

Präsenz-Folien Version 2

Automatisierungstechnik

Bernhard Kurz

Inhaltsübersicht

- Steuerungstechnik: Schaltfunktionen
- Steuerungstechnik: Ablaufsteuerung
- Regelungstechnik: Übertragungsfunktionen, Regelkreis
- Regelungstechnik: Frequenzdarstellung, Bodediagramm

Hinweis: im Webcampus finden Sie 8 thematisierte Videopodcasts zu den Inhalten der AUT-Studienbriefe sowie 5 Tutorialpodcasts für WinFact und CoDeSys

Begriffe der Automatisierung

- Die Automatisierungstechnik beinhaltet die Objektivierung und Optimierung von Prozessen zur Veränderung von Energie-, Materie- und Information hinsichtlich Qualität, Produktivität, Ökologie, Sicherheit und Ergonomie
- Dabei treten folgende Prozessklassifikationen auf:
 - Kontinuierliche Prozesse (Verfahrenstechnik): zeitvariante Prozessgrößen, Beschreibung durch Differenzialgleichungen, Übertragungsfunktionen und Blockschaltbilder
 - Sequenzielle Prozesse (Fertigungstechnik): Abfolge unterschiedlicher Prozesszustände, Beschreibung durch Flussdiagramme, Petri-Netze, EPK (Ereignis gesteuerte Prozesskette)
 - Objektbezogene Prozesse (Fördertechnik, Logistik): Umformung, Transport oder Speicherung einzeln identifizierbare Objekte, Beschreibung durch Zustandsmodelle oder Petri-Netze, Warteschlangenmodelle oder Graphen
- Mit zunehmender „digitaler Durchdringung“ finden sich heute entsprechende Automatisierungsapplikationen bei:
 - Maschinen, Anlagen, Geräte wie Werkzeugmaschinen und Fördersysteme oder Produktions-, Gebäude- und Energieanlagen oder Hausgeräte und Analysesysteme,
 - Waren- und Materialflusssysteme, die aus einzeln identifizierbaren Einheiten bestehen und erst durch deren Orts-, Zeit und Mengenerfassung automatisierbar werden
 - Technische und formalisierbare Tätigkeiten, bspw. Konstruieren, Projektieren, Programmieren, Prüfen oder Bedienen.

Hauptgebiete der Automatisierung

- Bereits die Typisierung nach Prozessvarianten wie Automatisierungsobjekten lässt eine breite Vielfalt an Fachdisziplinen erahnen, die durch erforderliche Zusatzkompetenzen aus den Gebieten Elektrotechnik, Maschinenbau und Informatik (=Mechatronik) erweitert wird. In Hinblick auf die überproportionalen Investitionen für die Erstellung von Automatisierungssoftware, deren Test und Inbetriebnahme ist koordiniertes Projektmanagement unabdingbar.
- Steuerungstechnik:
 - Kombinatorik (Verknüpfungslogik, Boolesche Algebra): Schaltfunktionen
 - Schaltwerke (sequenzielle Logik): Ablaufsteuerung, Schrittketten
- Regelungstechnik:
 - Automatisierte, kontinuierliche Prozessführung im Regelkreis mit den Zielen: Istwert = Sollwert (Zielgröße), Ausgleich von Störeinflüssen, stabile und hinreichend schnelle Zielerreichung
 - Differenzialgleichungen bzw. Übertragungsfunktionen (Laplace, Frequenzgang)

Digitalisierung im Prozess

Automatisierungssysteme sind informationsverarbeitende Systeme!

- **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), Analogie zum Dezimalsystem (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 (mit Lösungen)

1. Wandlung Dual in Dezimal

$$1011,011 = 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2} + 1 \cdot 2^{-3}$$

$$= 1 \cdot 8 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,25 + 1 \cdot 0,125 = \mathbf{11,375}$$

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: $9 - 3 = ?$

Umwandlungen:

$$\begin{array}{rcl} 9: & 1001 & \longrightarrow \\ 3: & 0011 & \longleftarrow \text{invertieren: } 1100 \\ -3: & 1101 & \text{plus „1“: } + 0001 \end{array}$$

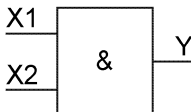
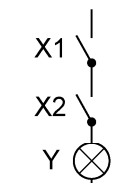
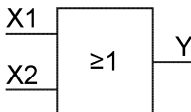
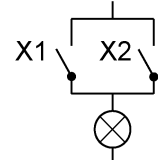
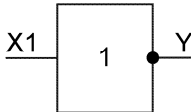
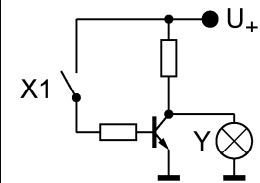
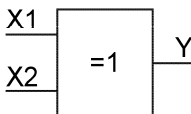
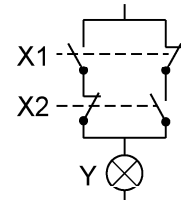
Berechnung:

$$\begin{array}{r} + 9: \quad 1001 \\ + (-3): \quad +1101 \\ \hline + 6: \quad \cancel{4}0110 \quad (\text{höchsten Übertrag streichen!}) \end{array}$$

4. BCD-Darstellung der Zahl 738: 0111 0011 1000

7 3 8

Logische Verknüpfungen

Bezeichnung	Symbol	Wertetabelle	Schaltfunktion	Realisierung															
UND (AND)		<table><tr><th>X1</th><th>X2</th><th>Y</th></tr><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></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><tr><th>X1</th><th>X2</th><th>Y</th></tr><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></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><tr><th>X1</th><th>Y</th></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	X1	Y	0	1	1	0	$Y = \overline{X1}$										
X1	Y																		
0	1																		
1	0																		
Antivalenz (XOR)		<table><tr><th>X1</th><th>X2</th><th>Y</th></tr><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></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																	

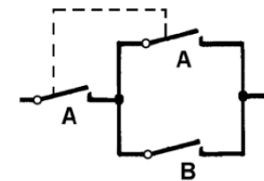
Schaltalgebra

Variable mit 0 oder 1: $A \vee 0 = A$ bzw. $A \wedge 0 = 0$
 $A \vee 1 = 1$ bzw. $A \wedge 1 = A$

