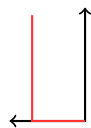
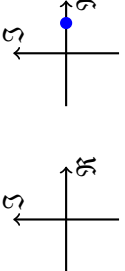
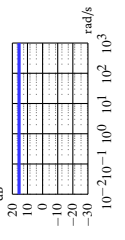
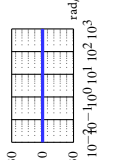
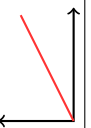
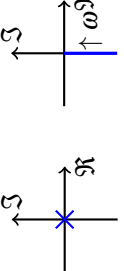
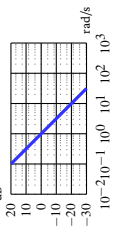
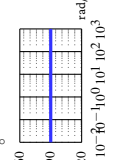
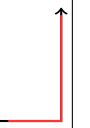
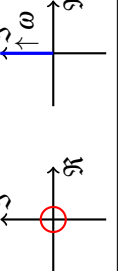
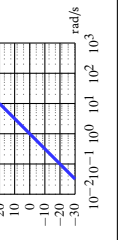
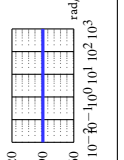
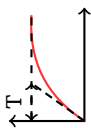
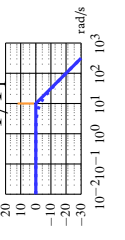
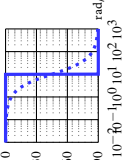

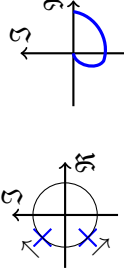
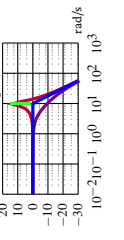
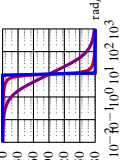
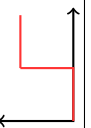
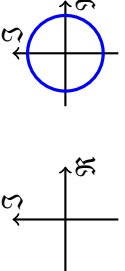
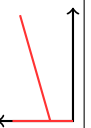
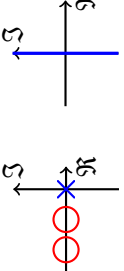




P		$y(t) = Ku(t), \quad A(i\omega) = K$ $G = K, \quad \varphi(\omega) = 0$			
I		$y(t) = K_I \int_0^t u(t) dt, \quad A(i\omega) = \frac{1}{T_N \omega}$ $G = \frac{K_I}{s}, \quad \varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}$			
D		$y(t) = Ku'(t), \quad A(i\omega) = T_V \omega$ $G = sT_V, \quad \varphi(\omega) = \frac{\pi}{2}$			
PT1		$Ty' + y = Ku(t), \quad A(i\omega) = \frac{K}{\sqrt{1 + (T_N \omega)^2}}$ $G = \frac{K_P}{1 + Ts}, \quad \varphi(\omega) = -\arctan(\omega T)$			
PT2		$\frac{y''}{\omega_0^2} + \frac{2Dy'}{\omega_0} + y = Ku(t)$ $G = K_P / (1 + \frac{2D}{\omega_0}s + \frac{1}{\omega_0^2}s^2)$ $A(i\omega) = \frac{K}{\sqrt{(1 - (T_1)^2)^2 + (2 \cdot D T_2)^2}}$ $\varphi(\omega) = -\arctan\left(\frac{2 \cdot D \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2}\right)$			
PTt		$y(t) = Ku(t - T_t), \quad A(i\omega) = K$ $G = Ke^{-sT_t}, \quad \varphi(\omega) = -\omega \cdot T_t$			
PID		$y = K \left( u(t) + T_V u'(t) + \frac{1}{T_N} \int_0^t u(t) dt \right)$ $G = K_P \left[ 1 + \frac{1}{T_N s} + T_V s \right] u(t) dt$ $A(i\omega) = \frac{K_R}{\omega T_N} \sqrt{\left( 1 + (\omega \cdot T_N)^2 \right)^2 \left( 1 + (\omega \cdot T_V)^2 \right)}$ $\varphi(\omega) = -\arctan\left(\frac{1 - \omega^2 \cdot T_N \cdot T_V}{\omega(T_N + T_V)}\right)$			

## Linearisieren

$$h(x) = h(x_0) + \frac{\partial h(x_0)}{\partial x} (x - x_0)$$

### Ableitungssatz

$$\mathcal{L}\{y(t)\} = Y(s)$$

$$\mathcal{L}\{y'(t)\} = s \cdot Y(s) - y(0)$$

$$\mathcal{L}\{y''(t)\} = s^2 \cdot Y(s) - sy(0) - y'(0)$$

### Partialbruchzerlegung

$$(s+1) \rightarrow \frac{A}{s+1}$$

$$(s+1)^2 \rightarrow \frac{A}{s+1} + \frac{B}{(s+1)^2}$$

$$(s^2+1) \rightarrow \frac{As+B}{s^2+1}$$

### System-/Sprungantwort

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s)$$

$$\mathcal{L}^{-1}(Y(s)) = \mathcal{L}^{-1}(G(s)U(s))$$

mit:  $U(s) = \frac{1}{s} F_{\text{ext}} \leftarrow$  Einheitssprung  
falls  $\text{alle } < 0$  sind mit  $-1$  multiplizieren

