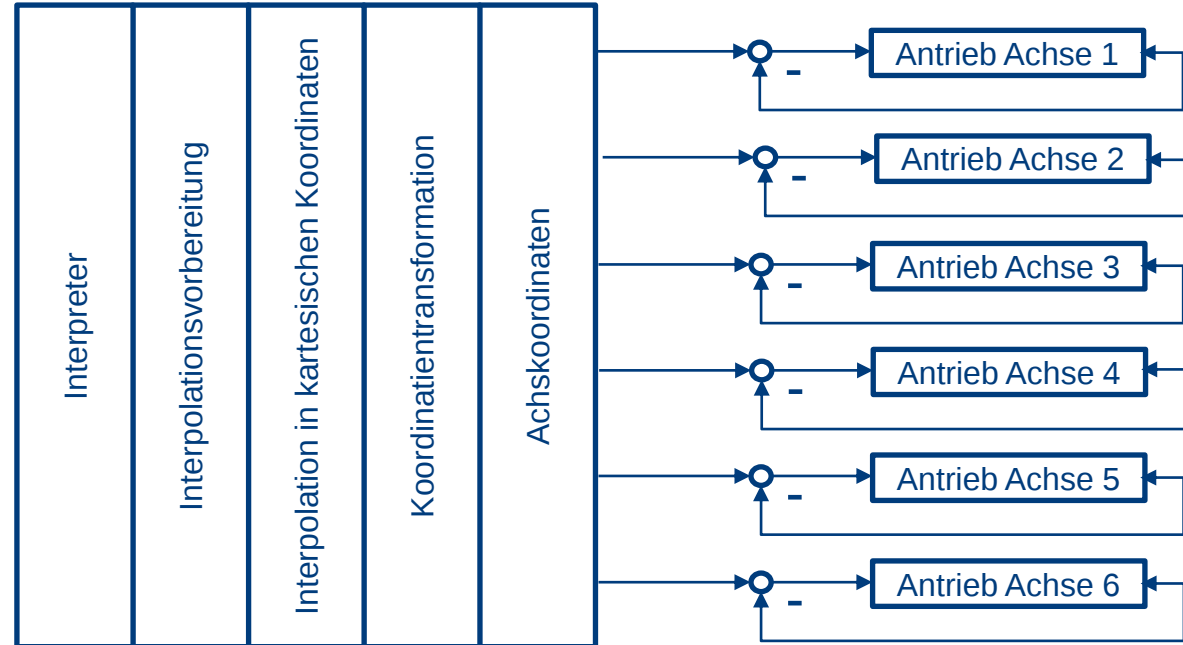
■ Einfacher Lageregelkreis

- Differenz zwischen Soll- und Istwert wird gebildet und als Stellgröße ausgegeben
- die Information wird ständig zurückgeführt





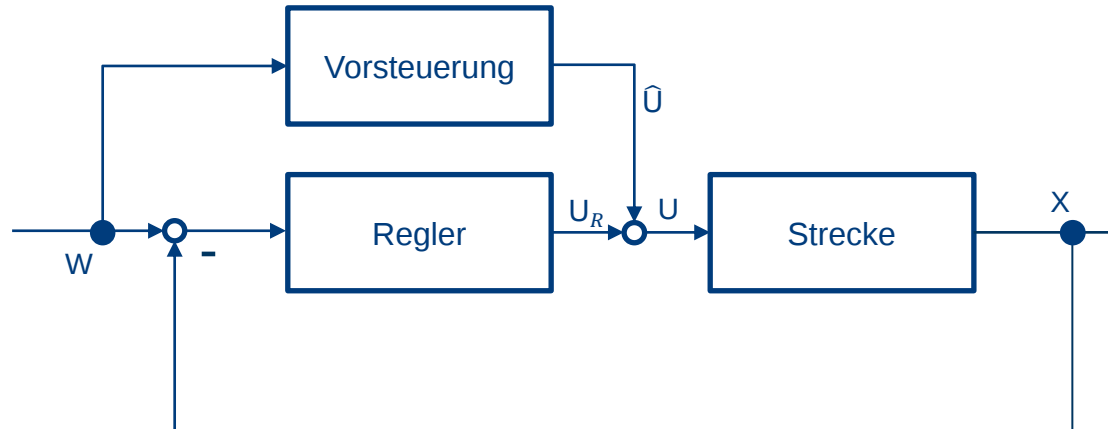
- Lagerregelung verteilt auf die Achsen





- **Vorsteuerung an einschleifigem Regelkreis**

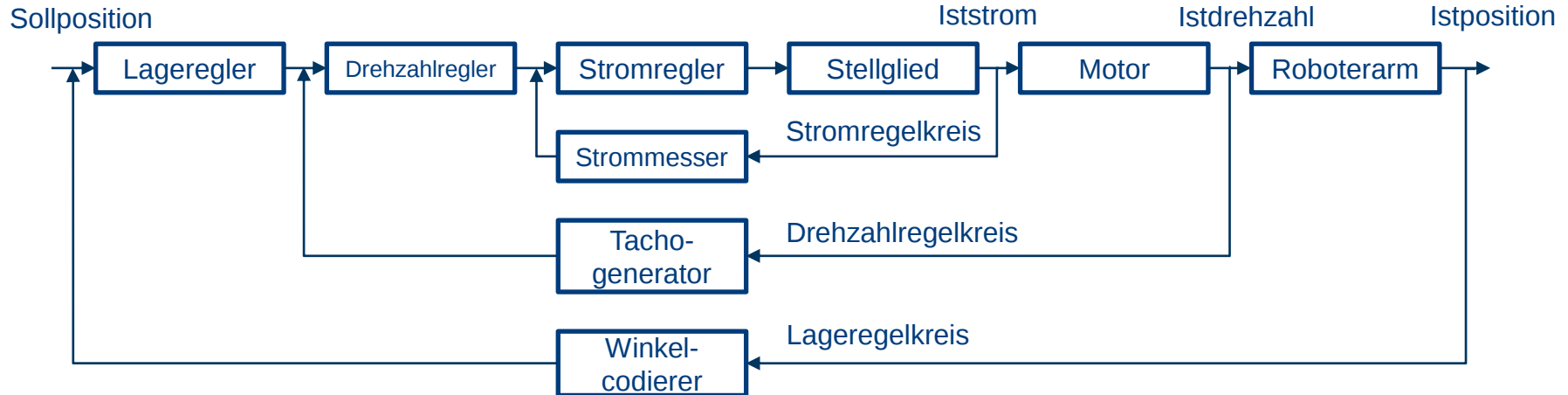
- Einfacher Lagereger:
 - Mathematisches Modell nur zum Entwurf des Reglers
- Vorsteuerung (engl. feedforward control):
 - Mathematisches Modell des Roboters ist Bestandteil des Regelalgorithmus