Variable mit sich selbst: $A \vee \bar{A} = 1$ bzw. $A \wedge \bar{A} = 0$

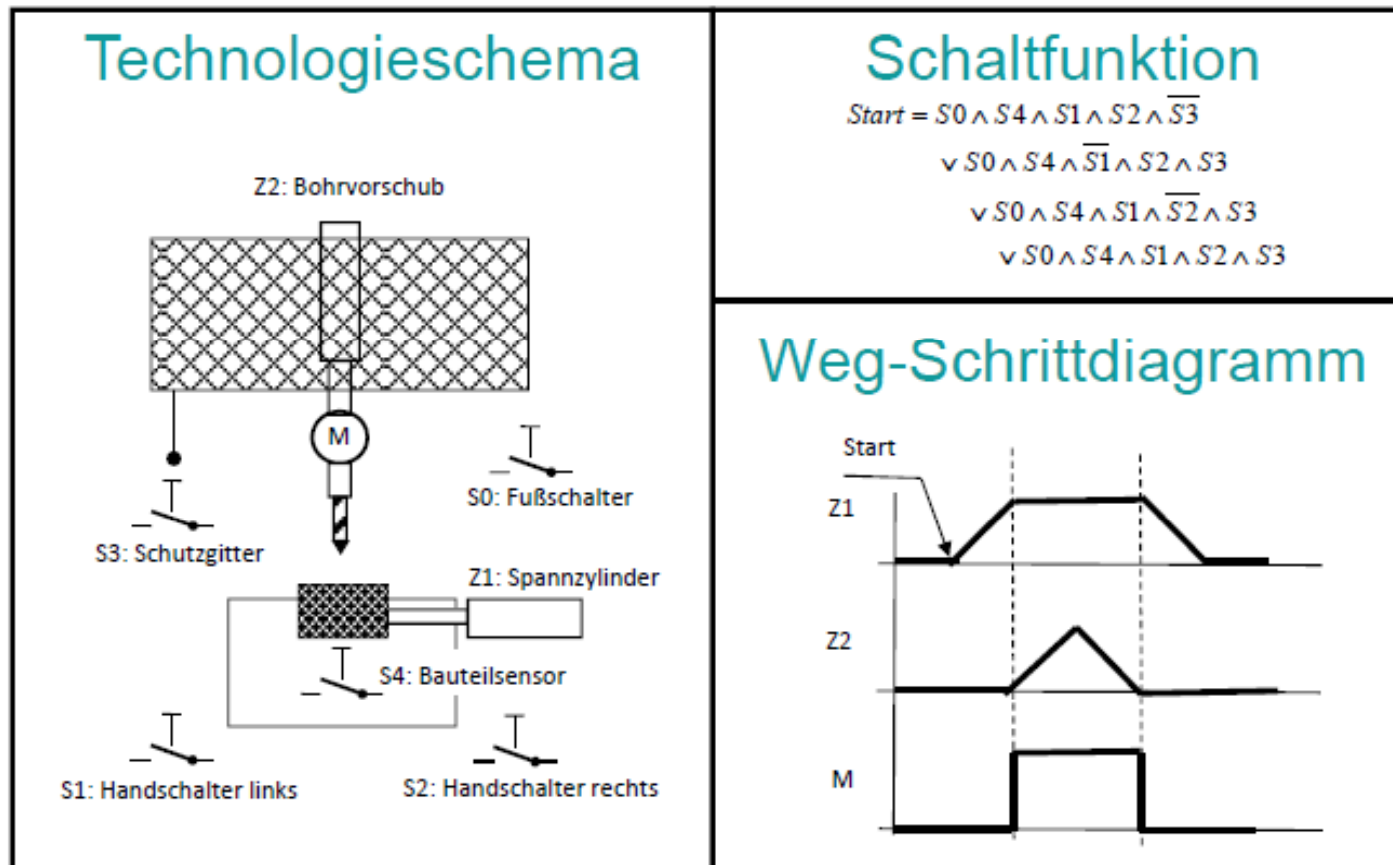
Distributivgesetz: $A \wedge (B \vee C) = (A \wedge B) \vee (A \wedge C)$
 $A \vee (B \wedge C) = (A \vee B) \wedge (A \vee C)$

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



De-Morgan-Regel: $\overline{A \wedge B} = \bar{A} \vee \bar{B}$ bzw. $\overline{A \vee B} = \bar{A} \wedge \bar{B}$

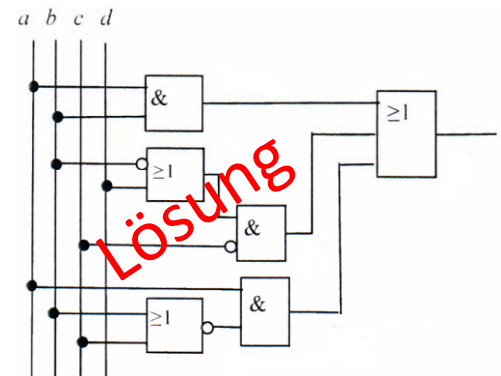
Steuerungstechnik



Schaltfunktion Beispiele

1. Ermitteln Sie den Logikplan zur Schaltfunktion

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



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

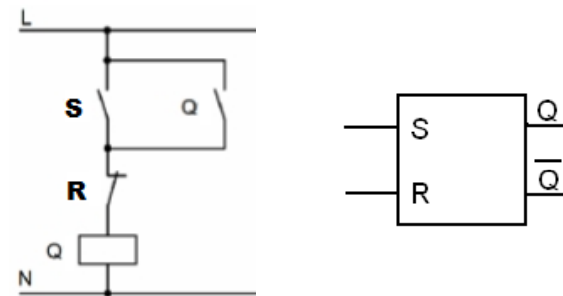
Steuerung: Bei Nacht Heizungspumpe aus, bei niedriger Raumtemperatur vorrangig Heizungspumpe ein und Warmwasserpumpe aus, bei niedriger Warmwassertemperatur Warmwasserpumpe ein und Heizungspumpe aus.

