

Präsenz-Podcasts

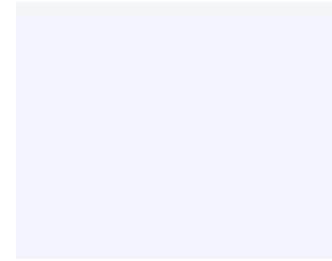


Automatisierungstechnik

Bernhard Kurz

1. Grundlagen, Begriffe
2. Informationsverarbeitung
3. Steuerungstechnik
4. SPS-Programmierung
5. Regelungstechnik
6. Übertragungscharakteristika
7. Regelkreisverhalten
8. Frequenzverhalten

Impressum



Verfasser

Prof. Dr. B. Kurz in Teilen nach Prof. Dr. G. Achhammer (FS 2011)

Lektorat

Dipl.-Ing. Jens v. Aspern
Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Hamburger Fern-Hochschule

Redaktionsschluss

Oktober 2013

1. Auflage 2013

© HFH · Hamburger Fern-Hochschule, Alter Teichweg 19 – 23a, 22081 Hamburg

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte insbesondere das Recht der Vervielfältigung und der Verbreitung sowie der Übersetzung und des Nachdrucks, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form ohne schriftliche Genehmigung der Hamburger Fern-Hochschule reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Präsenz-Podcast – Folge 1



Automatisierungstechnik

Bernhard Kurz

Grundlagen und Begriffe

- Zielsetzungen
- Komponenten, Klassifikationen
- Prozessleit- und Kommunikationstechnik
- Softwarekomponenten
- technische Anforderungen

Ziele, Begriffe

▪ Ziele

Ökonomie (Qualität, Produktivität), Ökologie (Emissionen, Betriebssicherheit), Ergonomie (Arbeitssicherheit, Humanisierung)

Prozess-Stabilisierung, -Beherrschung, -Optimierung, -Sicherheit

▪ Gefahren

Rationalisierung, Monotonie

Technikabhängigkeit, Störanfälligkeit, Investitionsrisiken

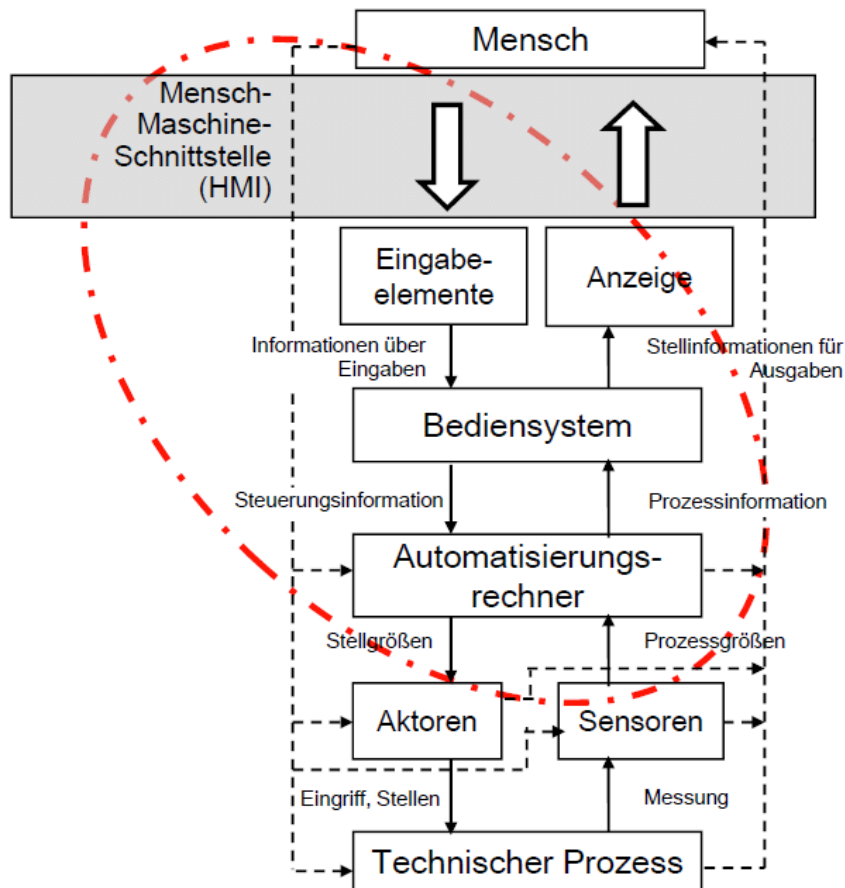
▪ Lebenszyklen

Planen, Errichten, Betreiben, Erneuern/ Entsorgen

▪ Prozess (DIN 66201)

Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Informationen umgeformt, transportiert oder gespeichert wird.

Systemkomponenten



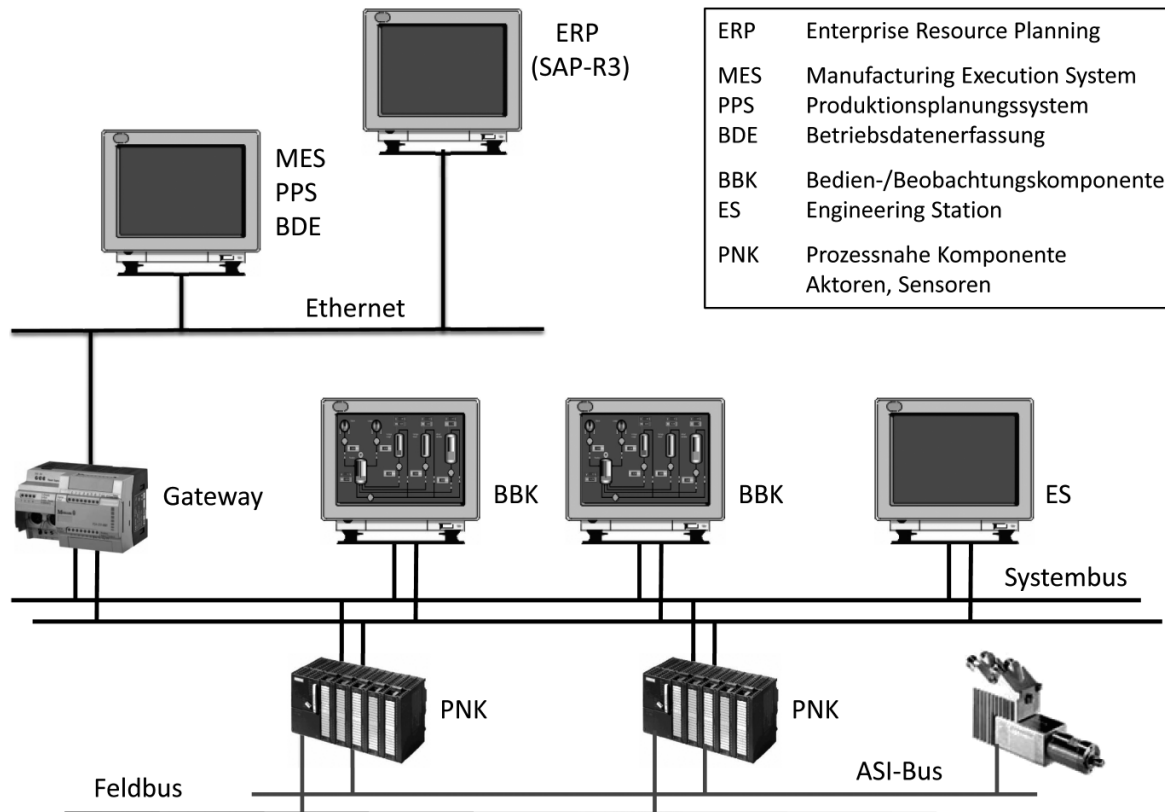
Funktionen:

- Bedienen, Beobachten, Visualisieren
- Dokumentieren, Archivieren
- Informationsverarbeitung (SPS, IPC), Kommunikation, Bussysteme
- Steuern, Regeln, Rechnen
- Messen, Stellen (MSR)
- Sensoren, Aktoren, Signalwandlung
- Die **Leittechnik** unterstützt alle Maßnahmen, die einen erwünschten, zielgerichteten Ablauf eines Prozesses bewirken. Die Maßnahmen werden vorwiegend unter Mitwirkung des Menschen aufgrund der aus dem Prozess oder aus der Umgebung erhaltenen Daten mit Hilfe der Leiteinrichtung getroffen.

Prozessklassifikation

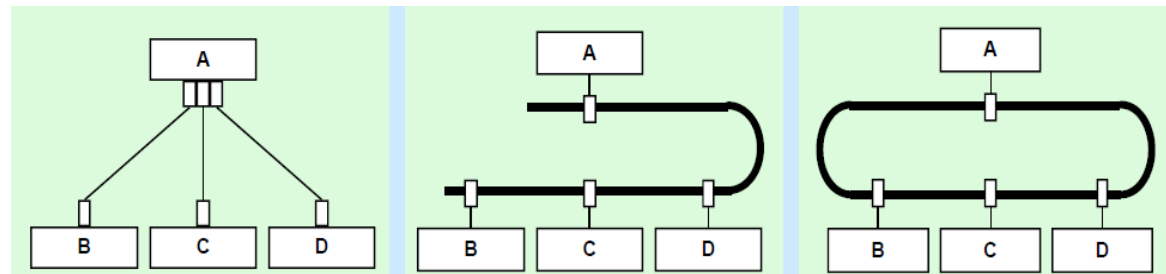
- **kontinuierliche Vorgänge** (typisch für verfahrenstechnische Prozesse),
bei denen zeitabhängige kontinuierliche Prozessgrößen (physikalische Größen) auftreten.
beschreibbar durch Differentialgleichungen und Übertragungsfunktionen;
Beispiel: Umformvorgänge, Energieerzeugung, Stahlerzeugung
- **sequentielle Vorgänge** (typisch für fertigungstechnische Prozesse),
bei denen Folgen von verschiedenen, unterscheidbaren Prozesszuständen auftreten,
gekennzeichnet durch binäre Prozessgrößen.
beschreibbar durch Flussdiagramme, Funktionspläne, Zustandsmodelle, Petri-Netze;
Beispiel: Anfahren einer Turbine, flexible Fertigungszelle
- **objektbezogene Vorgänge** (typisch für fördertechnische Prozesse),
bei denen einzeln identifizierbare Objekte umgepackt, transportiert oder gespeichert werden.
beschreibbar durch Simulationsmodelle, Warteschlangenmodelle, Graphen, Petri-Netze;
Beispiel: Lagervorgänge, Supply Chain

Prozessleitsystem



Bussysteme

- Bus:** linienförmiges Sammelleitungssystem zur Informationsübertragung, an das alle Geräte, Rechner usw. abzweigend angeschlossen sind.
- Typologie:** Feldbus/Prozessbus, Fabrikbus/Systembus
- Busperformance:** beschreibt Zeitverhalten und Übertragungsleistung des Bussystems (Baud = Bit/s)
- Busstrukturen:** Stern, Linie, Ring



- Zugriffsverfahren:** deterministisch – Master-Slave, Token, Zeitmultiplex (TDMA)
zufällig – Ereignis gesteuert, Carrier Sense (CSMA)
- bekannte Bussysteme:** Ethernet, CAN, FF, HART, Interbus, Profibus, Bitbus, Modbus
ASI, MOST, FlexRay, EIB/KNX, InstaBus, Bluetooth, USB