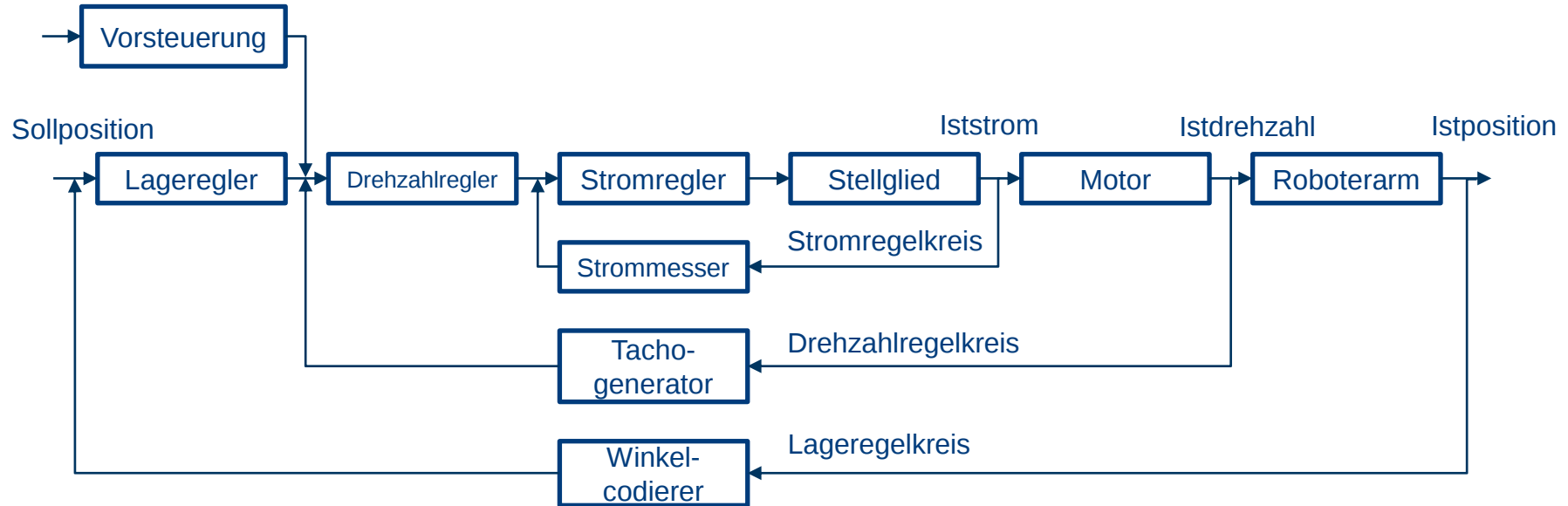
Quelle: Weber



- **Mehrgrößenregelung bestehend aus Positions-, Geschwindigkeits- und Stromregelung**
- **für eine Verbesserung der Dynamik wird auch der Strom und die Drehzahl in den Regler integriert**

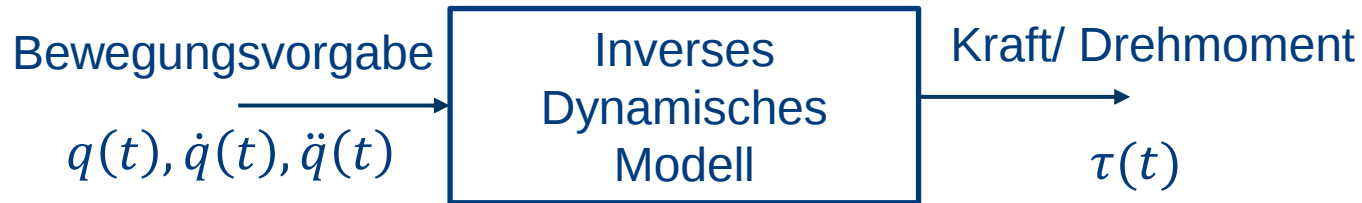


KASKADENREGELUNG MIT VORSTEUERUNG





- Relation zwischen der Bewegung einer Kinematik und den resultierenden Kräften
- Repräsentiert das zu steuernde System
- Wird zur Auslegung der mechanischen und Antriebs-Elemente des Manipulators verwendet.

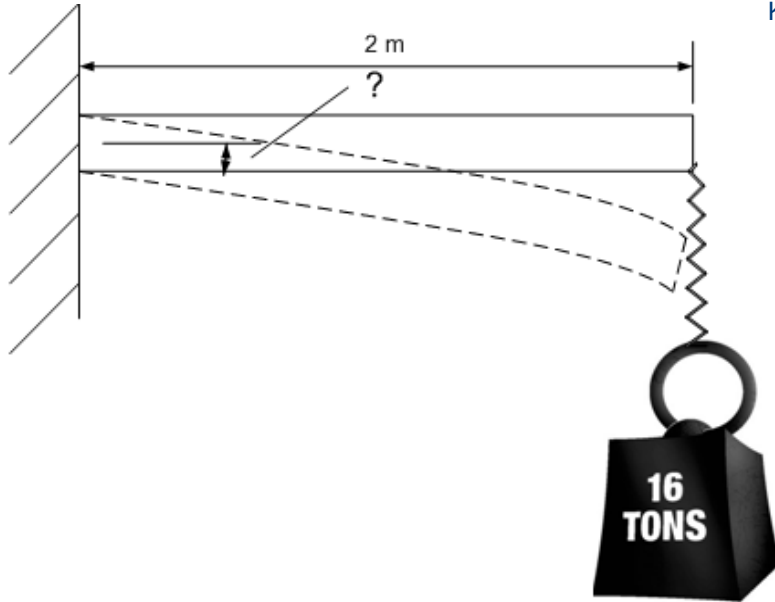


- $\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + R(q, \dot{q})$

DYNAMISCHES MODELL



■ Direktes Bewegungsmodell:



Antriebskräfte & -momente

Kinem. Randbedingungen

Physikalische Gesetze

Dynamische
Roboter-
simulation

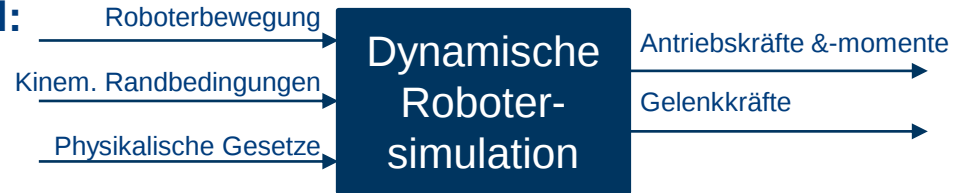
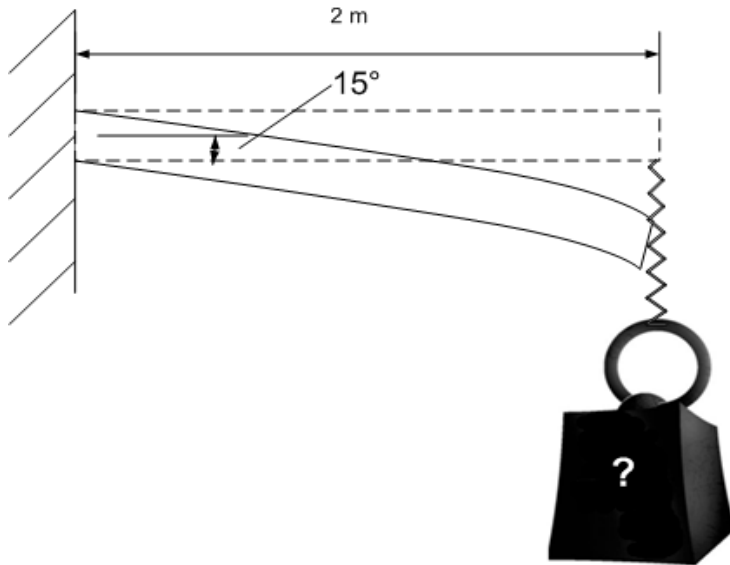
Roboterbewegung

Gelenkkräfte

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$



■ Invertiertes Bewegungsmodell:





- **Kraftkontakt mit der Umgebung**
- **definierte Kräfte bzw. Drehmomente können appliziert werden**
- **Sollwerte der Kräfte werden definiert**
- **die Messung der Ist-Werte wird durch Kraft-Momenten-Sensor ausgeführt**
- **Vergleich Soll- mit Istwert und Ausgabe der Stellgröße**



Quelle: ABB

KRAFT-MOMENTEN-SENSOR

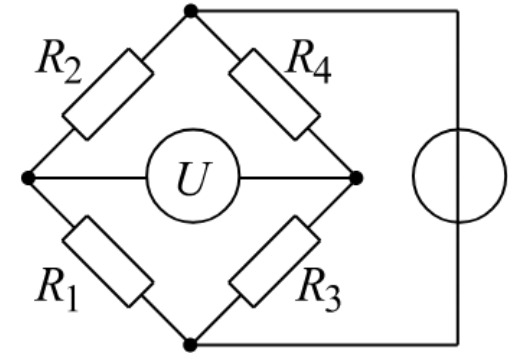
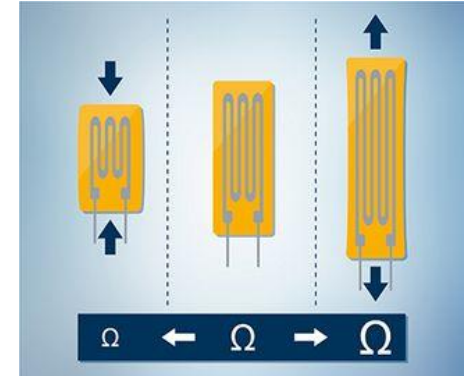


[Why ATI Force/Torque Sensors?](#)