- 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

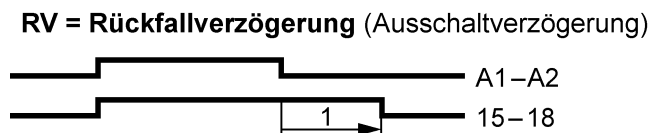
Zustand	E3 Raum- temp. erreicht	E2 Tag	E1 Warmwasser- temp. erreicht	A2 Heizungs- pumpe	A1 Warmwasser- pumpe
0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	0
2	0	1	0	1	0
3	0	1	1	1	0
4	1	0	0	0	1
5	1	0	1	0	0
6	1	1	0	0	1
7	1	1	1	0	0

Schaltwerke

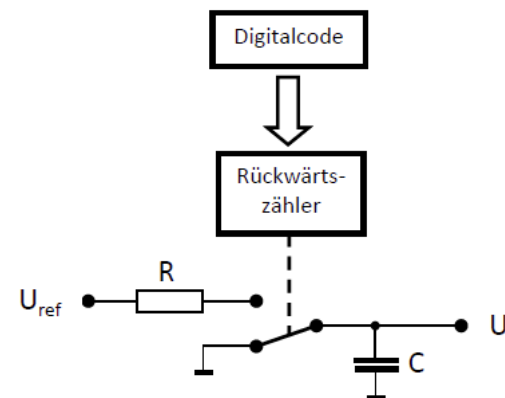
- RS-Speicherfunktion
Selbsthaltung, dominant Rücksetzen



- Timer:
Einschalt-/Ausschaltverzögerung



- Counter:
Vorwärts-/Rückwärtszähler
- AD- und DA-Wandler:
1-Bit-DAC, Dual-Slope-ADC



Steuerungsarten

- **Verknüpfungssteuerung:** den Signalzuständen der Eingangssignale sind bestimmte Signalzustände der Ausgangssignale im Sinne boolescher Verknüpfungen zugeordnet.
- **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-Funktionsweise

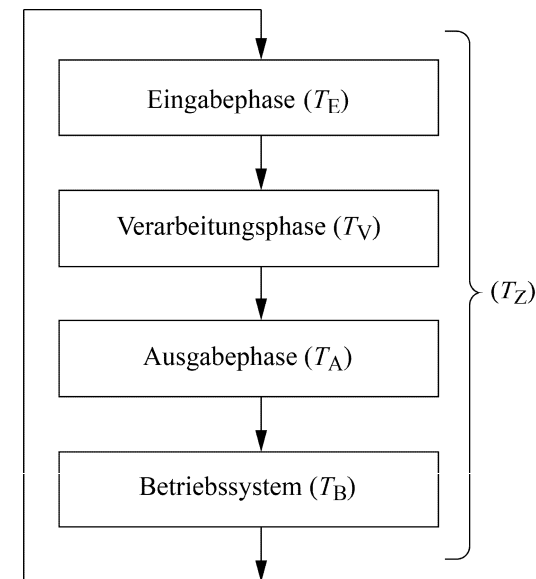
- **Betriebsart:** Im Gegensatz zu einer VPS zeigt eine SPS aufgrund der sequentiellen Programmabarbeitung nur ein quasiparalleles Verhalten mit den Bearbeitungsschritten: Einlesen der Signalzustände der Signalglieder (Sensoren), Verarbeitung der programmierten Verknüpfungsalgorithmen, Ausgabe der resultierenden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

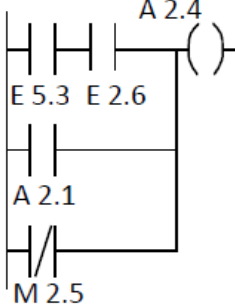
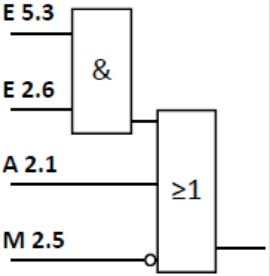
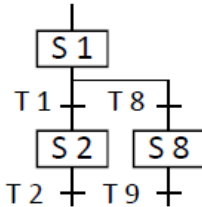
- Meldezeit $T_Z \leq T_m$
- zulässige Antwortzeit $T_Z \leq T_{az} / 2$ (*)
- Prozesszeit $T_Z \leq T_p / 2$

Meldezeit T_m : vorhandenes Sensorsignal; Antwortzeit T_{az} : Aktivierung der Ausgangsreaktion, Prozesszeit T_p : charakteristischer Prozesszyklus

- (*) 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

Anweisungs- liste (AWL)	Strukturierter Text (ST)	Kontaktplan (KOP)	Funktions- baustein- sprache (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

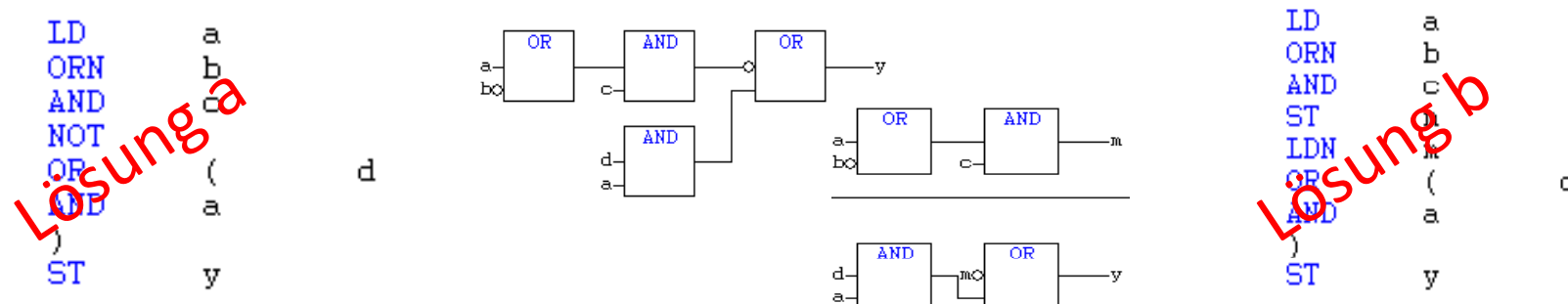
Anweisungsliste

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)