Softwarekomponenten

- **Systemsoftware**
zur Organisation und Verwaltung des Rechnerbetriebs
(Betriebssystem, Medien- und Programmiersystem, Dienstsysteme)
- **Firmware**
in dezentralen Peripheriekomponenten enthaltene Steuerungssoftware
(embedded system)
- **Anwendungssoftware**
Zusammenfassung aller prozessspezifisch ausgeführten Programme und Daten
- **Visualisierungssoftware**
informativische Schnittstelle zum Bediener mit funktionellen und ergonomischen Anforderungen (vgl. ISO 9241 Softwareergonomie)

Technische Anforderungen

Allgemeine Anforderungen an ein Automatisierungssystem

- Verfügbarkeit Redundanz (USV, SS-Disk, MTBF),
- Sicherheit, Zuverlässigkeit (IP-Schutzklasse, SIL-Klasse),
- Offenheit, Durchgängigkeit, Interoperabilität (Kompatibilität)
- Echtzeitfähigkeit/Realtime = Rechtzeitigkeit und Gleichzeitigkeit
d. h. zeitgerechte Bedienung von Prozessen (mit T_m , T_{az} , T_p) durch System (T_e , T_a , T_b)

<p>Es gilt: $T_e \leq T_m$ $T_a \leq T_{az}$ $T_b \leq T_p$</p>
--

Meldezeit T_m

Zeit, in der ein Signal ansteht

Erfassungszeit T_e

Zeit, nach der ein Signal durch den Prozessrechner erfasst wird

Bearbeitungszeit T_b

Zeit, die für die Bearbeitung (des Prozessrechners) benötigt wird

Antwortzeit T_a

Zeit vom Eintreten des Ereignisses bis zur Ausgabe des Stellgliedes

Zulässige Antwortzeit T_{az}

Zeit, innerhalb der das Stellsignal ausgegeben sein muss

Prozesszeit T_p

Zeitabstand zwischen zwei folgenden Ereignissen (Zyklus)

Präsenz-Podcast – Folge 2



Automatisierungstechnik

Bernhard Kurz

Informationsverarbeitung

- Digitale Informationsdarstellung
- Arithmetik und Logik
- Schaltalgebra, Kombinatorik
- Steuerungstechnik, Schaltwerke

IT im Prozess

Automatisierungssysteme sind informationsverarbeitende Systeme!

- **Information:** zielgerichtete Mitteilung (Adressat) [Zuruf]
- **Signal:** zeitlicher Verlauf des physikalischen Abbilds (Elektrizität, Pneumatik, Licht, EM-Welle) einer Information [digital: 1/H – 0/L – Folge]
- **Codierung:** Zuordnung einer bestimmten Information zu einer vereinbarten Darstellung: Umsetzungsvorschrift = Code
- **Zeichen:** textuelle, durch Codierung entstandene Darstellungseinheit [„HALLO“]
- **Binäre Codierungsformen:**
 - Zur Darstellung von z Zuständen sind Kombinationen von n zweiwertigen Signalen (Bits) erforderlich: es gilt $z = 2^n$, bspw. 1 Byte = 8 Bits, $z = 2^8 = 256$
 - Numerische Codes: dienen zur Codierung von Werten (Zahlen) (Beispiele: Dual- / Binärcode, BCD-Code / 4Bit)
 - Alphanumerische Codes: Verwendung aller Zeichen eines verfügbaren Zeichensatzes (Beispiel: ASCII / 8Bit)

Binäre Arithmetik

- **Binäres Zahlensystem:** Dualcode und Hex-Darstellung
- **Dual-Dezimal-Umwandlungen** mit Kommastellen
(fortgesetzte Division/Multiplikation mit 2)
- **Addition:** wie im Dezimalsystem (Übertrag!)
- **Subtraktion:** durch Addition des Zweierkomplements des Subtrahenden
(höchsten Übertrag streichen!)
- **Zweierkomplement:** einzelne Bits der Zahl invertieren (negieren)
und 1 addieren
- **Multiplikation/Division** durch fortgesetzte Addition/Subtraktion (s.o.)
- Gleitkommadarstellung zur Bereichserweiterung
 $17.35 = + 0.1735 \cdot 10^2 \rightarrow + 2 \ 1735$ (Vorzeichen, Exponent, Mantisse)

Arithmetik Beispiele

1. Wandlung Dual in Dezimal

$$\begin{aligned}
 1011,011 &= 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2} + 1 \cdot 2^{-3} \\
 &= 1 \cdot 8 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,25 + 1 \cdot 0,125 = \mathbf{11,375}
 \end{aligned}$$

2. Hexadezimal in Dual und Dezimal

$$2FA_H = 0010\ 1111\ 1010 = 2 \cdot 16^2 + 15 \cdot 16^1 + 10 \cdot 16^0 = \mathbf{762}$$

3. Subtraktion durch Addition mit Zweierkomplement im 4-Bit-Dualsystem

Umwandlungen:

9: 1001

3: 0011 \rightarrow invertieren: 1100

-3: 1101 \leftarrow plus „1“: + 0001

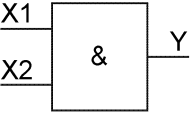
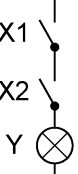
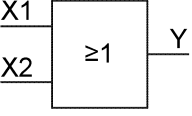
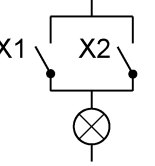
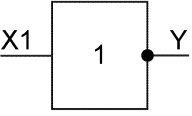
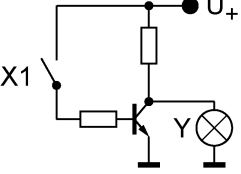
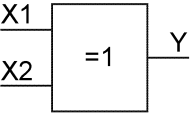
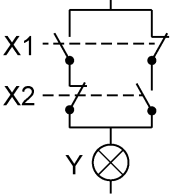
Berechnung:

+ 9: 1001

+ (-3): +1101

+ 6: ~~4~~0110 (höchsten Übertrag streichen!)

Logische Verknüpfungen

Bezeichnung	Symbol	Wertetabelle	Schaltfunktion	Realisierung															
UND (AND)		<table border="1"> <thead> <tr> <th>X1</th> <th>X2</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	X1	X2	Y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	$Y = X1 \wedge X2$	
X1	X2	Y																	
0	0	0																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	1																	
ODER (OR)		<table border="1"> <thead> <tr> <th>X1</th> <th>X2</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	X1	X2	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	$Y = X1 \vee X2$	
X1	X2	Y																	
0	0	0																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	1																	
NICHT (NOT)		<table border="1"> <thead> <tr> <th>X1</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	X1	Y	0	1	1	0	$Y = \overline{X1}$										
X1	Y																		
0	1																		
1	0																		
Antivalenz (XOR)		<table border="1"> <thead> <tr> <th>X1</th> <th>X2</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	X1	X2	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	$Y = \overline{X1} \wedge X2$ $\vee X1 \wedge \overline{X2}$	
X1	X2	Y																	
0	0	0																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	0																	

Schaltalgebra

Variable mit 0 oder 1:

$$A \vee 0 = A$$

$$\text{bzw. } A \wedge 0 = 0$$

$$A \vee 1 = 1$$

$$\text{bzw. } A \wedge 1 = A$$

Variable mit sich selbst:

$$A \vee \bar{A} = 1$$

$$\text{bzw. } A \wedge \bar{A} = 0$$

Distributivgesetz:

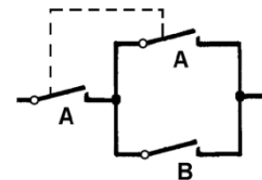
$$A \wedge (B \vee C) = (A \wedge B) \vee (A \wedge C)$$

$$A \vee (B \wedge C) = (A \vee B) \wedge (A \vee C)$$

Absorptionsgesetz:

$$A \wedge (A \vee B) = A$$

$$A \vee (A \wedge B) = A$$

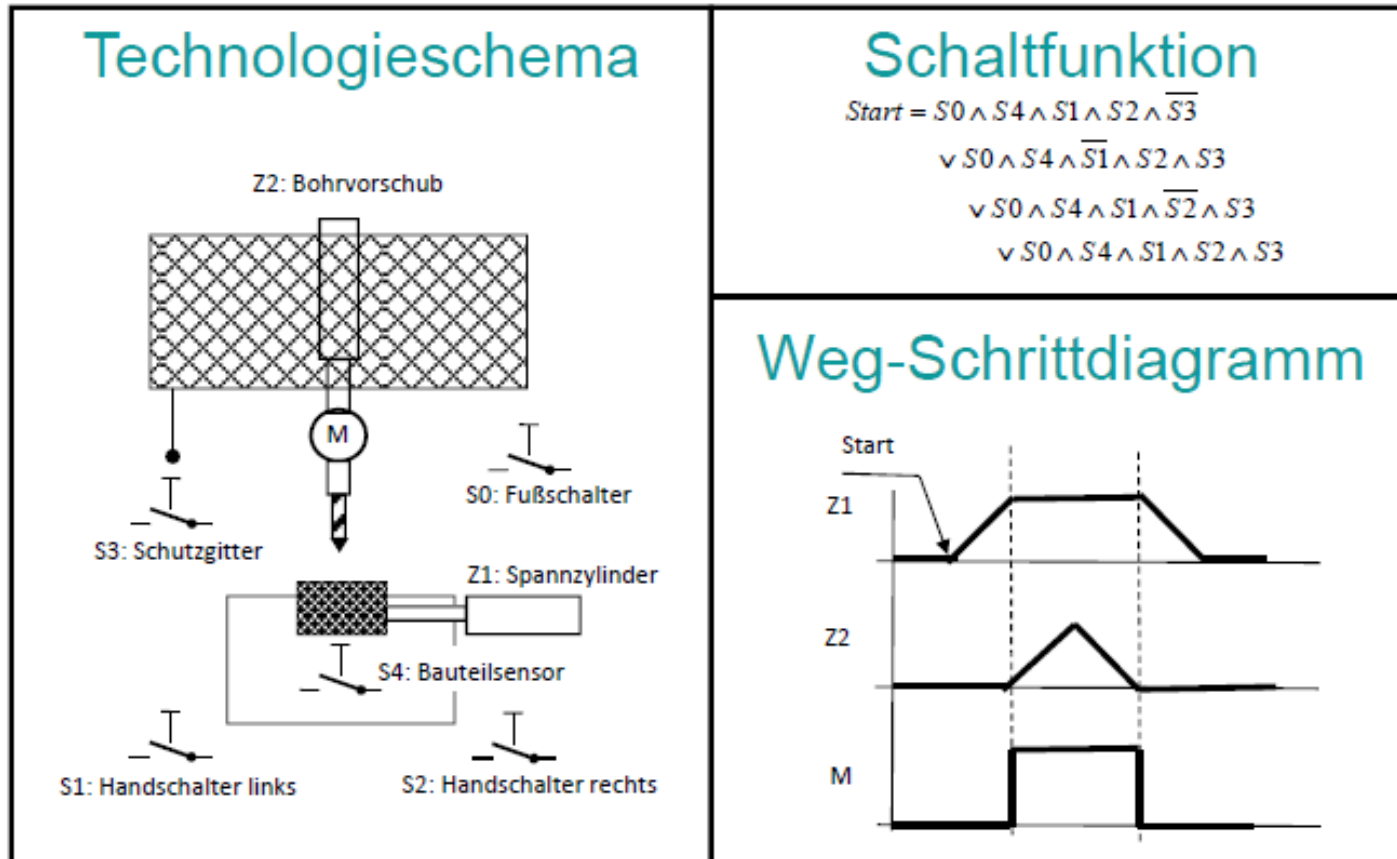


De-Morgan-Regel:

$$\overline{A \wedge B} = \bar{A} \vee \bar{B}$$

$$\text{bzw. } \overline{A \vee B} = \bar{A} \wedge \bar{B}$$

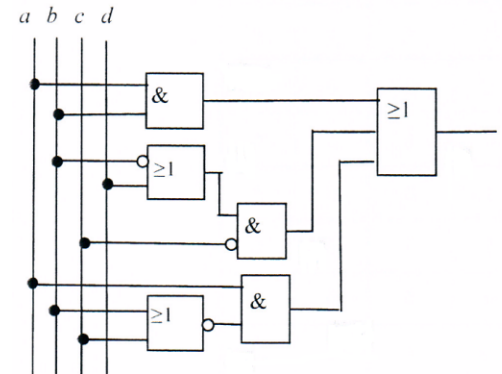
Steuerungstechnik



Schaltfunktion Beispiele

1. Ermitteln Sie den Logikplan zur Schaltfunktion

$$y = ab \vee (\bar{b} \vee d)\bar{c} \vee a(\bar{b} \vee c)$$



2. Heizungssteuerung mit Heizungspumpe A1 (1 = ein) und Warmwasserpumpe A2 (1 = ein) sowie Warmwassersensor E1 (1 = T erreicht), Tag-Nacht-Sensor E2 (1 = Tag) und Raumsensor E3 (1 = T erreicht).