KRAFT-MOMENTEN-SENSOR



- **Sensor zur Messung von Kräften F_x, F_y, F_z und Momenten M_x, M_y, M_z**
 - Ermöglicht feinfühliges Interaktion zwischen Roboter und Umgebung
- **Funktionsweise mit Dehnungsmessstreifen (DMS)**
 - DMS auf elastischem Messkörper angebracht
 - Mechanische Belastung $\rightarrow$ Dehnung $\rightarrow$ Widerstandsänderung
 - Elektrische Signale proportional zu Kraft/Moment
 - Wheatstone-Brückenschaltung angeordnet – meist als Vollbrücke
- **Anwendung in der Robotik**
 - Präzise Montage & Fügeprozesse
 - Schleifen, Polieren mit adaptiver Kraftregelung
 - Kollisionsdetektion & Sicherheit



Wie funktioniert eigentlich ein Drehmomentsensor? | HBM
Brückenschaltungen – Aufbau einer Brückenschaltung - elektro.net

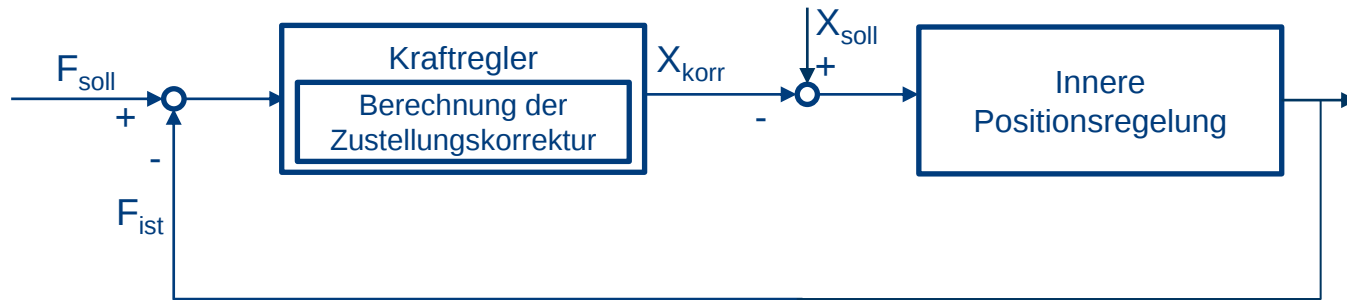


- **Mischung-Lage-Kraft-Regelung**
 - definierte konstante Anpresskraft erforderlich
 - zum Korrigieren des Kraftfehlers müssen alle Achsen angepasst werden → Positionsfehler
 - deswegen wird eine gemischte Regelung nötig
 - Verteilung von Kraft- und Lageregelung auf verschiedene Achsen

- zwei Varianten:
 - parallele Kraft-Lage-Regelung
 - hybride Kraft-Lage-Regelung



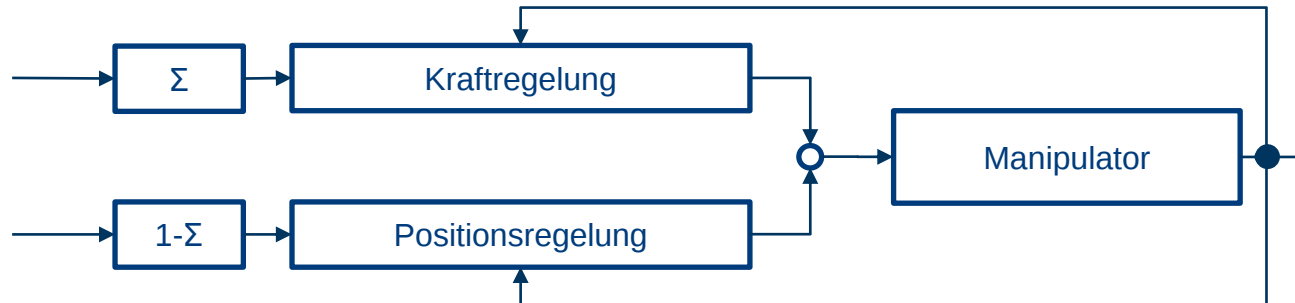
- **Parallele Kraft-Lage-Regelung**
 - äußerer Kraftregelkreis
 - innerer Positionsregelkreis
 - Differenz der Kräfte ergibt Zustellungskorrektur, die mit dem Sollwert für die Lage verrechnet wird
 - Bei flexiblen Kontaktoberflächen einsetzbar
- **Kraftregelung ist übergeordnet:**
- **Positionsfehler wird zugunsten optimaler Kraft toleriert**