Kontaktplan

Zur Realisierung von verbindungsprogrammierten (Schaltpläne) Steuerungen

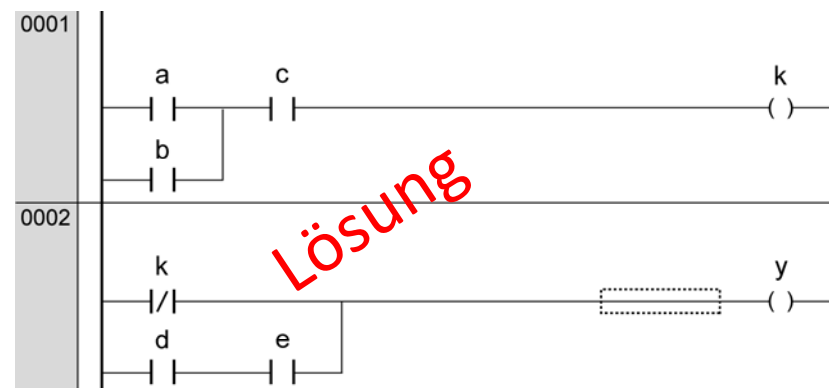
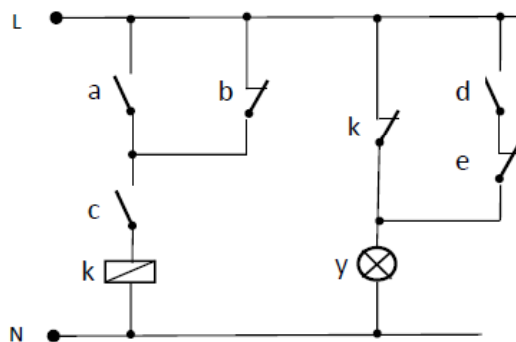
Begrenzte Programmiervielfalt!

— —	Abfrage auf 1 (Schaltkontakt geschlossen)
— / —	Abfrage auf 0 (Schaltkontakt offen)
—() —	Zuweisung
—(S/R) —	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)

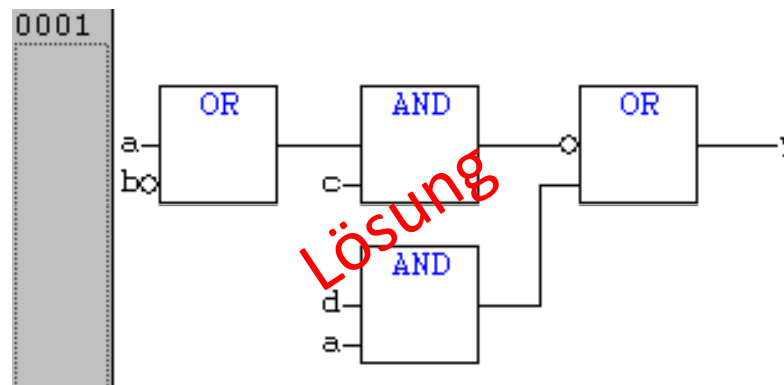


Funktionsplan

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)

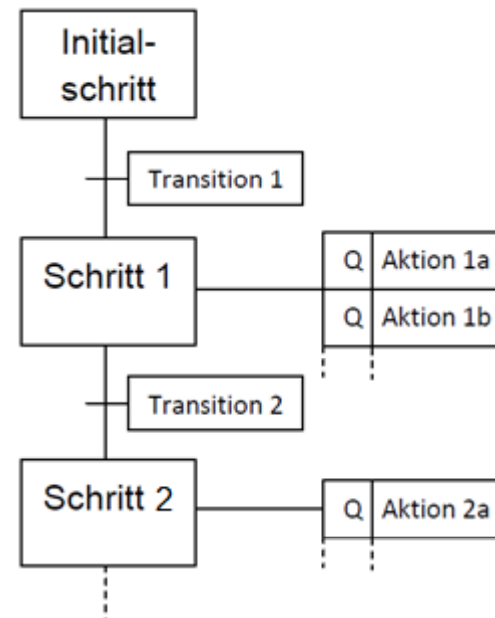
$$y = \overline{(a \vee \bar{b})} \wedge c \vee d \wedge a$$



Schritt-kette - Struktur

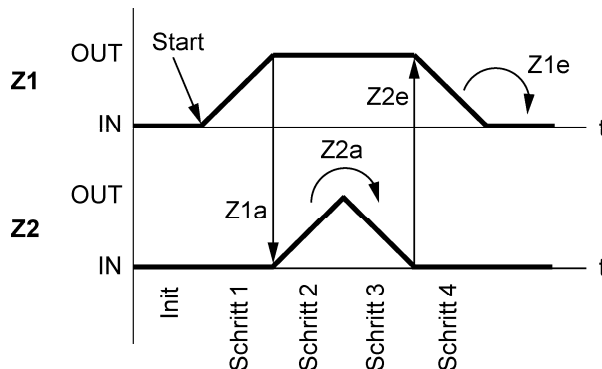
Zur einfachen Programmierung von durch Prozesszustände (Transition, Fortschaltbedingung) ausgelösten Prozessschritten mit zugehörigen Aktorsteuerungen (Aktionen) dient die Ablaufsteuerung AS.

- 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.