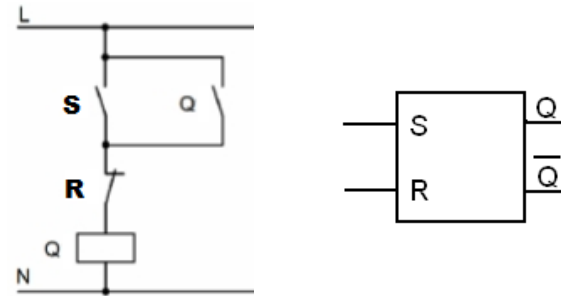
Steuerung: Bei Nacht Heizungspumpe aus, bei niedriger Raumtemperatur vorrangig Heizungspumpe ein und Warmwasserpumpe aus, bei niedriger Warmwassertemperatur Warmwasserpumpe ein und Heizungspumpe aus.

- Ermittlung der Funktions- / Wertetabelle
- Schaltfunktion für A2: $A2 = \bar{E1} \wedge E2 \wedge \bar{E3} \vee E1 \wedge E2 \wedge \bar{E3}$
- Minimierung mittels Schaltalgebra oder KV-Diagramm

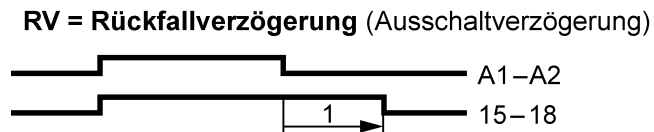
Zustand	E3 Raum- temp. erreicht	E2 Tag	E1 Warmwasser- temp. erreicht	A2 Heizung- pumpe	A1 Warmwasser- pumpe
0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	0
2	0	1	0	1	0
3	0	1	1	1	0
4	1	0	0	0	1
5	1	0	1	0	0
6	1	1	0	0	1
7	1	1	1	0	0

Schaltwerke

- RS-Speicherfunktion
Selbsthaltung, dominant Rücksetzen

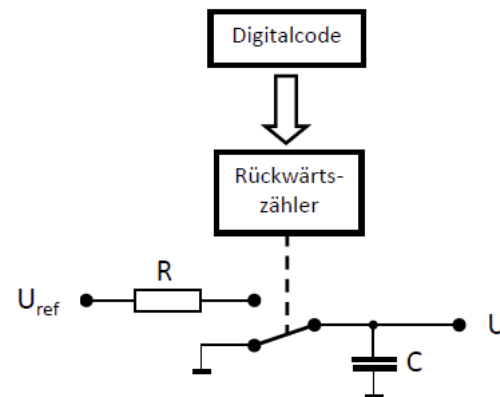


- Timer:
Einschalt-/Ausschaltverzögerung



- Counter:
Vorwärts-/Rückwärtszähler

- AD- und DA-Wandler:
1-Bit-DAC, Dual-Slope-ADC



Präsenz-Podcast – Folge 3



Automatisierungstechnik

Bernhard Kurz

Steuerungstechnik

- Begriffe, Struktur, Klassen
- SPS-Aufbau und Funktionen
- Betriebsart, Echtzeit
- Programmieroptionen

Begriffe und Struktur

- **Steuern**

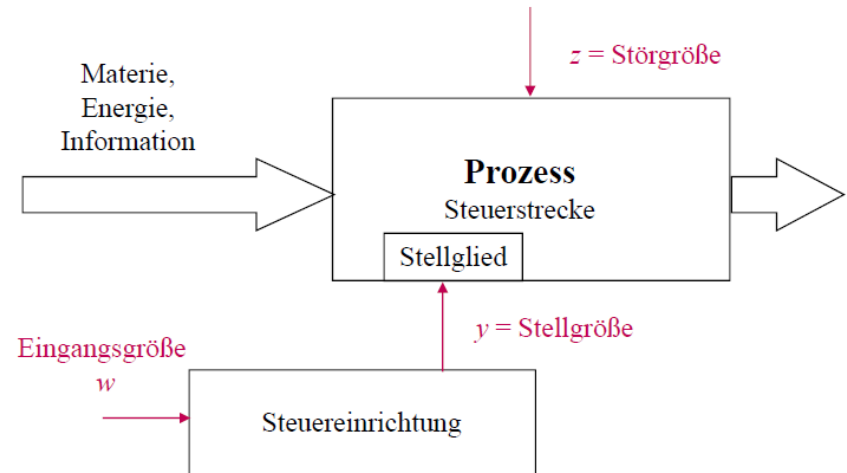
Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen.

- **Blockschaltbild**

- **Kennzeichen einer Steuerung**
(im Ggs. zur Regelung)

Offener Wirkungsweg, Wirkungskette:
kein (kontinuierlicher) Wirkungsweg führt von einer beeinflussten zu einer beeinflussenden Größe zurück (keine Rückkopplung/Feedback),
d. h. auf Störgrößen kann nicht oder nur bedingt reagiert werden.

Beispiel: unterschiedliche Raumtemperatur trotz konstantem Wärmeeintrag (Stellgröße) bei geschlossenem bzw. offenem Fenster (Störung)

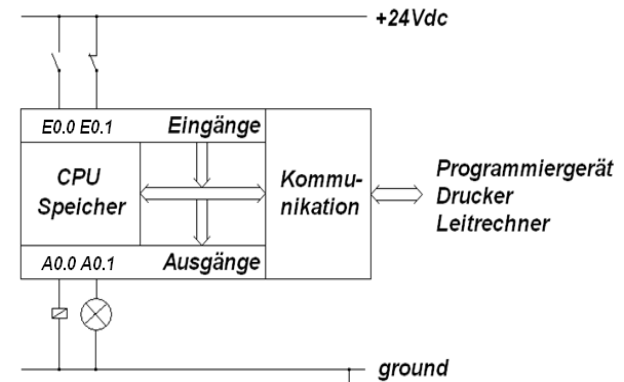
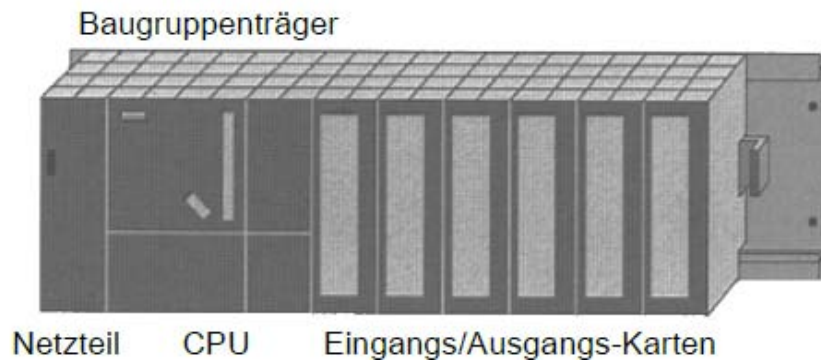


Steuerungsarten

- **Verknüpfungssteuerung:** den Signalzuständen der Eingangssignale sind bestimmte Signalzustände der Ausgangssignale im Sinne boolescher Verknüpfungen zuordnet.
- **Führungssteuerung:** zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen besteht ein wert- / funktionsmäßiger Zusammenhang (z.B. Heizprofil).
- **Ablaufsteuerung:** zwangsläufig schrittweiser Ablauf, bei der das Weiterschalten von einem auf den programmgemäß folgenden Schritt abhängig von einer Weiterschaltbedingung erfolgt. Dies kann zeitgeführt (Ampel), weggeführt (Kopierfräsen) oder prozessgeführt (Waschmaschine) erfolgen.
- **VPS – verbindungsprogrammierte Steuerung:** Realisierung der Verarbeitungsfunktionen durch funktionsbezogene Schaltungen (mit Schalter, Relais, Schütz) oder ICs (ASIC, F-PGA).
- **SPS – speicherprogrammierbare Steuerung:** Realisierung der Steuerungsfunktion durch Software, wobei bevorzugt binäre Eingangssignale zu binären Ausgangssignalen verarbeitet werden. Die Verarbeitungsfunktionen werden durch Programme realisiert.

SPS – Merkmale

- **Kompakt-SPS, Modul-SPS, Soft-SPS**



- **Grundfunktionen**

Verarbeitung binärer Signale (von Kontakten, Initiatoren, Schaltern, Lichtschranken u.a. zum Schalten von Motoren, Ventilen, Lampen, Magneten, Anzeigen etc.), Zähl- und Zeitfunktionen (Counter, Timer) sowie arithmetische Rechen- und Vergleichsfunktionen

- **Module (steckbare Ein-/Ausgangs-Karten)**

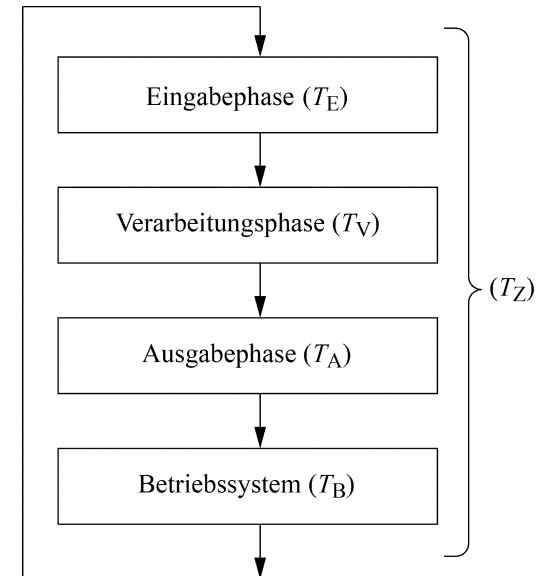
Stromversorgung/Netzteil, CPU-/ALU-Modul, Kommunikationsmodul (Programmierung, ASI-Bus), E/A-Signalmodule (binäre, digitale, analoge Sensoren und Aktoren), Funktionsmodule (Scanner, Schrittmotoren etc.)