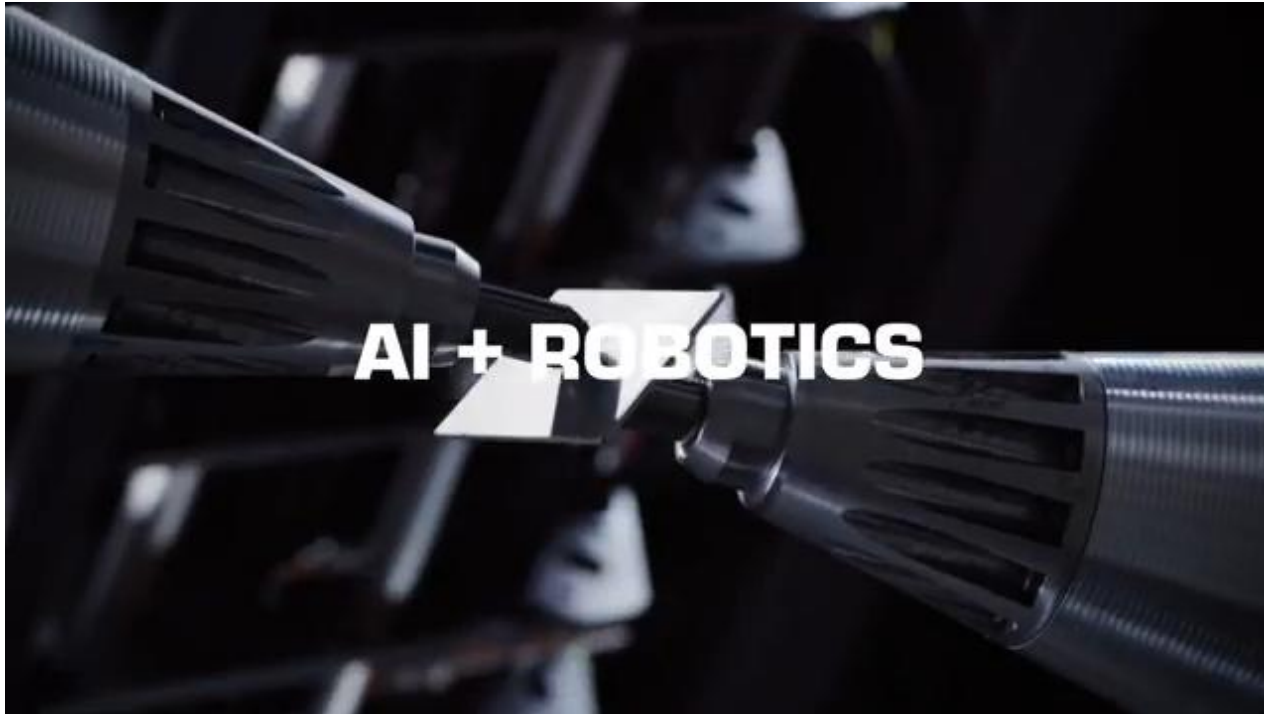


Quelle: Nordmann



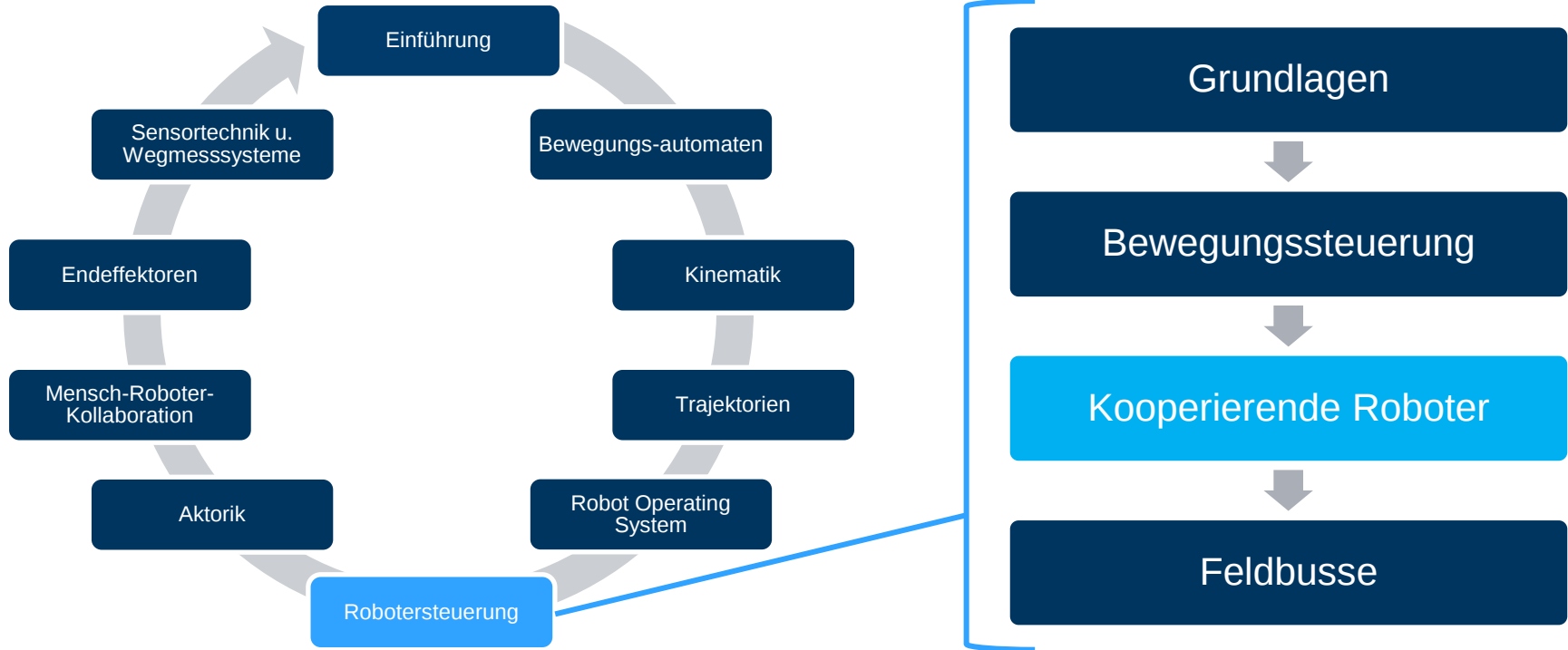
- **Hybride Kraft-Lage-Regelung**
 - Zwei voneinander separierte Regelsysteme:
 - Einteilung der Bewegungsrichtungen in einen beschränkten und unbeschränkten Raum
 - Kraftregelung für beschränkten Raum
 - Lageregelung für unbeschränkten Raum
 - Bei unflexiblen Kontaktoberflächen eingesetzt
 - Einteilung statisch (festgelegt) oder über Sensor dynamisch bestimmbar





[Incremental Sheet Forming - Roboforming](#)

VORLESUNGSIHALTE





- **Potentiale:**
 - Reduzierung der Bearbeitungszeit
 - Erhöhung der Handhabungs- und Montagefähigkeiten
 - Flexibilitätssteigerung
 - Qualitätssicherung
 - Kostensenkung
 - Verfügbarkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung



Kooperierende Roboter in der Technologieerprobungszelle (TEZ)



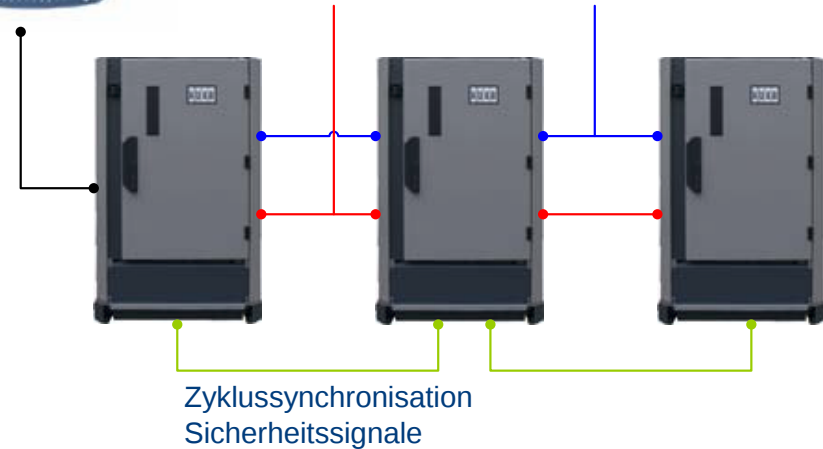
- **Dezentrale Kommunikation (z.B. KUKA RoboTeam)**
 - jeder Roboter besitzt eigene Steuerung
 - Verknüpfung und Synchronisierung der Steuerungen über Ethernet
 - theoretisch unbegrenzt skalierbar

Shared Pendant



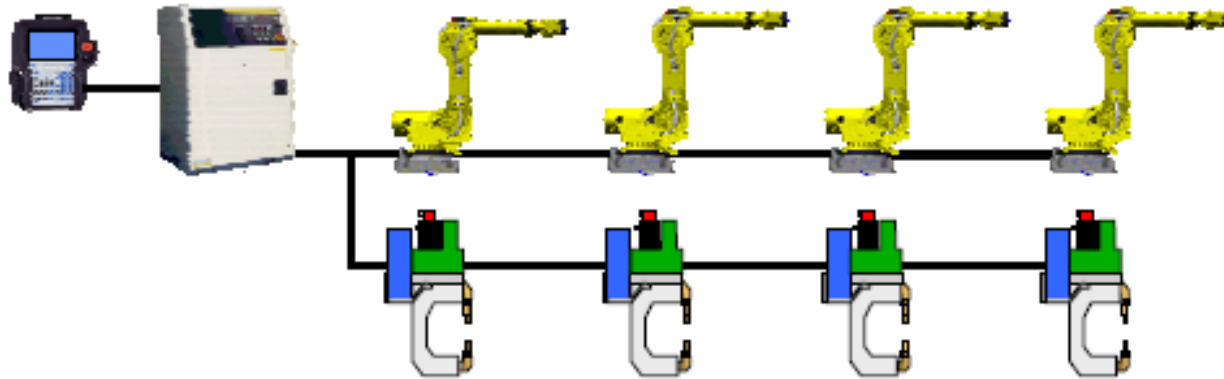
Echtzeit: Logische
Kooperation
Bewegungskoordination

Nicht Echtzeit:
Kommunikation mit
dem Bediener





- **Zentrale Kommunikation (z.B. multirobot von Fanuc)**
 - mehrere Roboter und Zusatzeinheiten werden an einer Robotersteuerung betrieben (CPU)
 - für jeden Raumpunkt werden die Achsdaten aller Roboter abgelegt
 - Bewegungen vollsynchron



Quelle: © Fanuc

KOOPERIERENDE ROBOTER



- **Hybride Kommunikation (z.B. ABB MultiMove)**

- bis zu vier Roboter an einer Steuerung
- geringere Zykluszeit
- Wegfall der Synchronisierung
- Ein Hauptcomputer, mehrere Antriebseinheiten