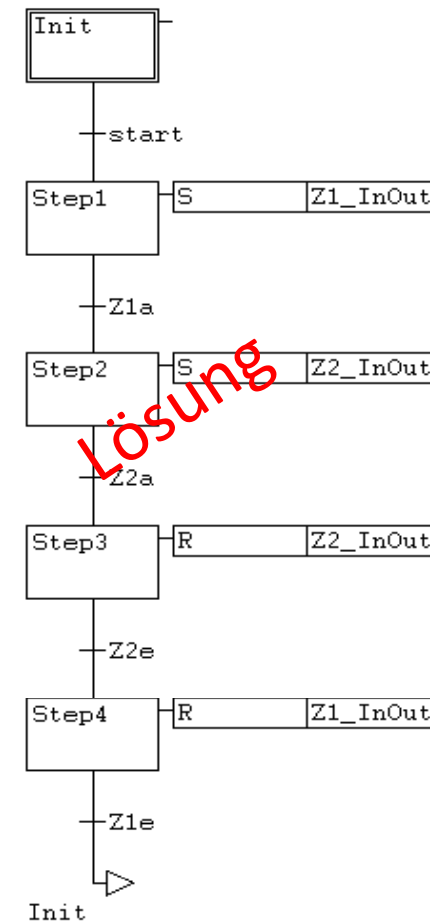


Schrittkette - Beispiel

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
```



CoDeSys – Programmierung Beispiele

- Programmierbeispiele finden sich im Studienbrief 2 ab S.61.
- Weitere Hinweise zum Umgang mit CoDeSys finden Sie in den zugehörigen Tutorial-Podcasts im Webcampus.
- Diese und weitere Tutorials (siehe YouTube) werden dringend für die Bearbeitung der Hausarbeit empfohlen.
- Ebenso die Bearbeitung einer Übungsaufgabe mit Einbindung einer Visualisierung.

Regelungstechnik: Problemstellung und Ziele

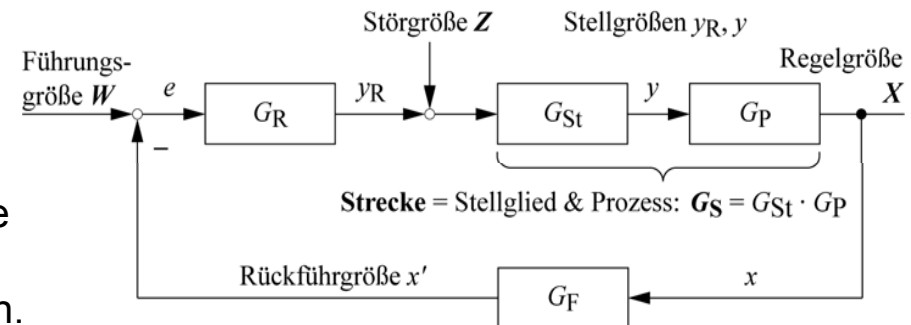
Bei der Positionseinstellung eines Roboterarms oder eines Krans ist zu beobachten, dass das Ausschalten der Antriebe bei Erreichen der Zielposition zu einem mehr oder minder starken „Nachschwingen“ des bewegten Objekts führen. Hinzu kommt, dass die Präzision der eingestellten Zielposition von der Objektlast (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?

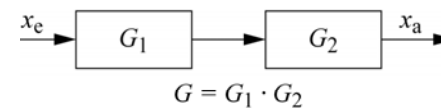
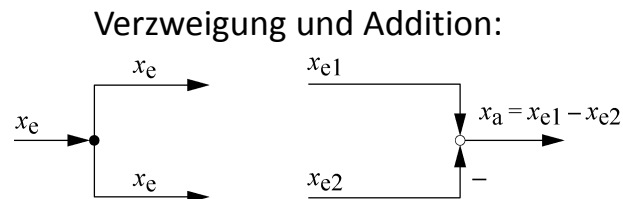
Die Überprüfung dieser Fragestellungen kann mathematisch durchgeführt werden, setzt hierzu aber die Kenntnis der **Systemstruktur** (→ Regelkreis) sowie der **Übertragungseigenschaften** aller Systemkomponenten voraus.

Blockschaltbild und Blockschaltbildalgebra

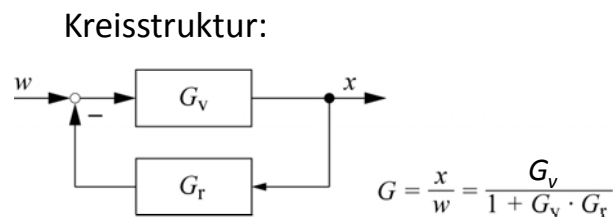
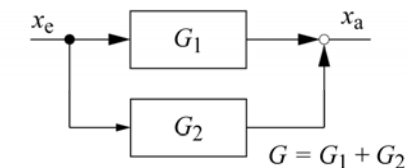
Aus dem Technologieschema entsteht auf Basis der Wirkungszusammenhänge (Funktion, DGL) der Systemkomponenten nach geeigneten Zusammenfassungen und Vereinheitlichungen die Regelkreisgrundstruktur mit Regler (G_R), Strecke oder Prozess (G_S) und Messfühler / Sensor (G_F) sowie mit den festgelegten Signalbezeichnungen.



Blockschaltbildalgebra



Serien- und Parallelschaltung:



Regelkreisübertragungsfunktionen

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

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

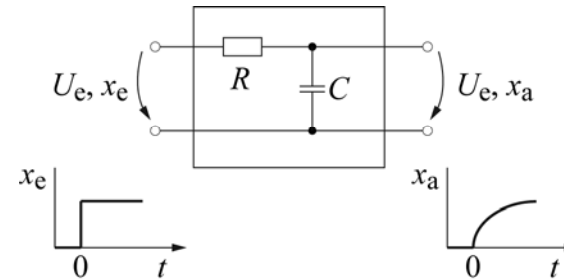
$$G_z = \frac{x}{z} = \frac{G_S}{1 + G_R \cdot G_S \cdot G_F}$$

Zielerreichung: $x = w$ für $\lim(G_w) = 1$ und $\lim(G_z) = 0$

Differenzialgleichung (DGL) und 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 $F(j\omega) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{\underline{X}_C}{R + \underline{X}_C} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega \underbrace{RC}_T}$ für $j\omega = p \rightarrow G(p)$
- Übertragungsfunktion $T \cdot p \cdot U_a(p) + U_a(p) = U_e(p)$ bzw. $\frac{U_a(p)}{U_e(p)} = \frac{1}{1 + p \cdot T} = G(p)$

Regelkreisanalyse: Beispiel (1)