SPS-Funktionsweise

- **Betriebsart:** Im Gegensatz zu einer VPS zeigt eine SPS aufgrund der sequentiellen Programmabarbeitung nur ein quasiparalleles Verhalten mit den Bearbeitungsschritten: Einlesen der Signalzustände der Signalglieder (Sensoren), Verarbeitung der programmierten Verknüpfungsalgorithmen, Ausgabe der resultierenden Signalzustände an Stellglieder und Aktoren.

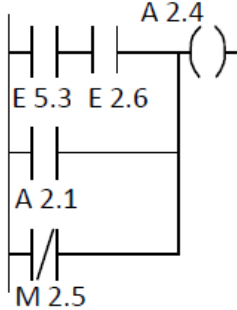
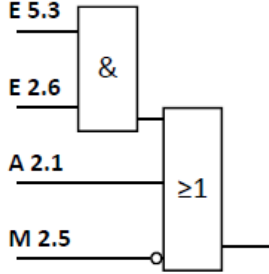
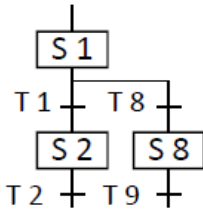
- **Realtime:** Das Steuerungsprogramm wird in einer Endlosschleife durchlaufen; typisch für einen Programmdurchlauf ist die Zykluszeit T_Z (t_C), die maßgeblich das Echtzeitverhalten der Steuerung bestimmt:

- Meldezeit $T_Z \leq T_m$
- zulässige Antwortzeit $T_Z \leq T_{az} / 2$ (*)
- Prozesszeit $T_Z \leq T_p / 2$



- (*) Ändert sich ein Sensorsignal erst kurz nach der Eingabephase, so dauert es etwa einen Zyklus, bis dies erfasst wird, und einen weiteren, bis die entsprechende Reaktion (Ausgabe) erfolgt!

Programmieroptionen

Anweisungsliste (AWL)	Strukturierter Text (ST)	Kontaktplan (KOP)	Funktionsbausteinsprache (FBS)	Ablaufsprache (AS)
Start: LD A AND B OR C ST D	IF i = k THEN ... ELSE ...			

Programmieroptionen je nach Einsatzfeldern und Komplexität der Steuerung:

- AWL, FUP/FBS und KOP vorzugsweise für logische Verknüpfungen
- AS speziell für Schrittketten, Prozessabläufe
- ST als Hochsprachenersatz

Optionen für Programmstrukturierung und Inbetriebnahme:

- Netzwerke, Merker, Instanzierungen
- Monitoring, Forcing

Präsenz-Podcast – Folge 4



Automatisierungstechnik

Bernhard Kurz

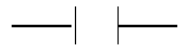
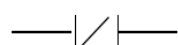
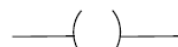
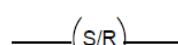
SPS-Programmierung

- Kontaktplan KOP
- Funktions-/Logikplan FUP/FBS
- Anweisungsliste AWL
- Schrittkette, Ablaufsteuerung AS

Kontaktplan

Zur Realisierung von verbinungsprogrammierten (Schaltpläne) Steuerungen

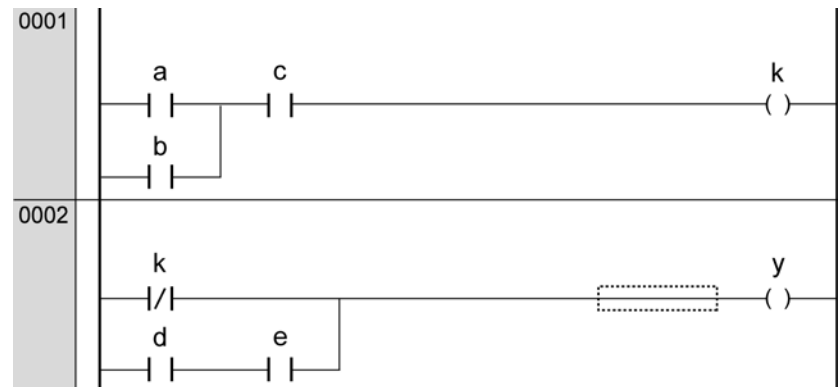
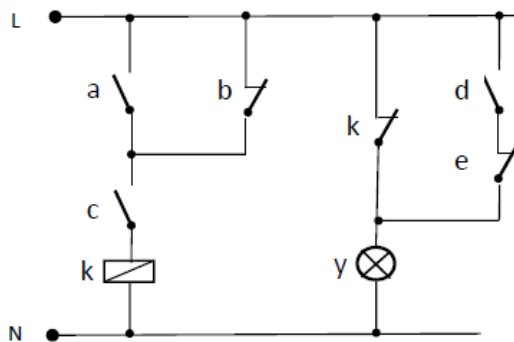
Begrenzte Programmiervielfalt!

	Abfrage auf 1 (Schaltkontakt geschlossen)
	Abfrage auf 0 (Schaltkontakt offen)
	Zuweisung
	Zuweisung mit SET- bzw. RESET-Funktion

▪ Anmerkung

Bei Abfrage auf 0 oder 1 geht es nur um „Kontakt geschlossen“ oder „Kontakt offen“, nicht um „Kontakt betätigt“ oder „Kontakt nicht betätigt“ bzw. „Schließer“ oder „Öffner“!

▪ Beispiel: Schaltplan (links) – KOP (rechts)

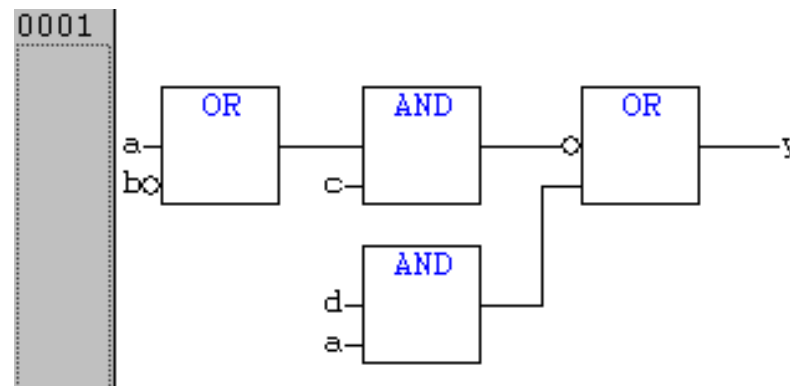


Funktionsplan

Die Funktionsplansymbole entsprechen im Wesentlichen den Logiksymbolen (AND, OR, NOT, XOR etc.) und werden durch eine Vielzahl von Zusatzfunktionen (RS, Timer, Counter etc.) zur vollständigen Programmiervielfalt ergänzt.

Beispiel: Schaltfunktion (links) – FUP (rechts)

$$y = \overline{(a \vee \bar{b})} \wedge c \vee d \wedge a$$



Anweisungsliste

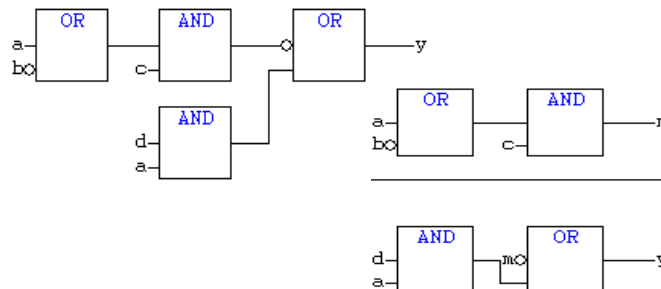
Die Anweisungsliste ist eine maschinennahe Programmieroption mit einer Vielzahl von Operatoren, die syntaktisch korrekt einzusetzen sind.

- Ausgewählte Operatoren

LD	laden	XOR	ENTWEDER-ODER
LDN	negierten Wert laden	S	auf 1 setzen
ST	speichern	R	auf 0 setzen
STN	negierten Wert speichern)	Klammer zu
AND	UND	JMP	Sprung
AND(UND Klammer auf	JMPC	bedingter Sprung
ANDN	UND NICHT	CAL	Funktionsaufruf
OR	ODER	RET	Rückkehr aus Funktion

- Beispiele: ohne (links)/mit (rechts) Merker (Mitte: zugehörige FUPs)

```
LD      a
ORN     b
AND     c
NOT
OR      (
AND     a
)
ST      y
```

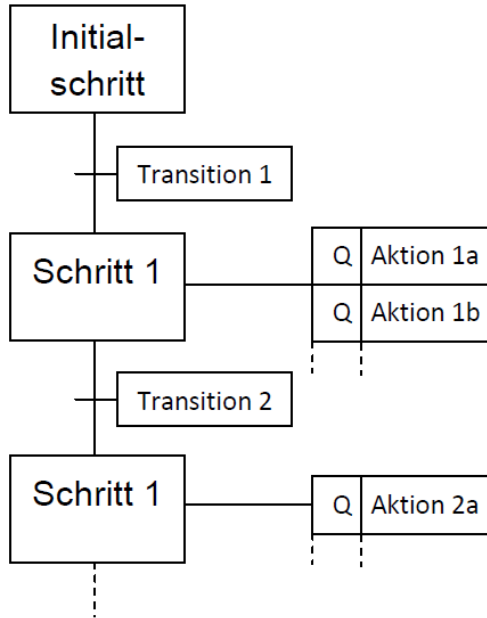


```
LD      a
ORN     b
AND     c
ST      m
LDN     m
OR      (
AND     a
)
ST      y
```

Schritt-kette - Struktur

Zur einfachen Programmierung von durch Prozesszustände (Transition, Fortschaltbedingung) ausgelösten Prozessschritten mit zugehörigen Aktorsteuerungen (Aktionen) dient die Ablaufsteuerung AS.

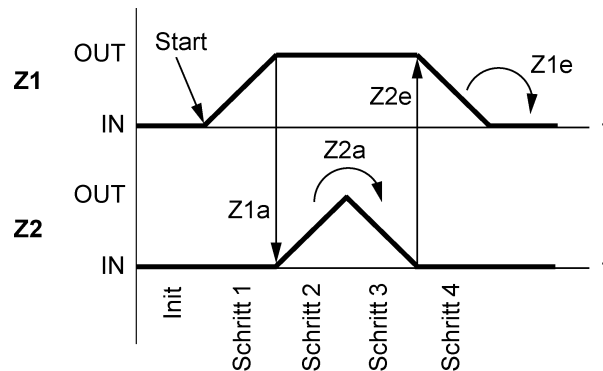
- Die Aktionen werden durch Qualifizierer (Q) spezifiziert, je nachdem, ob eine Aktion nur im aktuellen Schritt (N) oder über mehrere hinweg (S, R) wirken soll bzw. zeitbestimmt (D, L, P) o.ä. ist.



- Schritt-ketten können parallel verzweigen, in Alternativzweige münden und Sprünge innerhalb des Ablaufes aufweisen.