Computer-Modul:
Programmierung
Bewegungsplanung

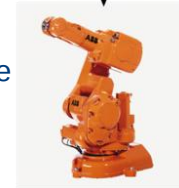


FlexPendant

Antriebs-Modul:
Achsregelung



Kooperierende
Roboter



Quelle: © ABB



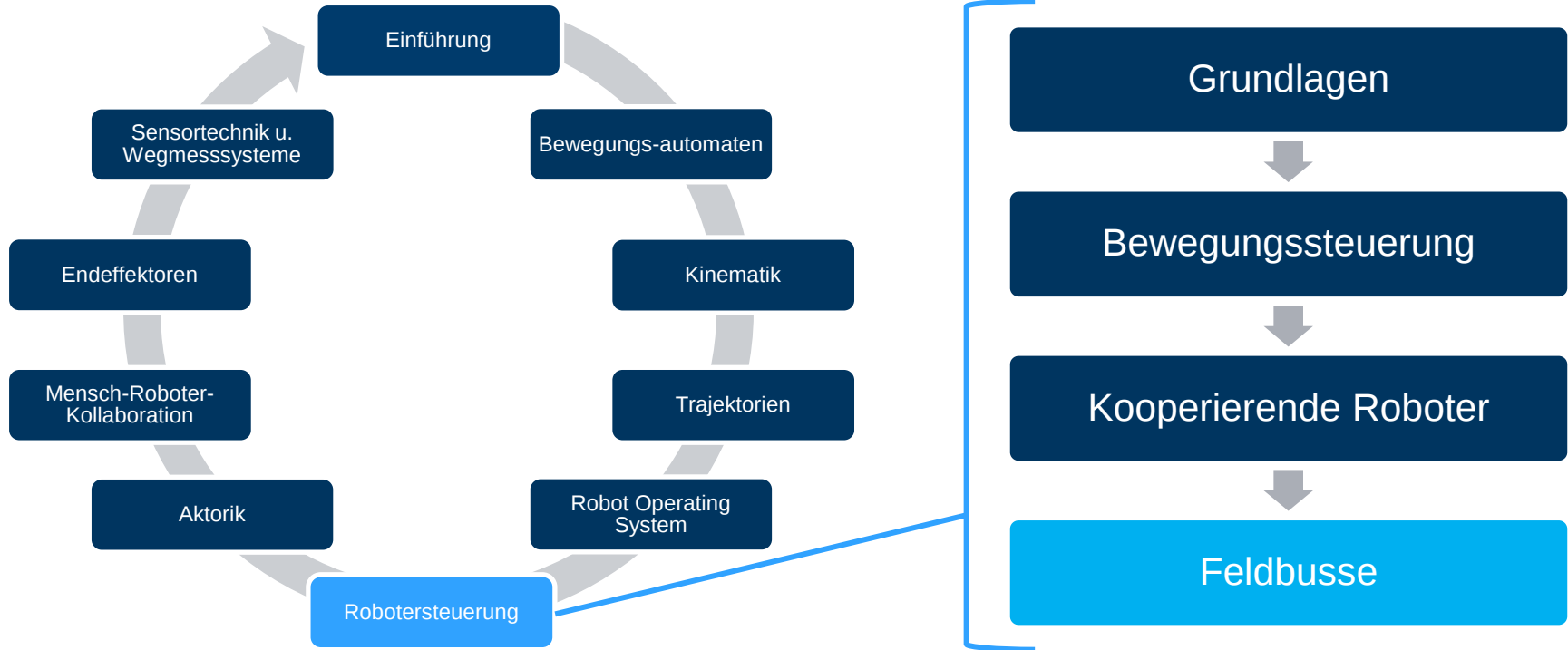
Kooperationsart	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile
Zentrale Kommunikation	Eine Steuerung für alle Roboter Alle Achsdaten zentral verwaltet Vollsynchronisierte Bewegungen	- Geringer Koordinationsaufwand - Präzise Synchronisation - Einfache Programmierung	- Begrenzte Skalierbarkeit - Hohe Abhängigkeit von zentraler CPU - Weniger flexibel bei Erweiterungen
Dezentrale Kommunikation	Jeder Roboter hat eigene Steuerung Kommunikation über Ethernet Logik- und Bewegungssynchronisation	- Hohe Skalierbarkeit - Flexibel bei Erweiterungen - Redundanz möglich	- Komplexe Synchronisation - Höherer Kommunikationsaufwand
Hybride Kommunikation	Eine Steuerung, mehrere Antriebseinheiten Teilweise zentrale Planung, dezentrale Regelung	- Geringe Zykluszeiten - Wegfall externer Synchronisierung - Gute Balance aus Kontrolle und Flexibilität	- Begrenzte Anzahl an Robotern - Komplexere Architektur - Abhängigkeit von Herstellerlösungen

KOPPLUNGSVARIANTEN IM KOOPERIERENDEN BETRIEB

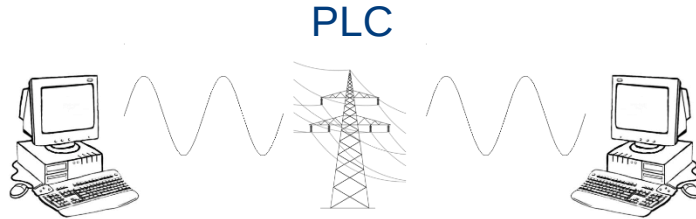
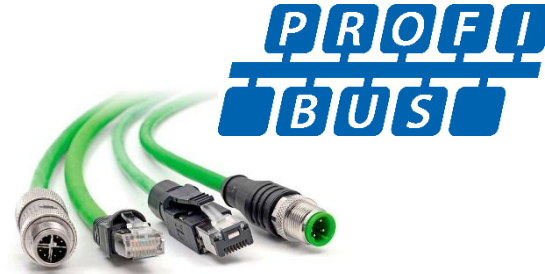


- **unabhängig:**
 - Programme laufen gleichzeitig ab, werden aber nicht synchronisiert
 - jeder Roboter hat seine eigene Steuerung
- **synchronisiert (zeitdiskret):**
 - ein Bewegungsplaner übernimmt mehrere Roboter
 - langsamste Achse bestimmt Geschwindigkeit der anderen
 - gemeinsamer Startpunkt
- **Geometrisch (Master-Slave) / koordiniert (zeitkontinuierlich):**
 - synchrone Bewegung am Werkstück
 - gesamte Gruppe fährt zeitoptimal
 - entweder: direktes Folgen der Master-Bewegung
 - oder: synchron überlagerte Bewegung

VORLESUNGSIHALTE



ÜBERSICHT KOMMUNIKATIONSARTEN



Quelle: [SPE](#), [ZigBee](#), [Industrial ethernet](#), [PLC](#)

FELDBUSSE



Quelle: Phoenix Contact

MERKMALE VON FELDBUSSEN

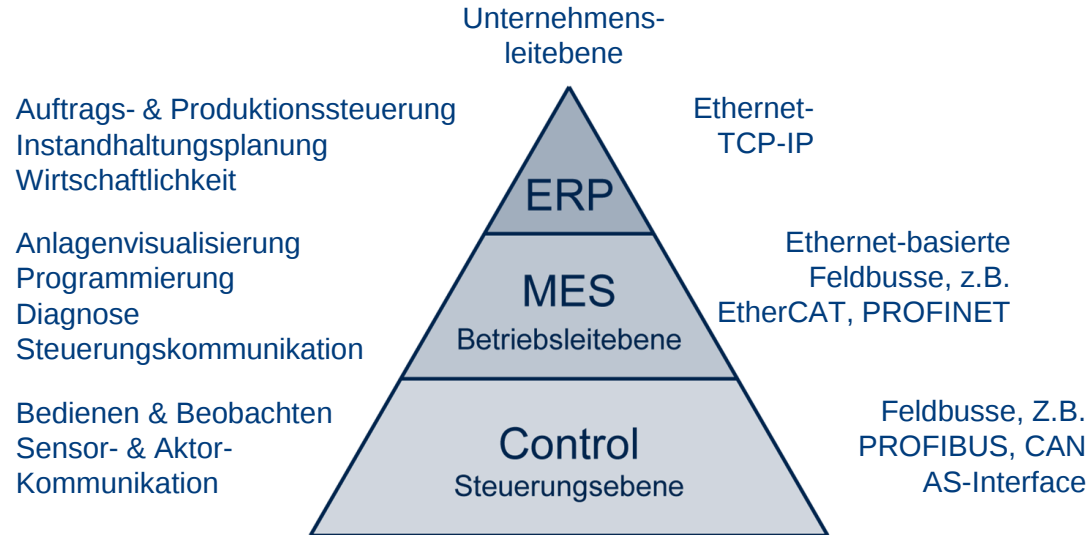


- Ein Bussystem ermöglicht die Datenübertragung zwischen mehreren Teilnehmern auf einem Übertragungsweg (IEC 60050).
- Feldbusse sind genormt in der IEC 61158.