### Frequenzgang

$$G(s) = G(i\omega) = |G(i\omega)| \cdot e^{i\varphi(i\omega)}$$

$$|G(i\omega)| = \sqrt{\Re^2 + \Im^2} = A(i\omega)$$

$$|G(i\omega_d)| = 1 \leftarrow \text{Durchtrittsfrequenz}$$

$$A_R = \frac{1}{|G_0(i\omega_\pi)|}$$

$$\varphi_0(i\omega_d) = \alpha_R - \pi$$

$$\varphi_0(\omega_\pi) = -\pi$$

$$\alpha_R = \varphi_0(\omega_d) + \pi$$

## Hurwitz

- $\forall a_i \in [a_0, \dots, a_n], a_i < 0 \wedge a_1 > 0$
- $D_1 = a_2 \stackrel{!}{>} 0$
- $D_2 = \det \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} \stackrel{!}{>} 0$
- $D_2 = a_1 a_2 - a_3 a_0 \stackrel{!}{>} 0$
- $D_3 = \det \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} \stackrel{!}{>} 0$
- $D_3 = a_1 a_2 a_3 - a_3 a_0 a_3 \stackrel{!}{>} 0$
- $D_3 = D_2 \cdot a_3$

### Vereinfachtes Nyquist Kriterium

ist anwendbar, wenn die Übertragungsfunktion

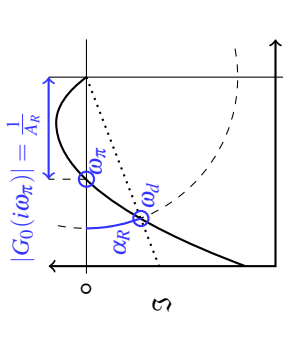
- Integrierendes Verhalten aufweist
  - Alle  $p_i > 0$  sind,
- falls  $\text{alle } < 0$  sind mit  $-1$  multiplizieren

$G_0(s) = G_S \cdot G_R \leftarrow$  Offene Kette  
Geschlossene Kette stabil, wenn kritische Punkt (-1,0) zur Linken der in Richtung zur Frequenz durchlaufenden Ortskurve des Frequenzgangs liegt.

$$m + p \stackrel{!}{=} 0$$

$p$  = Anzahl positiver Pole des Offenen Regelkreises

$m$  = Anzahl der Umläufe um -1 im Uhrzeigersinn



Störunterdrückung  $\sim$   
 $1,5 < \alpha_R < 3,0$  und  $20^\circ < \alpha_R < 70^\circ$   
 Führungsverhalten  $\sim$   
 $4 < A_R < 10$  und  $40^\circ < \alpha_R < 60^\circ$

### Trigonometrie

$$\sin(0) = 0$$

$$\cos(0) = 1$$

$$\arctan(0) = 0$$

$$\arctan(\infty) = \frac{\pi}{2}$$

$$\arctan(-\infty) = -\frac{\pi}{2}$$

## Regelverstärkung/Abweichung

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} (s \cdot Y(s)) = \lim_{s \rightarrow 0} (s \cdot Z(s) \cdot F_Z) = \text{Regelabweichung}$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left( s \cdot \frac{1}{s} G_W(s) \right) = 1 - \text{Verstärkung/Abweichung}$$

$$Z(s) = -\frac{1}{s} \lim_{s \rightarrow 0} \left( s \cdot \frac{1}{s} \cdot G_z(s) \right) = 1 - (1 - \text{Abweichung})$$

$$W(s) = -\frac{1}{s} \text{Einheitssprung}$$

## MIMO

- falls  $\Lambda = f(s)$ , wähle stationären Zustand ( $s = i, \omega = i0 = 0$ )

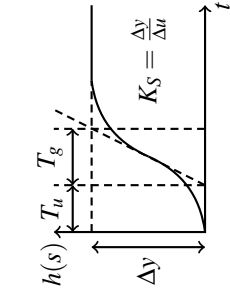
$$\Lambda = \frac{1}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} \begin{pmatrix} G_{11}G_{22} & -G_{12}G_{21} \\ -G_{12}G_{21} & G_{11}G_{22} \end{pmatrix}$$

(Zeilen/Spaltensummen  $\hat{=}$  1)