Schrittfolge-Beispiel

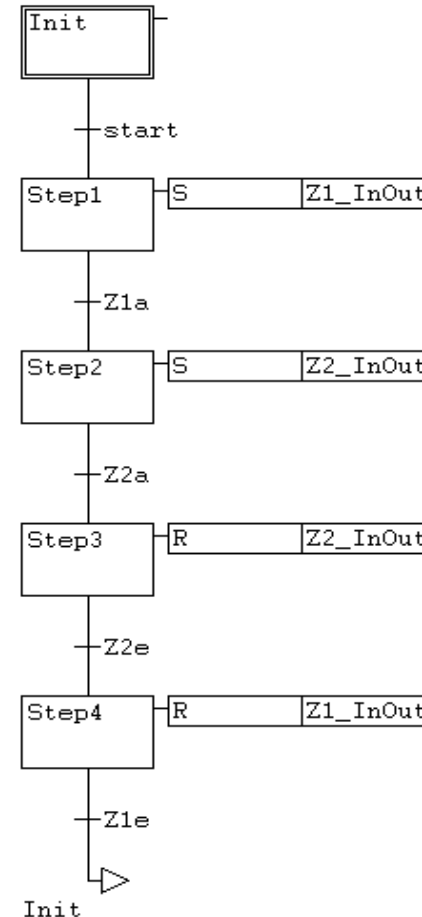
Eine einfacher Fertigungsautomat besteht aus zwei einfach wirkenden Zylindern (Z1, Z2), deren jeweilige Endstellungen (IN, OUT) durch entsprechende Positionsschalter (Z1e, Z1a, Z2e, Z2a) erfasst werden. Mit dem Start-Signal wird die im Weg-Schritt-Diagramm gezeigte Bewegungsabfolge ausgelöst.



```

VAR_INPUT
start:BOOL;      (*Starttaster*)
Z1a:  BOOL;      (*Position Z1 ausgefahren*)
Z2a:  BOOL;      (*Position Z2 ausgefahren*)
Z1e:  BOOL;      (*Position Z1 eingefahren*)
Z2e:  BOOL;      (*Position Z2 eingefahren*)
END_VAR
VAR_OUTPUT
Z1_InOut: BOOL;  (*1=Ausfahren Z1, 0=Einfahren Z1*)
Z2_InOut: BOOL;  (*1=Ausfahren Z2, 0=Einfahren Z2*)
END_VAR

```



Präsenz-Podcast – Folge 5



Automatisierungstechnik

Bernhard Kurz

Regelungstechnik

- Problemstellung, Zielsetzungen
- Struktur und Blockschaltbild
- Übertragungsfunktion
- Regelkreis

Aufgabenstellung, Ziele

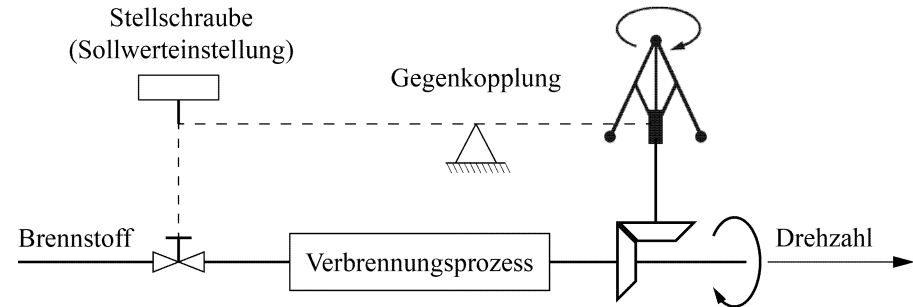
Bei der Positionseinstellung eines Roboterarms oder eines Krans ist zu beobachten, dass das Ausschalten der Antriebe bei Erreichen der Zielposition zu einem mehr oder minder starken „Nachschwingen“ des bewegten Objekts führen. Hinzu kommt, dass die Präzision der eingestellten Zielposition von der Objektlast (Werkzeug, Bauteil) oder von störenden Umgebungseinflüssen (Wind) beeinflusst wird. Somit treten folgende Fragestellungen auf:

- **Regelgenauigkeit:** Wird die primäre Zielsetzung Istposition = Sollposition genau erreicht bzw. mit welcher Abweichung?
- **Störungskompensation:** Wie reagiert das System auf Störungen (Wind) und werden diese vollständig oder teilweise ausgeglichen?
- **Dynamik und Stabilität:** Mit welchem Zeitverhalten (Einschwingen) und wie schnell erfolgt das Einstellen auf Sollposition und ist immer das Erreichen einer stabilen Endposition gewährleistet?

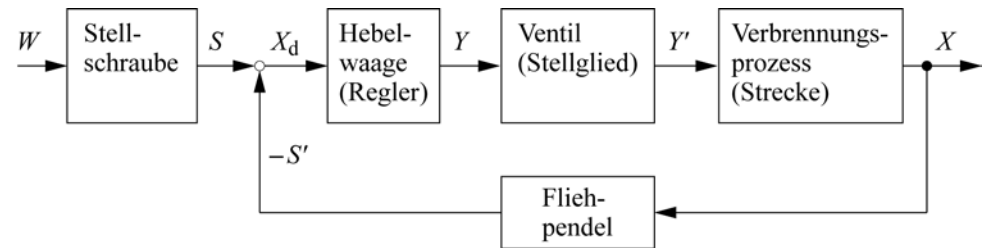
Die Überprüfung dieser Fragestellungen kann mathematisch durchgeführt werden, setzt hierzu aber die Kenntnis der **Systemstruktur** sowie der **Übertragungseigenschaften** aller Systemkomponenten voraus.

Signalflussplan

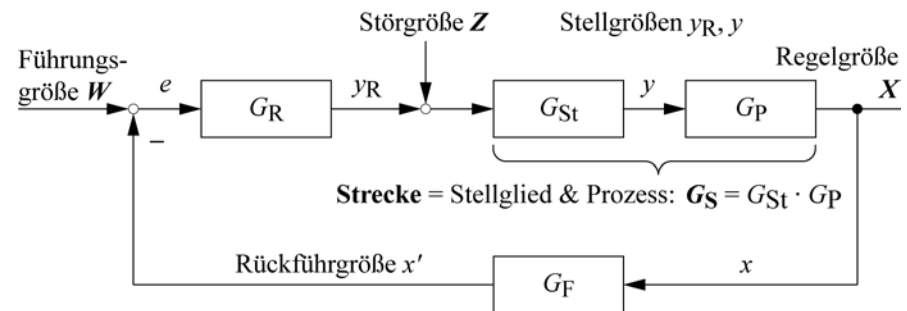
Zur Beschreibung der wirkungsmäßigen Zusammenhänge der Systemkomponenten dienen Technologieschema (oben) und vorzugsweise **Signalflussplan** bzw. **Blockschaltbild** (unten).



Dabei tritt die jeder Regelung typische **Kreisstruktur** mit Rückführung zutage (Wirkungskreis).



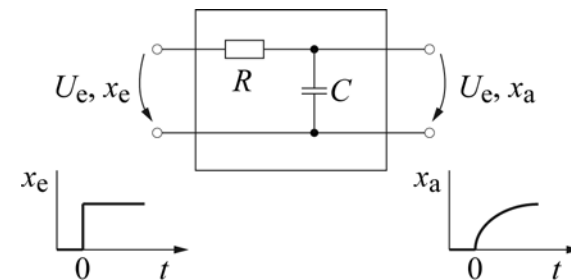
Durch Zusammenfassungen und Vereinheitlichungen entsteht die Regelkreisgrundstruktur mit Regler (G_R), Strecke / Prozess (G_S) und Messfühler / Sensor (G_F) sowie den festgelegten Signalbezeichnungen.



Übertragungsfunktion

Für die mathematische Analyse der Zielsetzungen jeder Regelkreisstruktur, d. h. Regelgenauigkeit (Istwert = Sollwert), Störungskompensation, Stabilität & Dynamik, muss für jedes **Regelkreisglied** eine Funktion zwischen Eingangs- und Ausgangssignal verfügbar sein, vorzugsweise als Laplace transformierte **Übertragungsfunktion $G = x_a / x_e$** .

Diese ermittelt man aus der Differentialgleichung oder dem komplexen Frequenzgang des Übertragungselements.



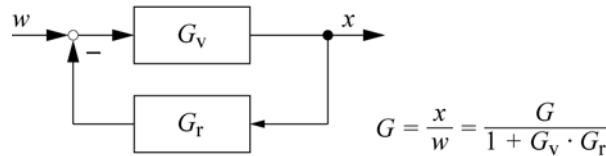
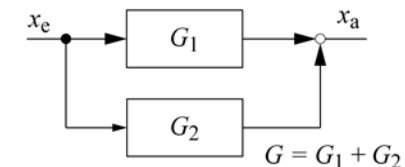
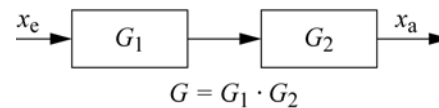
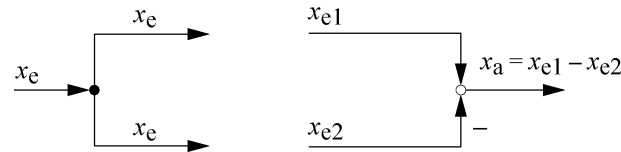
Beispiel: RC-Glied

- Differentialgleichung $U_e = U_a + RC \cdot \frac{dU_a}{dt}$ mit $T = R \cdot C$: $T \cdot \dot{U}_a + U_a = U_e$
- Frequenzgang $F(j\omega) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{\underline{X}_C}{R + \underline{X}_C} = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega \underbrace{RC}_T}$ für $j\omega = p \rightarrow G(p)$
- Übertragungsfunktion $T \cdot p \cdot U_a(p) + U_a(p) = U_e(p)$ bzw. $\frac{U_a(p)}{U_e(p)} = \frac{1}{1 + p \cdot T} = G(p)$

Regelkreisfunktionen

Blockschaltbildalgebra

- Verzweigung, Addition
- Parallel-, Serienschaltung
- Kreisstruktur



Regelkreisübertragungsfunktionen

- Führungsübertragungsfunktion G_w
- Störungsübertragungsfunktion G_z
- Funktion des „offenen Kreises“ G_0

$$G_w = \frac{x}{w} = \frac{G_R \cdot G_S}{1 + G_R \cdot G_S \cdot G_F}$$

$$G_z = \frac{x}{z} = \frac{G_S}{1 + G_R \cdot G_S \cdot G_F}$$

$$G_0 = G_R \cdot G_S \cdot G_F$$

Interpretationen, Zielerreichung

- $x = w$ für $\lim(G_w) = 1$ und $\lim(G_z) = 0$
- Funktionscharakteristik bestimmt Dynamik und Schwingungsneigung

Beispiel

Geregelt werden soll ein kleiner Elektromotor (Strecke), der bei 100 V Motorspannung eine Nennzahl von 200 min^{-1} erreicht, und dessen Drehzahl nach Anlegen der Spannung exponentiell innerhalb von $2,5 \text{ s}$ ($= 5 \cdot T$) bis zum Nennwert ansteigt (**PT₁**), somit eine Zeitkonstante $T_S = 2,5/5 = 0,5 \text{ s}$ aufweist.

Die Übertragungsfunktion der Strecke lautet somit: $G_S = \frac{k_S}{1 + p \cdot T_S} = \frac{200 / 100}{1 + p \cdot 0,5}$

Die Istzahl wird mit einem Tachogenerator erfasst, der eine Ausgangsspannung von 100 V bei einer Drehzahl von 100 min^{-1} liefert.

Damit ist die **Rückkopplung direkt** und hat als Übertragungsfunktion $G_F = k_F = 1$.