Geregelt werden soll ein kleiner Elektromotor (Strecke), der bei 100 V Motorspannung eine Nenndrehzahl 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 Istdrehzahl 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:

$$G_w = \frac{G_v}{1 + G_v \cdot G_f} = \frac{G_R \cdot G_S}{1 + G_R \cdot G_S \cdot G_F} = \frac{k_R \cdot k_S}{1 + k_R \cdot k_S + p \cdot T_S} = \frac{\overset{k_w}{10/11}}{1 + p \cdot \underset{T_w}{0,5/11}}$$

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 dafür schnell da $T_w = 0,5/11 \ll T_S$

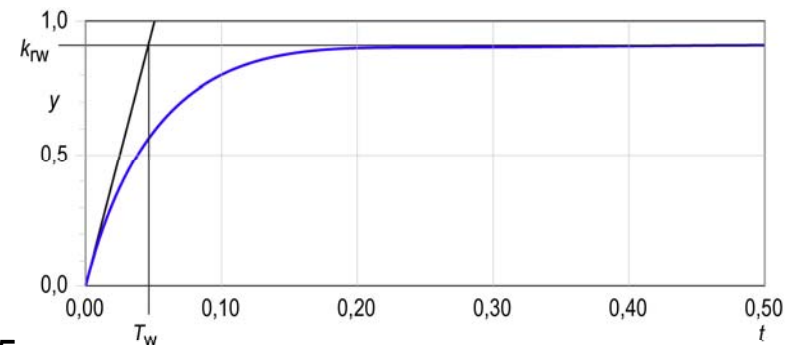
Regelkreisanalyse: Beispiel (2)

Analyse des Regelverhaltens mit WINFACT:

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

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

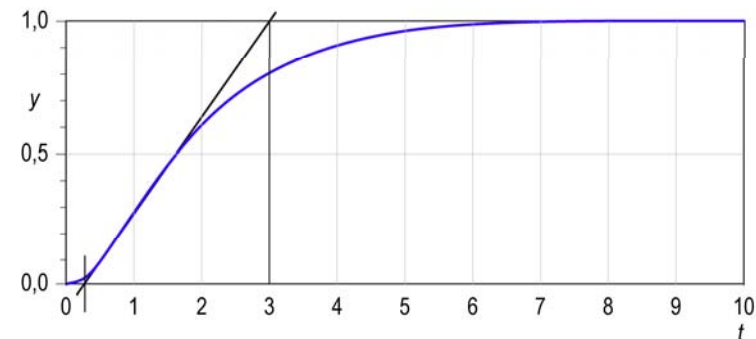
- PT₁-Typ mit $k_{pw} = 10/11 = 0,9$; $T_w = 0,5/11 = 0,045$
- schnell (T_w) aber ungenau ($k_{pw} < 1$, d. h. $x \neq w$)



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

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

- PT₂-Typ mit $k_{pw} = 1$, $D = 1$ und $T_0 = 1$
- genau ($k_{pw} = 1$) aber langsamer (PT₂)



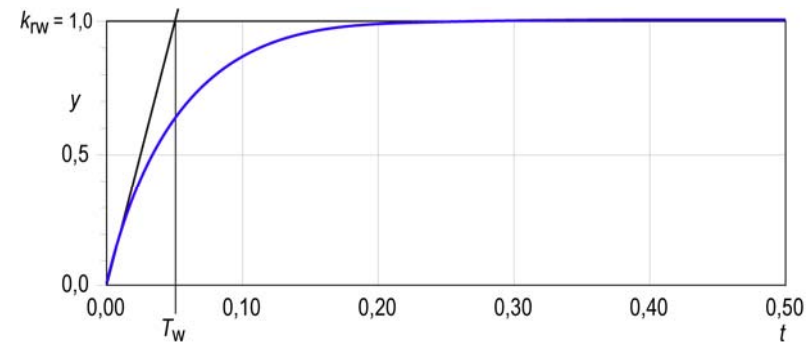
- Wenn der Kreis mit P-Regler schnell, aber ungenau und mit I-Regler genau, aber langsam ist, wäre doch eine additive Kombination beider Eigenschaften → **PI-Regler** zweckmäßig.

Regelkreisanalyse: Beispiel (3)

- **PI-Regler:** wie vorher gewählt: $k_R = 5$
- $$G_R = \frac{k_R}{p \cdot T_N} (1 + p T_N)$$
- $$G_W(p) = \frac{\frac{k_R}{p \cdot T_N} (1 + p \cdot T_N) \cdot \frac{k_S}{(1 + p \cdot T_S)}}{1 + \frac{k_R}{p \cdot T_N} (1 + p \cdot T_N) \cdot \frac{k_S}{(1 + p \cdot T_S)}}$$
- **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)

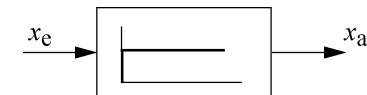


- Eine weitere Dynamikverbesserung ($\approx 40\%$) bei Regelgeschwindigkeit, Einschwingverhalten ermöglicht der zusätzlicher D-Anteil beim **PID-Regler**. Der D-Anteil für eine zeitbegrenzte (Vorhaltezeit T_V) Überhöhung des Stellsignals (Booster-Effekt). Die drei Einstellparameter k_P , T_N und T_V können aber nur mit entsprechenden Einstellverfahren optimal festgelegt werden.

Zusammenfassung Übertragungseigenschaften (1)

P: verzögerungsfrei

$$G(p) = k_p$$



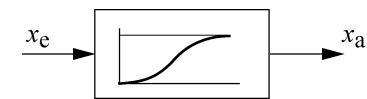
PT₁: Verzögerung 1. Ordnung

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



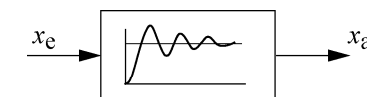
PT₂: Verzögerung 2. Ordnung
Dämpfung $D \geq 1$
(Lösungswurzeln reell)

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



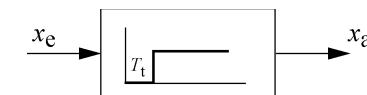
PT₂: Verzögerung 2. Ordnung