Feldbusse	
Vorteile	Nachteile
▪ weniger Verkabelung, kleinere Schaltschränke ▪ geringerer Planungs- und Installationsaufwand ▪ Eigendiagnose-Funktionen verkürzt Fehlersuche ▪ Höhere Zuverlässigkeit und bessere Verfügbarkeit ▪ Schutz vor Störungen (insb. gegenüber Analogwerten) ▪ offene Feldbusse vereinheitlichen Datenübertragung und Geräteanschluss ▪ Erweiterungen oder Änderungen sind einfach durchzuführen	▪ komplexeres System ▪ höherer Preis

Merkmale von Feldbussen

KOMMUNIKATIONSPROZESSE UND VERWENDETE BUSSYSTEME



Quelle: in Anlehnung an Wellenreuther 2005

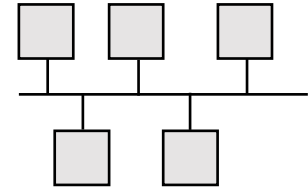
TOPOLOGIEN VON BUSSYSTEMEN (1)



- Bestimmen die Hardware und Bestimmen die Zugriffsmethoden
- Haben Einfluss auf Übertragungsgeschwindigkeit und Datendurchsatz

Linienbus-Topologie

- Eine gemeinsame Leitung, Ausfall des Netzes nur durch Trennung des Zentralen Kabels
- Keine zentrale Steuerkomponente → Steuerung sitzt in den einzelnen Stationen
- Nachrichten werden an die Adresse des Empfängers und Senders geschickt, nicht adressierte Station ignorieren die Nachricht
- Vorteile: Einfache Ankopplung, einfach zu realisieren, Ausfall eines Teilnehmers hat keine Auswirkung auf den Rest
- Nachteile: Endliche Buslänge begrenzte Teilnehmerzahl, Vergabe von Identifikationen nötig



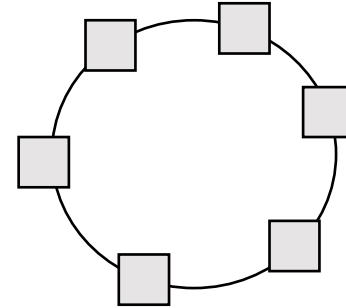
Quelle: Tröster 2005

TOPOLOGIEN VON BUSSYSTEMEN (2)



Ring-Topologie

- Geschlossene Kette von Punkt-zu-Punkt-Verbindungen: An jeder Station ein ankommendes und ein abgehendes Kabel
- Keine aktive Netzwerk-Komponente, Steuerung durch die Stationen selber
- Ausfall bei Unterbrechung des Kabels an einer einzigen Stelle
- Vorteile: Realisierbarkeit ausgedehnter Netzwerke, einfache Teilnehmer-Identifizierung
- Nachteile: Betriebsunterbrechung beim Hinzufügen von neuen Teilnehmern, Ausfall des gesamten Netzes bei Ausfall eines einzelnen Teilnehmers



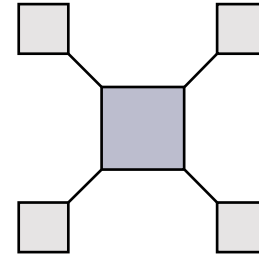
Quelle: Tröster 2005

TOPOLOGIEN VON BUSSYSTEMEN (3)



Stern-Topologie

- Eine zentrale Station, an den alle Teilnehmer einzeln angeschlossen sind
- Zwei Möglichkeiten der Steuerung: Zentrale nur zur Verteilung der Nachrichten, oder vollständige Steuerung der Kommunikation
- Vorteile: Verbindung von jedem Teilnehmer zu jedem Anderen, einfache Erweiterbarkeit
- Nachteile: Beim Ausfall der Zentrale fällt das gesamte Netz aus, hohe Schnittstellen-Anzahl der Zentrale



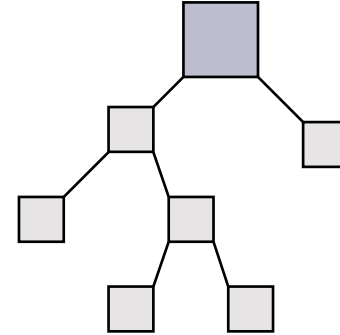
Quelle: Tröster 2005

TOPOLOGIEN VON BUSSYSTEMEN (4)



Baum-Topologie

- Beliebige Verzweigungen → Hierarchie
- Vorteile: Sehr gute Anpassung an örtliche Anforderungen, minimaler Verkabelungsaufwand, Bildung größerer Topologien möglich, leichte Erweiterbarkeit, einfache Integration anderer, neuer Komponenten möglich
- Nachteile: Unterschiedliche Technologien innerhalb des Netzes nötig, Konzentration der Datenmenge auf die Wurzel, beim Ausfall einzelner Station können ganze Netzwerksegmente ausfallen

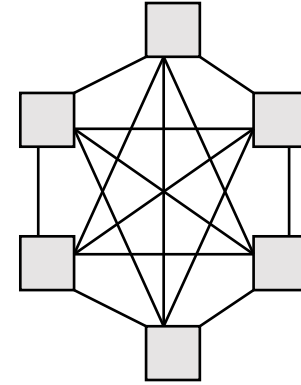


TOPOLOGIEN VON BUSSYSTEMEN (5)



Vermaschte Topologie

- Jeder Teilnehmer ist mit jedem verbunden.
- kein Zwischenknoten an der Kommunikation zwischen Teilnehmern beteiligt
- nicht in großen Netzen möglich
- Vorteile: ausfallsicherste Topologie
- Nachteile: hohe Kosten, sehr Komplexes Netzwerk

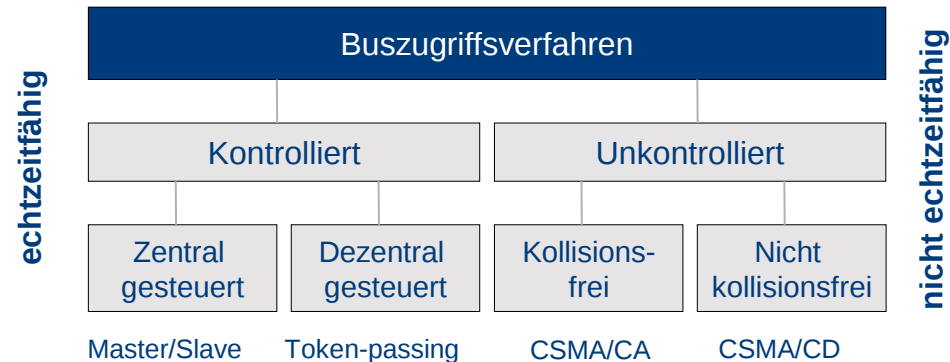


Quelle: Tröster 2005



Buszugriffsverfahren...

- bestimmen, wie ein Teilnehmer Zugriff auf den Bus hat,
 - regulieren die Reihenfolge, in der die Knoten Zugriff auf den Bus haben.
-
- Zugriffsverfahren haben wesentlichen Einfluss auf:
 - Datenrate
 - Buslänge
 - Echtzeitfähigkeit



Quelle: Tröster 2005

DETERMINISTISCHE ZUGRIFFSVERFAHREN (1)



Master/Slave-Verfahren (zentral gesteuert)

- Master stellt Verbindung zum Slave her
- Slave antwortet direkt
- Master scannt die Slaves regelmäßig auf Verbindungsanforderungen („polling“)

Master/Slave-Verfahren	
Vorteile	Nachteile
▪ Einfacher Aufbau der Slaves ▪ Festgelegte Übertragungszeit → Echtzeitfähig ▪ Prioritätssteuerung durch Polling-Sequenz	▪ Ausfall des Masters blockiert das gesamte System ▪ Übertragung von Slave zu Slave muss immer über den Master erfolgen ▪ Reaktionszeit doppelt so hoch wie Buszykluszeit

DETERMINISTISCHE ZUGRIFFSVERFAHREN (2)



Token-Passing-Verfahren (dezentral gesteuert)

- Zugriffsrecht wird mit einem sog. Token herumgereicht
- Alle Teilnehmer können den Bus steuern
- Zeitdauer des Token-Besitzes limitiert → echtzeitfähig

Token-Passing-Verfahren	
Vorteile	Nachteile
▪ Direkte Kommunikation der Teilnehmer ▪ Ausfall eines Teilnehmers hält das Netz nicht auf	▪ Komplexe Bus-Verwaltung ▪ Token-Umlaufzeit erhöht sich mit der Teilnehmerzahl ▪ Änderung des Netzes bringt eine Neukonfiguration des gesamten Bussystems mit sich

ZUFÄLLIGE ZUGRIFFSVERFAHREN (1)



Carrier-Sense-Multiple-Access-Verfahren

- Teilnehmer wartet, bis der Bus frei ist und beginnt zu senden
- Kollisionen bei mehreren gleichzeitigen Sendeversuchen werden erkannt

CSMA/CD (Collision Detection) (nicht kollisionsfrei)

- Abbruch der Datenübertragung bei Kollision
- Neuer Sendeversuch nach zufälliger Zeit
- Funktionsweise von Ethernet (nicht Industrial Ethernet)