Geregelt wird mit einem **P-Regler**, für den ein Verstärkungsfaktor von $k_R = 5$ gewählt wurde, also $G_R = 5$.

Für den **Kreis** ergibt sich: $G_w = \frac{G_v}{1 + G_v \cdot G_f} = \frac{G_R \cdot G_S}{1 + G_R \cdot G_S \cdot G_F} = \frac{k_R \cdot k_S}{1 + k_R \cdot k_S + p \cdot T_S} = \frac{10/11}{1 + p \cdot 0,5/11}$

k_w

T_w

Interpretationen

- Regelkreis stellt Drehzahl exponentiell ein: PT₁-Verhalten
- $\lim_{p \rightarrow 0} G_w(p) = k_w = 10/11$ also $x < w \rightarrow$ ungenau; Regelung schnell da $T_w = 0,5/11 \ll T_s$

Präsenz-Podcast – Folge 6



Automatisierungstechnik

Bernhard Kurz

Übertragungscharakteristika

- Klassifikationen
- Proportional, Integral, Differential
- Systemidentifikation
- Praxisrelevanz

Klassifikationen

Regelkreiscomponenten

Bei der Regelkreissynthese ist von folgenden Vorgaben auszugehen:

- Strecke/Prozess: technisch vorgegeben, meist nicht veränderbar
- Stellglied, Messfühler: möglichst proportional und verzögerungsfrei
- Regler: verzögerungsarm sowie Auswahl gemäß den Regelungszielen

Übertragungscharakteristika

- Regelkreisglieder mit Proportionalcharakteristik (P) weisen nach zeitbegrenzten Einstellvorgängen einen proportionalen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangssignal auf.
- Differenzierende (D) oder integrierende (I) Regelkreisglieder reagieren zeitabhängig und bestimmen wesentlich das dynamische Verhalten des Regelkreises.

Strecken

- Strecke mit Ausgleich (P.): Ausgangssignal erreicht immer einen stabilen Wert
- Strecke ohne Ausgleich (I.): mit einem Eingangssignal ändert sich das Ausgangssignal kontinuierlich
- Strecke mit Totzeit (T_t): zeitverzögerte Ausgangsreaktion auf ein Eingangssignal

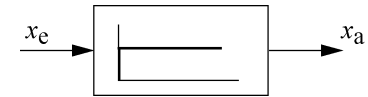
Regler

Mit Proportional-, Integral- oder Differentialverhalten bzw. Kombinationen davon.

Proportional

P: verzögerungsfrei

$$G(p) = k_p$$



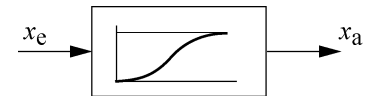
PT₁: Verzögerung 1. Ordnung

$$G(p) = \frac{k_p}{1 + p \cdot T_1}$$



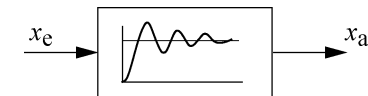
PT₂: Verzögerung 2. Ordnung
Dämpfung $D \geq 1$
(Lösungswurzeln reell)

$$G(p) = \frac{k_p}{(1 + p \cdot T_1) \cdot (1 + p \cdot T_2)}$$



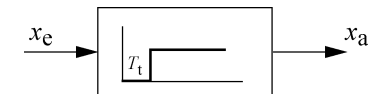
PT₂: Verzögerung 2. Ordnung
Dämpfung $D < 1$ ($T_0 = 1/\omega_0$)
(Lösungswurzeln komplex)

$$G(p) = \frac{k_p}{1 + 2DT_0 \cdot p + T_0^2 \cdot p^2}$$



T_t: Totzeit mit P

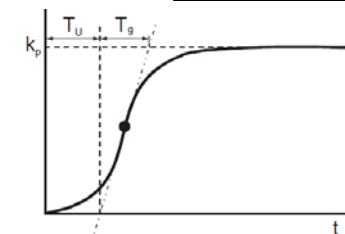
$$G(p) = k_p \cdot e^{-pT_t}$$



PT_n: Verzögerung n-te Ordnung
angenähert durch T_t mit PT₁

- Verzugszeit $T_U = T_t$
- Ausgleichszeit $T_g = T_1$

$$G(p) = \frac{k_p}{1 + p \cdot T_1} \cdot e^{-pT_t}$$



Wendetangente

Differential, Integral ...

I: idealisiert integrierend

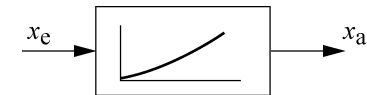
$$x_a(t) = k_I \int x_e(t) dt$$

$$G(p) = \frac{k_I}{p} = \frac{1}{p \cdot T_I}$$



IT₁: real mit Verzögerung

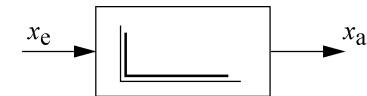
$$G(p) = \frac{1}{p \cdot T_I \cdot (1 + p \cdot T_I)}$$



D: idealisiert differenzierend

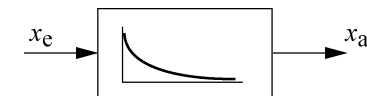
$$x_a(t) = k_D \frac{dx_e(t)}{dt}$$

$$G(p) = k_D \cdot p$$



DT₁: real mit Verzögerung

$$G(p) = \frac{k_D \cdot p}{(1 + p \cdot T_2)}$$



PI: Verknüpfung (Addition) der Eigenschaften von P und I

$$G(p) = k_p + \frac{k_I}{p} = \frac{k_p}{p \cdot T_N} \cdot (1 + p \cdot T_N) \quad \text{Nachstellzeit: } T_N = \frac{k_p}{k_I}$$

PD: Verknüpfung (Addition) der Eigenschaften von P und D

$$G(p) = k_p + k_D \cdot p = k_p \cdot (1 + p \cdot T_V) \quad \text{Nachstellzeit: } T_V = \frac{k_D}{k_p}$$

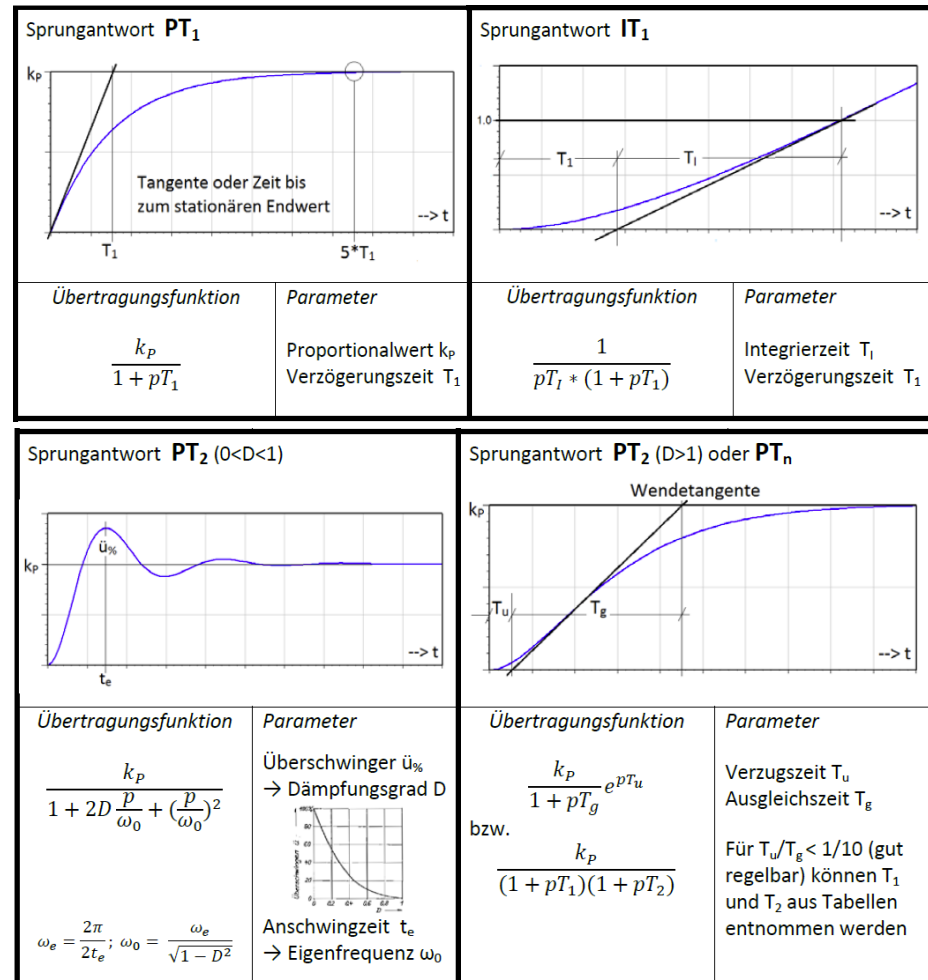
PID: Verknüpfung (Addition) der Eigenschaften von P, I und D

$$G(p) = k_p + \frac{k_I}{p} + k_D \cdot p = \frac{k_p}{p \cdot T_N} \cdot (1 + p \cdot T_N + p^2 \cdot T_N \cdot T_V)$$

Systemidentifikation

Da insbesondere für die **Strecke** bzw. den **Prozess** häufig der mathematisch-physikalische Zugang zur Ermittlung der Übertragungsfunktion zu komplex ist, bedient man sich der **experimentellen Systemidentifikation**. Hierzu wird auf die Strecke ein definiertes Eingangssignal (Einschaltvorgang) aufgebracht und der zeitliche Verlauf des Ausgangssignals (**Sprungantwort**) aufgezeichnet.

Daraus können die **Übertragungsfunktion** und deren **Parameter** festgelegt werden.



Praxisrelevanz

▪ Streckencharakteristika

- mit Ausgleich: kaum P, selten PT_1 , **meist PT_2 bzw. PT_n**
- ohne Ausgleich: selten I, **meist IT_1** , ab und zu IT_2
- Ermittlung von G_s vorzugsweise durch experimentelle Systemidentifikation

▪ Reglercharakteristika

- für Strecken mit Ausgleich stehen P, PI und PID-Regler zur Verfügung
- bei Strecken ohne Ausgleich sind nur P und PD-Regler einzusetzen
- die Übertragungsfunktion ergibt sich aus dem gewählten Reglertyp

▪ Stellkomponenten, Sensoren

- vorzugsweise rein proportional (P)
- sonst mit möglichst geringen Verzögerungen (PT_1)

▪ Regelkreischarakteristika

Ergibt sich aus der Regelkreistopologie nach Einsetzen der Übertragungsfunktionen aller auftretenden Regelkreisglieder in die entsprechende Kreisübertragungsfunktion G_w oder G_z .