Dämpfung $D < 1$ ($T_0 = 1/\omega_0$)
(Lösungswurzeln komplex)

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



T_t: Totzeit mit P

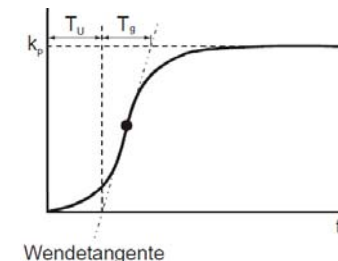
$$G(p) = k_p \cdot e^{-pT_t}$$



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

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

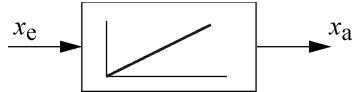
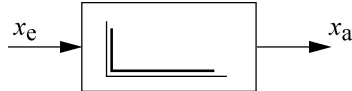
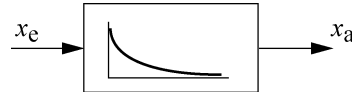
$$G(p) = \frac{k_p}{1 + p \cdot T_1} \cdot e^{-pT_t}$$



Regelbarkeit

gut: $T_u/T_g < 1/10$
schlecht: $T_u/T_g > 1/3$
sonst „noch regelbar“

Zusammenfassung Übertragungseigenschaften (2)

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	$G(p) = \frac{1}{p \cdot T_I \cdot (1 + p \cdot T_1)}$	
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	$G(p) = k_p + \frac{k_I}{p} = \frac{k_p}{p \cdot T_N} \cdot (1 + p \cdot T_N)$	Nachstellzeit : $T_N = \frac{k_p}{k_I}$
PD:	Verknüpfung (Addition) der Eigenschaften von P und D	$G(p) = k_p + k_D \cdot p = k_p \cdot (1 + p \cdot T_V)$	Vorhaltezeit : $T_V = \frac{k_D}{k_p}$
PID:	Verknüpfung (Addition) der Eigenschaften von P, I und D	$G(p) = k_p + \frac{k_I}{p} + k_D \cdot p = \frac{k_p}{p \cdot T_N} \cdot (1 + p \cdot T_N + p^2 \cdot T_N \cdot T_V)$	

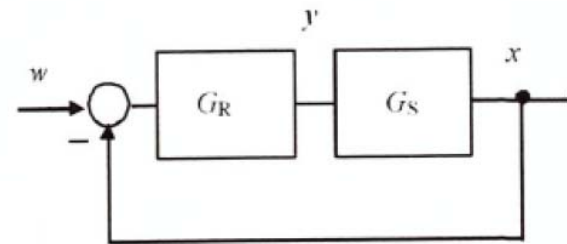
Beispiel Regelkreisanalyse/-synthese

Eine PT2-Strecke mit der Übertragungsfunktion

$$G_S(p) = \frac{0,8}{(1+2p)(1+0,5p)}$$

wird mit einem PI-Regler mit der Übertragungsfunktion

$$G_R(p) = K_R \left(1 + \frac{1}{pT_N}\right)$$



und den Werten $K_R = 3,5$ und T_N in dem angegebenen Regelkreis geregelt.

- 1 Bestimmen Sie T_N so, dass die größte Zeitkonstante der Strecke kompensiert wird.
- 2 Geben Sie die Übertragungsfunktion $G_O(p)$ des offenen Kreises mit Zahlenwerten an. Dabei sind mögliche Kürzungen vorzunehmen.
- 3 Geben Sie die Führungsübertragungsfunktion $G_W(p)$ des Regelkreises mit einem Bruch und mit Zahlenwerten an.
- 4 Bringen Sie $G_W(p)$ auf die Form einer PT2-Übertragungsfunktion und bestimmen Sie die Dämpfung D und die Eigenkreisfrequenz ω_0 .
- 5 Welche Überschwingweite $\bar{u}_w$ ergibt sich mit der nach Aufgabe 4 ermittelten Dämpfung?
- 6 Geben Sie von der Antwort des geschlossenen Regelkreises nach einem Führungssprung mit der Amplitude $w_0 = 5$ den stationären Endwert der Regelgröße x_{stat} an.
- 7 Bestimmen Sie ebenso den stationären Endwert der Regelgröße für eine Störgröße $z=0,5$, die subtraktiv zwischen Regler und Strecke einwirkt.

Praxisrelevanz der Übertragungscharakteristiken

▪ 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 .