CSMA/CD (Collision Detection)	
Vorteile	Nachteile
▪ Für viele Teilnehmer geeignet ▪ Hinzufügen oder Entfernen von Teilnehmern einfach	▪ Wenig Effizienz im Hochlastbetrieb, da viele Kollisionen ▪ Keine Echtzeitfähigkeit

ZUFÄLLIGE ZUGRIFFSVERFAHREN (2)



CSMA/CR (Collision Resolution) (Kollisionsvermeidung)

- Priorisierung von Nachrichten, unterlegene Sender ziehen sich zurück

CSMA/CR (Collision Resolution)	
Vorteile	Nachteile
■ Echtzeitfähig für hochrangige Nachrichten ■ Viele Teilnehmer möglich ■ Hinzufügen oder entfernen von Teilnehmern einfach	■ Nicht echtzeitfähig für niedrig priorisierte Nachrichten

ISO/OSI-REFERENZMODELL (1)



- **Referenzmodell für Netzwerkprotokolle als Schichtenarchitektur**
- **Sieben aufeinander folgende Schichten (engl. *layers*) mit jeweils eng begrenzten Aufgaben:**
 - Schicht 1 – Bitübertragungsschicht (*Physical Layer*)
 - Schicht 2 – Sicherungsschicht (*Data Link Layer*)
 - Schicht 3 – Vermittlungsschicht (*Network Layer*)
 - Schicht 4 – Transportschicht (*Transport Layer*)
 - Schicht 5 – Kommunikationsschicht (*Session Layer*)
 - Schicht 6 – Darstellungsschicht (*Presentation Layer*)
 - Schicht 7 – Anwendungsschicht (*Application Layer*)

Quelle: nach Isermann 2008

ISO/OSI-REFERENZMODELL (2)



Schicht 1 – Bitübertragungsschicht (*Physical Layer*):

- Physikalische Übertragungstechnik sowie die elektrische Darstellung der Bits werden definiert
- Überwachung der Übertragungsstrecke

Schicht 2 – Sicherungsschicht (*Data Link Layer*):

- Reihenfolge, in der die Busteilnehmer auf den Bus zugreifen dürfen, wird über die Buszugriffsverfahren geregelt (z.B. CSMA/CD, Master/Slave, Token-Passing, Polling)
- Quittierung bei einer korrekten Übertragung einer Nachricht
- Steuerung der Übertragungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Kapazität des Übertragungsmediums und des Empfängers

Quelle: nach Isermann 2008

ISO/OSI-REFERENZMODELL (3)



Schicht 3 – Vermittlungsschicht (*Network Layer*):

- Protokolle zwischen den Teilnehmern einer Kommunikationsverbindung werden festgelegt
- Behandlung von Fehlern, die von der Sicherungsschicht nicht erkannt wurden

Schicht 4 – Transportschicht (*Transport Layer*):

- Auswahl verschiedener Transportverfahren je nach Anforderungen an eine Kommunikationsverbindung (Datendurchsatz, maximale Übertragungsdauer, Restfehlerrate etc.)

Schicht 5 – Kommunikationsschicht (*Session Layer*):

- Kommunikationsprotokoll steuert den Auf- und Abbau der Verbindung sowie die Datensynchronisation

Quelle: nach Isermann 2008

ISO/OSI-REFERENZMODELL (4)



Schicht 6 – Darstellungsschicht (*Presentation Layer*)

- Netzeinheitliches Format unterschiedlicher Datenformate
- Kompression und Verschlüsselung von Daten

Schicht 7 – Anwendungsschicht (*Application Layer*)

- Zugriff übergeordneter Anwendungsprozesse auf die Funktionen der darunterliegenden Schichten
- Zugriff über standardisierte Grundfunktionen

UNTERSCHIED FELDBUSSE / INDUSTRIAL ETHERNET



■ Industrial Ethernet: Feldbusse basierend auf Ethernet-Standard

Kategorie	Klassische Feldbusse	Ethernet-basierte Feldbusse (Industrial Ethernet)
Protokolle	Herstellerabhängig, teilweise genormt	Herstellerabhängig, teilweise genormt
Übertragungsverfahren (Physical Layer)	RS485 / EIA-485, LWL, MBP, CAN	Ethernet
Leitungstyp	Unterschiedlich (meist 2/4 adrig, verdreht, geschirmt)	Standard Ethernet (Kabel, 4 adrig, verdreht), LWL
Typischer Einsatzbereich	Sensor- / Aktor-Kommunikation, Feldebene	Kommunikation zwischen Steuerungen, Betriebsebene
Typische Zykluszeit	5 – 10 ms	< 1 ms
Verbreitung	Weit verbreitet	Vergleichsweise neue Technik

KLASSISCHE FELDBUSSE IM VERGLEICH



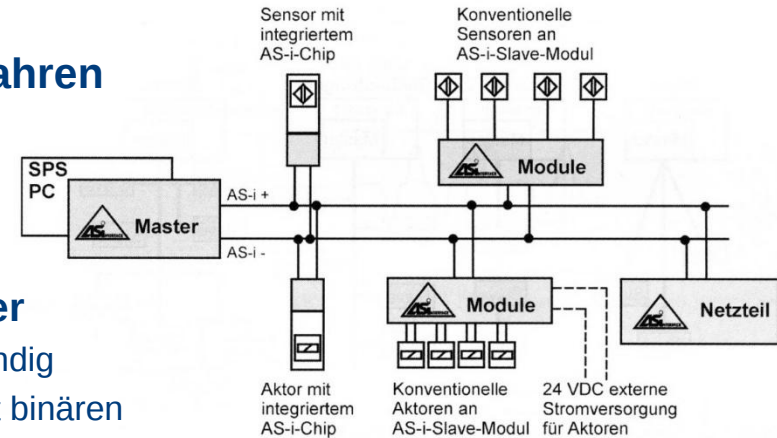
	Profibus	Interbus	AS-Interface	DeviceNet	CANopen	ControlNet
Anwendungsbereiche	Feldebene	Feldebene	Sensor-/ Aktorebene	Feldebene	Feldebene	Zellenebene
Besonderheiten	Mehrere Varianten mit abgestufter Funktionalität: DP, DPV1, DPV2, PA	sehr schnelle, gute Diagnose	Schnell, kostengünstig, ideal für rein binäre E/A-Signale	Basiert auf CAN, überträgt zusätzlich 24 Volt im Buskabel	Ideal für kleine Datenmengen und schnelle Synchronisation	Hohe Übertragungsleistung bei gleichbleibenden Buszykluszeiten
Reaktionszeiten	Mittel	Klein	Klein	Mittel	Mittel	Klein
Topologie	Linie	Ring	Linie, Stern, Baum	Linie	Linie	Linie
Übertragungsmedium	Kabel(2-adrig, geschirmt, verdreht), LWL	Kabel (5-adrig geschirmt, verdreht), LWL	Kabel (2-adrig, ungeschirmt)	Kabel, (4-adrig, geschirmt, verdreht)	Kabel, (4-adrig, geschirmt, verdreht)	Koaxialkabel
Übertragungsverfahren (Physical Layer)	RS-485, LWL oder IEC 61158-2 (MBP)	RS-485, LWL	Alternierende Pulsmodulation	CAN	CAN	Modulation
Übliche Anschluss-techniken	Sub-D (9-polig), M12 für IP65	Sub-D (9-polig)	Schneidklemmtechnik	Klemme, Mini- und Micro-Style	Sub-D (9-polig)	BNC
Maximale Teilnehmerzahl	126	256	62	64	127	99
Maximale Ausdehnung je Segment	100 m (12 Mbit/s), 1.200 m (9,6 kbit/s)	Zwischen 2 Geräten max. 400 m	100 m	100 m (500 kbit/s) 1.000 m (62,5 kbit/s)	100 m (500 kbit/s) 1.000 m (62,5 kbit/s)	1.000 m
Energieversorgung der Teilnehmer über den Bus	DP: nein PA: optional	nein	Ja, 30 Volt	Ja, 24 Volt	Optional 25 Volt	nein
Einsatz im Exbereich	DP: nein PA: ja	Nein	bedingt	nein	nein	nein

Quelle: feldbusse.de

AS-I-BUS (1)