Präsenz-Podcast – Folge 7



Automatisierungstechnik

Bernhard Kurz

Regelkreisverhalten

- Einsatz von P- oder I-Regler
- PI-Regler, Kompensation
- PD- und PID-Charakteristik
- Auswahl und Parametrierung

P- und I-Regler

Ausgehend von einer einfachen Regelkreisstruktur (Rückführung $G_F = 1$) werden an einer PT_1 -Strecke $\left(G_S = \frac{k_S}{1 + p \cdot T_S} = \frac{2}{1 + p \cdot 0,5} \right)$ abwechselnd P- und I-Regler betrieben und das Regelverhalten analysiert (WINFACT):

- **P-Regler:** $G_R = k_p$, gewählt: $k_p = 5$

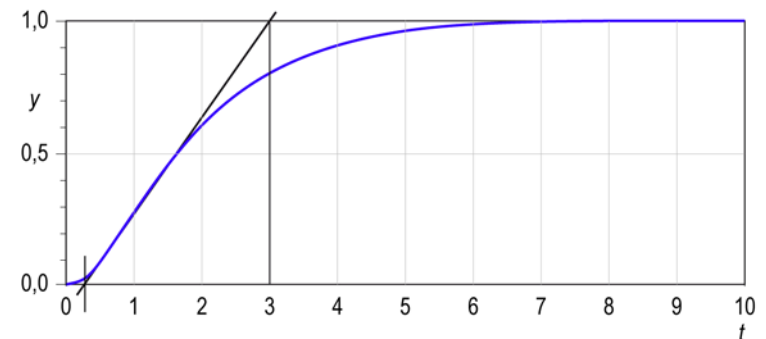
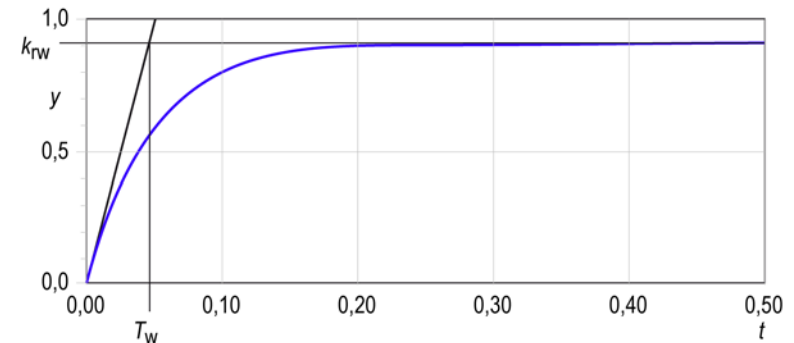
$$G_W = \frac{k_R \cdot k_S}{1 + k_R \cdot k_S + p \cdot T_S} = \frac{10/11}{1 + p \cdot 0,5/11}$$

- PT_1 -Typ mit $k_{pw} = 10/11 = 0,9$; $T_w = 0,5/11 = 0,045$
- schnell (T_w) aber ungenau ($k_{pw} < 1$, d. h. $x \neq w$)

- **I-Regler:** $G_R = k_I / p$ gewählt: $k_I = 0,2$

$$G_W = \frac{k_I \cdot k_S}{k_I \cdot k_S + p + p^2 \cdot T_S} = \frac{1}{1 + 2p + p^2}$$

- PT_2 -Typ mit $k_{pw} = 1$, $D = 1$ und $T_0 = 1$
- genau ($k_{pw} = 1$) aber langsamer (PT_2)



PI-Regler

wenn also der Kreis mit P-Regler schnell, aber ungenau und mit I-Regler genau, aber langsam ist, scheint es doch sinnvoll, beide Eigenschaften additiv zu kombinieren und einen **PI-Regler** einzusetzen:

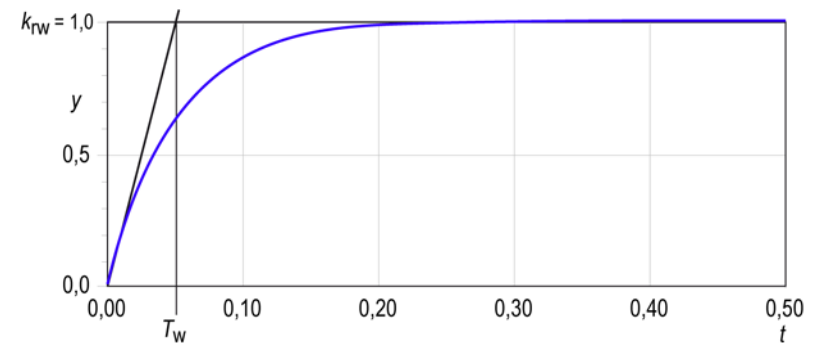
$$\square \quad G_R = \frac{k_R}{p \cdot T_N} (1 + p T_N) \quad G_W(p) = \frac{\frac{k_R}{p \cdot T_N} (1 + p \cdot T_N) \cdot \frac{k_S}{(1 + p \cdot T_S)}}{1 + \frac{k_R}{p \cdot T_N} (1 + p \cdot T_N) \cdot \frac{k_S}{(1 + p \cdot T_S)}}$$

wie vorher gewählt: $k_R = 5$

- **Kompensation:** Die Nachstellzeit T_N wurde zu 0,5 gewählt, weil dadurch die Steckenverzögerung $(1 + p T_S)$ durch „Kürzen“ mit dem Ausdruck $(1 + p T_N)$ kompensiert wird.

$$G_W = \frac{\frac{k_R \cdot k_S}{p T_N}}{1 + \frac{k_R \cdot k_S}{p T_N}} = \frac{1}{1 + p \cdot \frac{0,5}{10}}$$

- PT₁-Typ mit $k_{pw} = 1$ und $T_w = 0,5/10 = 0,05$
- Regelung ist genau ($k_{pw} = 1$) und schnell (T_w)



PD-, PID-Regler

- Eine weitere Verbesserung der Dynamik (Regelgeschwindigkeit, Einschwingverhalten) ermöglicht der zusätzliche D-Anteil beim **PID-Regler**. Dabei sorgt der D-Anteil für eine zeitbegrenzte (Vorhaltezeit T_V) Überhöhung des Stellsignals (Booster-Effekt). Die drei Einstellparameter k_P , T_N und T_V können aber nur mit entsprechenden Einstellverfahren optimal festgelegt werden.
- Bei **Strecken ohne Ausgleich** (I-/IT₁-Charakteristik) ist bei Führung aus Genauigkeitsgründen ($x = w$) **kein Regler mit I-Anteil** erforderlich und sollte insbesondere aus **Stabilitätsgründen** (→ Folge 8) vermieden werden.

- P-Regler an I-Strecke: $\lim_{p \rightarrow 0} G_W = 1$, aber $\lim_{p \rightarrow 0} G_Z = 1/k_R$

$$G_W(p) = \frac{k_R \cdot \frac{k_{IS}}{p}}{1 + k_R \cdot \frac{k_{IS}}{p}} = \frac{1}{1 + p \cdot \frac{1}{k_R \cdot k_{IS}}}$$

$$G_Z(p) = \frac{\frac{k_{IS}}{p}}{1 + k_R \cdot \frac{k_{IS}}{p}} = \frac{\frac{1}{k_R}}{1 + p \cdot \frac{1}{k_R \cdot k_{IS}}}$$

- PD-Regler an IT₁-Strecke mit Kompensation: $\lim_{p \rightarrow 0} G_W = 1$, aber $\lim_{p \rightarrow 0} G_Z = 1/k_R$

$$G_W(p) = \frac{k_R (1 + p \cdot T_V) \cdot \frac{k_{IS}}{p \cdot (1 + p \cdot T_S)}}{1 + k_R (1 + p \cdot T_V) \cdot \frac{k_{IS}}{p \cdot (1 + p \cdot T_S)}} = \frac{1}{1 + p \cdot \frac{1}{k_R \cdot k_{IS}}}$$

$$G_Z(p) = \frac{\frac{k_{IS}}{p \cdot (1 + p \cdot T_S)}}{1 + k_R (1 + p \cdot T_V) \cdot \frac{k_{IS}}{p \cdot (1 + p \cdot T_S)}} = \dots$$

Einstellverfahren

- **Strecken mit Ausgleich** (proportional)
 - Empirisch (try-and-error) für P- und PI-Regler noch möglich
 - Verfahren nach Ziegler/Nichols oder Chien/Hrones/Reswick mit Hilfe der Streckenparameter k_S , T_u , T_g (aus Systemidentifikation, Wendetangente)
 - Kompensation von Zeitkonstanten (Streckenverzögerung) mit PI- und PID-Regler
- **Strecken ohne Ausgleich** (integrierend): kein I-Anteil beim Regler!
 - Empirisch (try-and-error) für P-Regler möglich
 - Kompensation einer Zeitkonstanten (Streckenverzögerung) mit PD-Regler

- **weitere Verfahren**

- Frequenzgangverfahren zur Einstellung von Phasen- und Amplitudenrand
- Wurzelortskurve WOK
- Dämpfungsminimum, Betragsoptimum etc.

Reglertyp	Mit Überschwingen (ca. 20 %, D = 0,45)		Ohne Überschwingen (zeitoptimal)	
	Führung	Störung	Führung	Störung
P	$K_R = \frac{0,71 \cdot T_g}{K_S \cdot T_u}$	$K_R = \frac{0,71 \cdot T_g}{K_S \cdot T_u}$	$K_R = \frac{0,3 \cdot T_g}{K_S \cdot T_u}$	$K_R = \frac{0,3 \cdot T_g}{K_S \cdot T_u}$
PI	$K_R = \frac{0,59 \cdot T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_N = T_g$	$K_R = \frac{0,71 \cdot T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_N = 2,3 \cdot T_u$	$K_R = \frac{0,34 \cdot T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_N = 1,2 \cdot T_g$	$K_R = \frac{0,59 \cdot T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_N = 4 \cdot T_u$
PID	$K_R = \frac{0,95 \cdot T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_N = 1,35 \cdot T_g$ $T_V = 0,47 \cdot T_u$	$K_R = \frac{1,2 \cdot T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_N = 2 \cdot T_u$ $T_V = 0,42 \cdot T_u$	$K_R = \frac{0,59 \cdot T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_N = T_g$ $T_V = 0,5 \cdot T_u$	$K_R = \frac{0,95 \cdot T_g}{K_S \cdot T_u}$ $T_N = 2,4 \cdot T_u$ $T_V = 0,42 \cdot T_u$

Übersicht

- P-Regler:
 - + schnell, robust, stabil,
 - immer mit bleibender Regeldifferenz ($x \neq w$ bzw. $\lim_{p \rightarrow 0} G_w \neq 1$)
- PI-Regler:
 - + keine bleibende Regeldifferenz ($x = w$ bzw. $\lim_{p \rightarrow 0} G_w = 1$)
 - langsam, Stabilität und Schwingungsneigung sind abhängig von der Parametereinstellung
- PID-Regler:
 - + keine bleibende Regeldifferenz ($x = w$ bzw. $\lim_{p \rightarrow 0} G_w = 1$), schnell
 - einstellungskritisch, denn Dynamik, Stabilität und Schwingungsneigung sind parameterabhängig
- Strecken ohne Ausgleich stellen auch ohne **I-Anteil im Regler** $w = x$ (bei Führung) ein und dürfen aus Stabilitätsgründen damit nicht betrieben werden. Einsetzbar sind P und zur Kompensation PD (Dynamikverbesserung).
- Strecken mit Ausgleich: Einstellverfahren nach Z/N oder C/H/R
- Störungswirkung durch Analyse von G_z
 - I-Anteil im Regler sorgt bei **Strecken mit Ausgleich** für Störungskompensation
 - Störungskompensation bei **Strecken ohne Ausgleich** erfordert Sonderlösungen