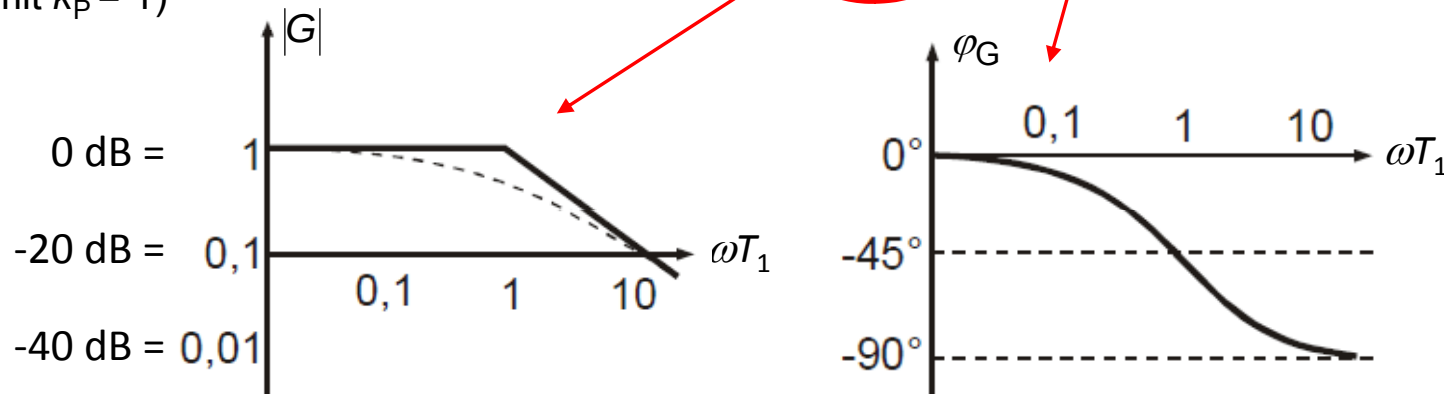
Übersicht Reglerauswahl und Einstellung

- 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 (bspw. Symmetrisches Optimum)

Betrag und Phase: Bodediagramm

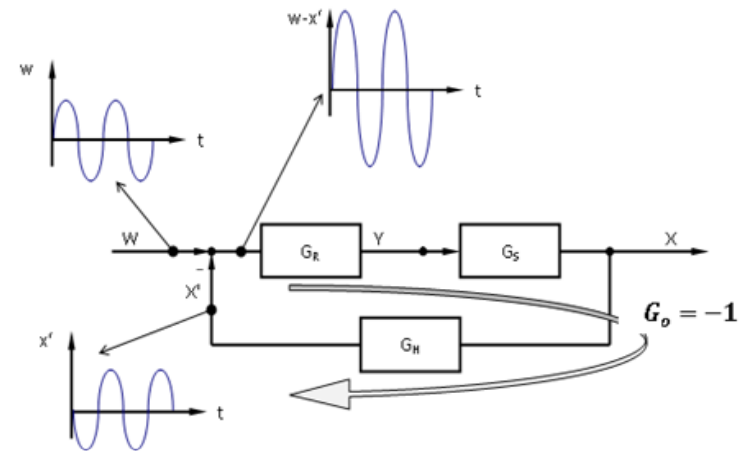
- **Frequenzgang:** Zur Beurteilung der Eigenschaften eines linearen Systems für verschiedene Frequenzen, wie bspw. beim Praxistest von Stoßdämpfern oder Lautsprechersystemen, dient der Frequenzgang. Dabei werden Veränderungen in der Amplitude und der Zeitverzögerung von Eingangssignal zu Ausgangssignal ermittelt und als Betrag und Phase über der Frequenz aufgetragen (**Bodediagramm**). Mathematisch wird diese Information aus der **Übertragungsfunktion** gewonnen, aus der für $p = j \cdot \omega$ 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 $k_P = 1$)



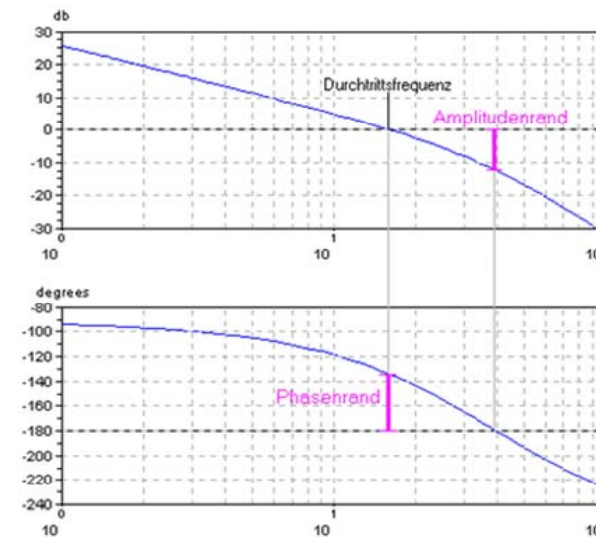
“Offener Regelkreis”: Übertragungsfunktion G_o

- 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 $G_R \cdot G_S \cdot G_F = G_o$: „**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 $G_o = -1$, d.h. $|G_o| = 1$ und $\varphi_{G_o} = -180^\circ$, findet sich auch im Nennerpolynom von Führungs- wie Störungsübertragungsfunktion des Kreises wieder, kann also im **Bode-diagramm** von G_o analysiert und entschärft werden.
- Wegen $G_o = G_R \cdot G_S \cdot G_F = |G_R| \cdot e^{j\varphi_{GR}} \cdot |G_S| \cdot e^{j\varphi_{GS}} \cdot |G_F| \cdot e^{j\varphi_{GF}} = |G_R| \cdot |G_S| \cdot |G_F| \cdot e^{j(\varphi_{GR} + \varphi_{GS} + \varphi_{GF})}$ 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 G_R , G_S und G_F** das Bodediagramm von G_o .



Stabilitätskriterien

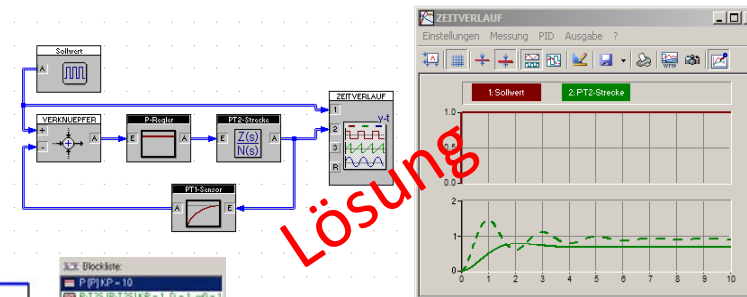
- **Grundsätzlich** ist ein Regelkreis (-glied) **stabil**, wenn auf eine beschränkte Eingangsgröße (Sollwert, Störgröße) stets eine beschränkte Ausgangsgröße (Beharrungswert) folgt.
- **Strukturstabilität** liegt vor, wenn alle Lösungswurzeln p_i des Nennerpolynoms der Kreisübertragungsfunktion (= Pole 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 mit WINFACT-Boris bzw. BodeTrainer

Analysieren Sie das Einstellverhalten eines Regelkreises mit PT_2 -Strecke ($K_S=1$, $D=1$, $\omega_0=1 \text{ s}^{-1}$) und verzögerungsarmen Sensor ($K_F=1$, $T_F=0,1\text{s}$), geregelt mit P-Regler:

- Erstellen Sie die Blockstruktur mit WF-Boris und analysieren Sie die Sprungantwort für $k_p = 10$ sowie für $k_p = 2$.



- Bestimmen Sie durch Analyse von Go mit WF-BodeTrainer die auftretenden Phasenreserven, Amplitudenränder sowie Durchtrittskreisfrequenzen wiederum für $k_p = 10$ sowie für $k_p = 2$.