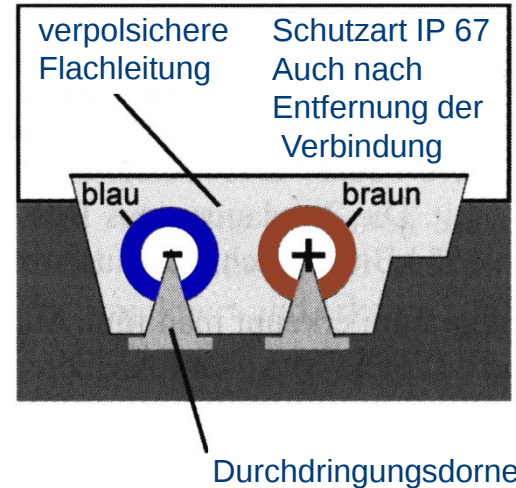
- Netzwerktopologie frei wählbar, außer Ring
- Stromversorgung über Bus
- Zugriffssteuerung durch Master-Slave-Verfahren
- Zykluszeit ≤ 5 ms (max. 31 Teilnehmer, Spezifikation 2.0)
- pro Telegramm 4 Bit Nutzdaten Slave an Master
 - Für Analogwertübertragung mehrere Telegramme notwendig
 - AS-i-Bus überwiegend für einfache Buskomponenten mit binären Signalen



AS-I-BUS (2)



- Länge einer Leitung max. 100m
- Verlängerung über Repeater möglich
- 2-adrige, ungeschirmte Kabel:
 - Standard-Rundkabel, oder
 - Verpolungssichere Flachbandleitung mit Durchdringungstechnik



Oberteil:
Anwender-
Modul

Unterteil:
Koppel-
modul



■ Profibus = Process Field Bus:

PROFIBUS DP „Dezentrale Peripherie“ für Fertigungstechnik

- Übertragungsgeschwindigkeit bis 12 Mbit/s
- Zykluszeit < 10 ms
- Elektrische Übertragung nach RS485-Standard (symmetrisch)
- Drei Protokoll-Varianten mit abgestufter Funktionalität verfügbar (DP-V0 bis DP-V2)

PROFIBUS PA „Prozess Automation“ für Prozess- und Verfahrenstechnik

- Strombegrenzung für explosionsgefährdete Bereiche
- Speisung der Feldgeräte möglich
- Übertragungsgeschwindigkeit bis 31,25 kBit/s
- Übertragung nach MBP-Standard

Allgemeine Merkmale: Mit Segmentkopplern können beide Varianten kombiniert werden

ÜBERTRAGUNGSVERFAHREN (PHYSICAL LAYER) BEIM PROFIBUS (1)

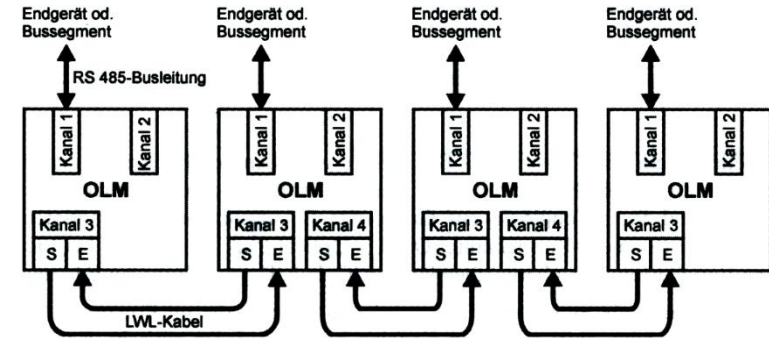


Elektrisch (RS-485 / EIA-485):

- 2-adrige, geschirmte Kabel (typischerweise lila)
- Linientopologie mit Abschlusswiderstand
- 12 MBit/s bis 100m - 9,6 kBit/s bis 1200m

Lichtwellenleiter (LWL):

- unempfindliche gegen elektromagnetische Störungen
- elektro-optische Koppler für Linien-, Ring-, oder Stern-Topologie
- Reichweite bis 15 km



ÜBERTRAGUNGSVERFAHREN (PHYSICAL LAYER) BEIM PROFIBUS (2)



Manchester Bus Powered (MBP):

- Datenübertragung und Speisung der Feldgeräte über dasselbe Kabel
- Einsatz in explosionsgefährlicher Umgebung möglich durch Leistungsbegrenzung
- Die Bustopologie kann bis zu 1900 Meter lang sein und lässt Abzweigungen zu den Feldgeräten mit maximal 120 Meter Länge zu.
- Bitrate: 31,25 kbit/s
- MBP ist speziell für den Einsatz in der Prozessautomation für PROFIBUS PA festgelegt worden.

INDUSTRIAL ETHERNET IM VERGLEICH



Industrial Ethernet = Industrielles Bussystem basierend auf Ethernet-Standard für Physical Layer

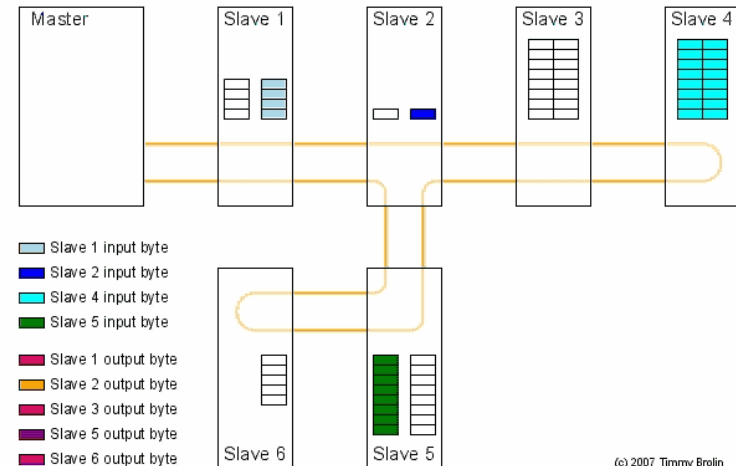
- **Kein einheitliches Protokoll wie TCP/IP für IT- Kommunikation**
- **Nicht direkt mit Ethernet TCP/IP kompatibel**

Protokolle nach Entwicklungsziel:

- Encapsulation-Systeme: Ethernet/IP, Foundation Fieldbus HSE, Modbus-TCP
- Systeme für verteilte Automatisierung: ProfiNet CBA
- Systeme für Echtzeitkommunikation: Profinet IO, Powerlink, EtherCAT, SERCOS III



- **Verändertes Zugriffsverfahren auf Ethernet-Frames zur Reduzierung der Zykluszeit**
- **Frames werden „on-the-fly“ gelesen und geschrieben**
- **Slaves sind mit speziellen FPGAs ausgestattet**
- **Zykluszeit: 11 μ s für 256 digitale E/A**
- **Vergleich AS-i-Bus: ≤ 5 ms für 31 digitale E/A**



(c) 2007 Timmy Brolin

FEHLERSICHERE KOMMUNIKATION ÜBER BUSSYSTEME



- Eine absolute Vermeidung von Fehlern ist unmöglich.
- Wichtig ist die Erkennung und Beherrschung von Fehlern

Sicherheitsansätze bei Feldbussen:

- **Sicherheitsbus**
 - Eigenes Bussystem für Sicherheits-Schaltgeräte parallel zu Standardbus
 - Mehrkanalige Steuergeräte zur Signalverarbeitung (z. B. drei Prozessoren unterschiedlicher Hersteller)
 - Beispiel: SafetyBUS p (Fa. Pilz)
- **Fehlersichere Kommunikation über Standardbus**
 - Nutzung des Standardbus für Sicherheits-Kommunikation
 - Entwicklung von Erweiterungen zur sicheren Erkennung von Ausfällen

FEHLERSICHERE KOMMUNIKATION ÜBER STANDARD-BUSSYSTEME



- „Safety at Work“ bei AS-i-Bus
- „ProfiSafe“ bei PROFIBUS-DP

Funktionsprinzip:

- Anschluss von Sicherheitsvorrichtungen (Notaus/Sicherheitsrelais) an spezielle Sicherheits-Master/Slaves
- Betrieb am Bus mit anderen Teilnehmern
- Kommunikation zwischen den Sicherheits-Komponenten wird überwacht
 - Slaves werden regelmäßig abgefragt (Echtzeit)
 - Antworttelegramme sind nummeriert
- **Not-Aus wird ausgelöst wenn:**
 - Slave meldet Not-Aus
 - Antworttelegramm verloren
 - Antwort zu spät