Automatisierungstechnik

Bernhard Kurz

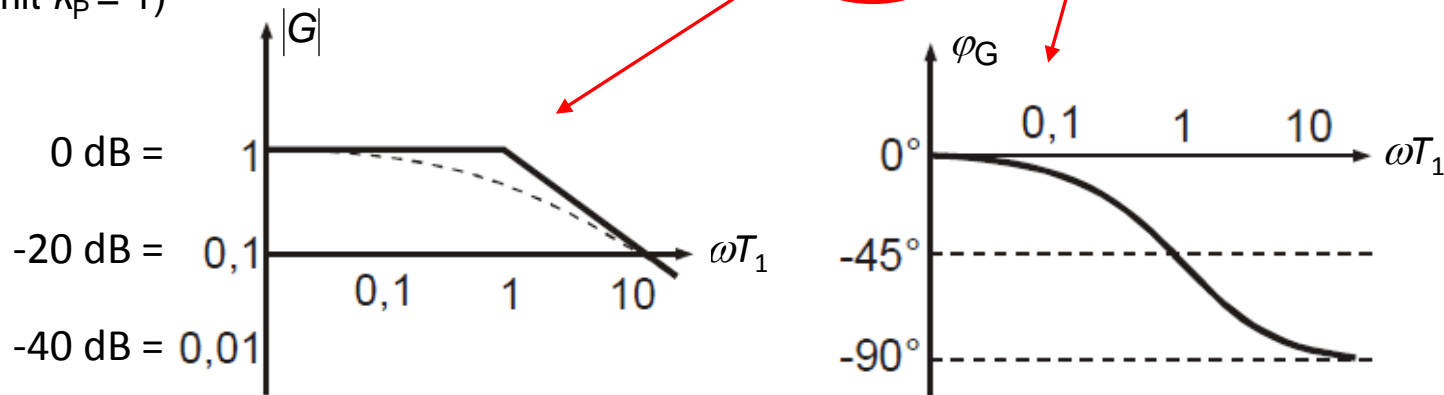
Frequenzverhalten

- Betrag und Phase
- Frequenzgang, Bodediagramm
- Auswählte Übertragungscharakteristika
- Regelkreisstabilität, Phasenrand
- Beispielanalyse mit WINFACT

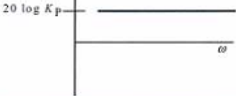
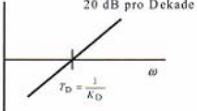
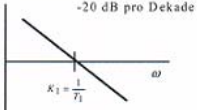
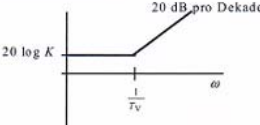
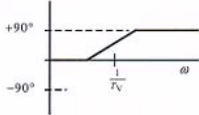
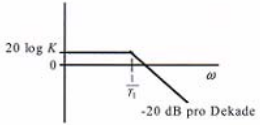
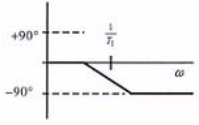
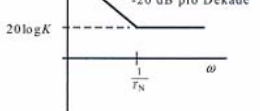
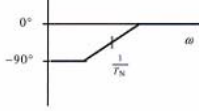
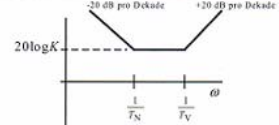
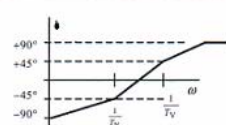
Betrag und Phase

- Frequenzgang:** Zur Beurteilung der Eigenschaften eines linearen Systems für verschiedene Frequenzen, wie bspw. beim Praxistest von Stoßdämpfern oder Lautsprechersystemen, dient der Frequenzgang. Dabei werden Veränderungen in der Amplitude und der Zeitverzögerung von Eingangssignal zu Ausgangssignal ermittelt und als Betrag und Phase über der Frequenz aufgetragen (**Bodediagramm**). Mathematisch wird diese Information aus der **Übertragungsfunktion** gewonnen, aus der für $p = j\omega$ der komplexe Frequenzgang $\underline{G}(j\omega) = |G| \cdot e^{j\varphi_G}$ entsteht.

- Beispiel:** $G(p) = \frac{1}{1 + p \cdot T_1} \rightarrow \underline{G}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega \cdot T_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega T_1)^2}} e^{j \arctan(-\omega T_1)}$
 RC-Glied
 (PT₁ mit $k_p = 1$)



Frequenzgänge

P-Verhalten $G(j\omega) = K_P$		0°
D-Verhalten $G(j\omega) = T_D \cdot j\omega = \frac{1}{K_D} \cdot j\omega$		$+90^\circ$
I-Verhalten $G(j\omega) = \frac{K_I}{j\omega} = \frac{1}{T_I \cdot j\omega}$		-90°
PD-Verhalten $G(j\omega) = K \cdot (1 + T_V \cdot j\omega)$		
PT1-Verhalten $G(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega \cdot T_1}$		
PI-Verhalten $G(j\omega) = K \cdot \frac{1}{j\omega \cdot T_N} \cdot (1 + j\omega \cdot T_N)$		
PID-Verhalten $G(j\omega) = K \cdot \frac{(1 + j\omega \cdot T_N)}{j\omega \cdot T_N} \cdot (1 + j\omega \cdot T_V)$		

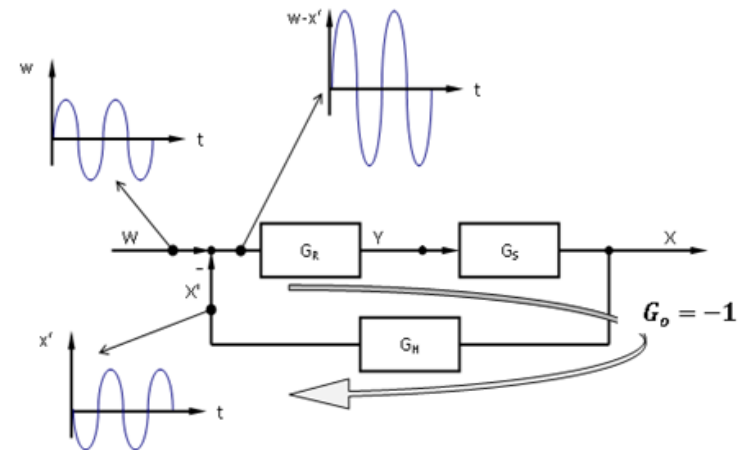
- Die Übersicht zeigt eine Auswahl von Bodediagrammen wichtiger Regelkreisglieder
- Weitere ergeben sich aus Überlagerungen:
 - PT₂** setzt sich aus zwei PT₁ zusammen und kann für $D < 1$ Resonanzüberhöhung zeigen
 - IT₁** setzt sich aus I und PT₁ zusammen, **DT₁** aus D und PT₁
- Entsprechendes gilt für die Erstellung des **Bodediagramms von G_o** zur **Stabilitätsanalyse des Regelkreises**

Offener Regelkreis

- Durch die Regelkreisstruktur mit Gegenkopplung wird eine sinusförmige Führungsgröße w mit der Rückführgröße x' subtrahiert, was bei gleicher Amplitude und unveränderter Phasenlage die Regeldifferenz ($e = w - x$) zu Null macht. Tritt aber durch die in Reihe wirkenden Regelkreisglieder G_R , G_S und G_F , also $\underline{G}_R \cdot \underline{G}_S \cdot \underline{G}_F = \underline{G}_O$: „**offener Kreis**“, von w zu x' eine Phasenverschiebung (Verzögerung) von -180° auf, so wird aus der Subtraktion eine Addition (Mitkopplung). Es resultiert eine aufklingende Schwingung der Regeldifferenz e und damit auch der Regelgröße x , also **instabiles Regelkreisverhalten**.

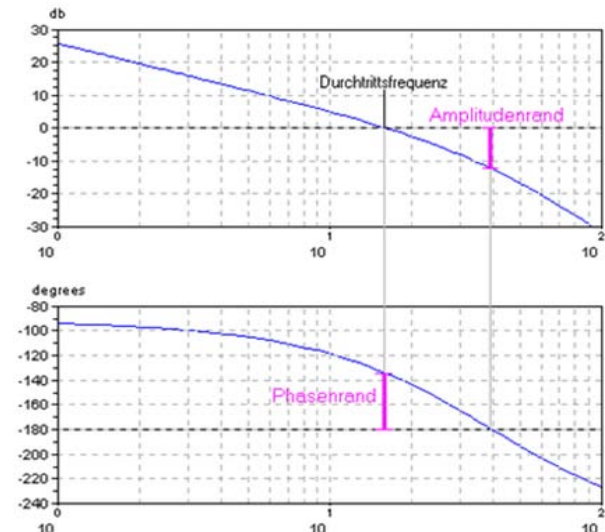
- Die kritische Schwingbedingung $\underline{G}_O = -1$, d.h. $|\underline{G}_O| = 1$ und $\varphi_{G_O} = -180^\circ$, findet sich auch im Nennerpolynom von Führungs- wie Störungsübertragungsfunktion des Kreises wieder, kann also im **Bode-diagramm** von \underline{G}_O analysiert und entschärft werden.

- Wegen $\underline{G}_O = \underline{G}_R \cdot \underline{G}_S \cdot \underline{G}_F = |\underline{G}_R| \cdot e^{j\varphi_{GR}} \cdot |\underline{G}_S| \cdot e^{j\varphi_{GS}} \cdot |\underline{G}_F| \cdot e^{j\varphi_{GF}} = |\underline{G}_R| \cdot |\underline{G}_S| \cdot |\underline{G}_F| \cdot e^{j(\varphi_{GR} + \varphi_{GS} + \varphi_{GF})}$ sind die jeweiligen Phasenwerte zu addieren und die Beträge zu multiplizieren bzw. deren Dezibelwerte auch nur zu addieren. So erhält man durch **additive Überlagerung von \underline{G}_R , \underline{G}_S und \underline{G}_F** das Bodediagramm von \underline{G}_O .



Stabilitätskriterien

- **Grundsätzlich** ist ein Regelkreis (-glied) **stabil**, wenn auf eine beschränkte Eingangsgröße (Sollwert, Störgröße) stets eine beschränkte Ausgangsgröße (Beharrungswert) folgt.
- **Strukturstabilität** liegt vor, wenn alle Lösungswurzeln p_i des Nennerpolynoms der Kreisübertragungsfunktion (= Pole von G_w, G_z) in der negativen, komplexen Halbebene liegen.
- Das einfache **Nyquist-Stabilitätskriterium** fordert, dass die Übertragungsfunktion des offenen Kreises G_0 grundsätzlich (bei keiner Frequenz) nicht -1 , (Betrag 1 und Phase -180°) wird. Hierzu wird im Bodediagramm analysiert:
 - Für Betrag = 1 (= 0 dB !) bei der Durchtrittskreisfrequenz ω_d muss der zugehörige Phasenwinkel betragsmäßig kleiner 180° sein, vorzugsweise um mehr als 30° von 180° abweichen (Phasenrand).
 - Für Phase = -180° muss der Betrag kleiner 1 sein, vorzugsweise maximal 0,5 (Amplitudenrand).
- Durch Verstellen der Reglerverstärkung können Amplituden- und Phasenrand auf vorgegebene Werte justiert werden.



Stabilitätsanalyse

Regelkreis mit PT_2 -Strecke und verzögerungsarmen Sensor, geregelt mit P:

$k_p = 10$: starkes Schwingen (grün gestrichelt), $\varphi_{Rand} = 21^\circ$
(Bodediagramm links unten)

$k_p = 2$: kaum Schwingen (grün glatt), $\varphi_{Rand} = 68^\circ$ (rechts unten)