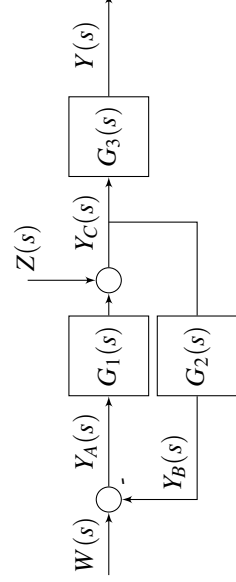
- Kopple die Stell- und Regelgrößen deren  $\lambda$  nahe zu 1.

$$3. \ N = \frac{\det|G_S(s=0)|}{\prod_{i=1}^n G_{Sii}(s=0)} \geq 0$$

### Chien, Hrones, Reswick



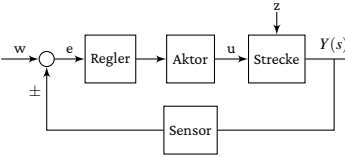
	Regler	Aperiodisch				Überschwingung			
		Störung	Führung	Störung	Führung	Störung	Führung	Störung	Führung
P	$K_R$	$\frac{0.3}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.3}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.7}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.7}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.3}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.3}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.7}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.7}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$
PI	$K_R$	$\frac{0.6}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.35}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.7}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.6}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.6}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.6}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.6}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.6}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$
	$T_n$	$4T_u$	$4T_u$	$1.2T_g$	$2.3T_u$	$2.3T_u$	$2.3T_u$	$2.3T_u$	$2.3T_u$
PID	$K_R$	$\frac{0.95}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.6}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{1.2}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.95}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.95}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.95}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.95}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0.95}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$
	$T_n$	$2.4T_u$	$2.4T_u$	$T_g$	$2T_g$	$2T_g$	$2T_g$	$1.35T_g$	$1.35T_g$
	$T_v$	$0.42T_u$	$0.5T_u$	$0.42T_u$	$0.42T_u$	$0.42T_u$	$0.42T_u$	$0.42T_u$	$0.42T_u$



$$Y_A = W - Y_B, \quad Y_B = G_2 \cdot Y_C$$

$$Y_C = Y_A \cdot G_1 + Z, \quad Y = Y_C \cdot G_3$$

$$\Rightarrow Y = \frac{W G_3 + Z}{1 + G_2 G_3}$$



**Sensor** wandelt physikalische in elektrische Signale.

**Aktor** wandelt Elektrische in physikalische Signale.

**Messgrößenumformung** z.B. thermische → mechanische → elektrisch

**Eingangsrößen** Wirkung der Umgebung auf das System, gezielt beeinflssbar, können zur Steuerung und Regelung verwendet werden.

**Zustandsgrößen** beschreiben einen solchen Zustand, in dem sich das Svsstem zu jedem Zeitpunkt befindet: interne Größen des Systems; können auch Ausgangsgrößen sein.

**Ausgangsgrößen** Wirkung des Prozesses auf die Umgebung

**Regelgrößen** sind geregelte Ausgänge

**gemessene Ausgänge** = primäre Messgrößen

**SISO/MISO** Singel-Input-Single-Output / Multiple-Input-Multiple-Output

**Stellgrößen** Eingangsgrößen, die zur Steuerung oder Regelung benutzt werden

**konzentriert:** Eine differentielle Größe bildet das System ab → ODE

**verteilt** Partielle Differentialgleichung nötig

**implizit** über differentiale von der Zeit ab (eg. Federschwinger)

**explizit** von der Zeit ab (eg. Federschwinger mit m = m(t))

**zeitkontinuierlich** h(t) ist für alle t definiert und > 0 (eg. Wassertank)

**zeitdiskret** h(t) ist nicht für alle t definiert (eg. Lagerbestand, jeder digitale Sensor)

**stabil** kehrt nach Störung in die Ruhelage zurück

**instabil** ruhelage wird nach Störung dauerhaft verlassen

**linearität** Verstärkungsprinzip und Superpositionsprinzip gelten

$$\varphi \cdot (\alpha + \beta) = \varphi \cdot \alpha + \varphi \cdot \beta$$

**nichtlineartät** eg. Druck am Boden eine Wasserbehälters

**Blockschaltbilder Zweck**

- Systemidentifikaton / Klassifikation (Blockschaltbilder, SISO → MIMO)
- Mathematische Modellierung (Aufstellen von (DBLn, Linearisieren, Laplace-Transformation)
- Modellanalyse (Reglertypen, Rechnen mit Blockschaltbildern, Stabilitätsanalyse)

**statische Blöcke** sind nicht abhängig von der Zeit → doppelt umrahmt

**dynamische Blöcke** sind Zeitlich abhängig (DGL) → einfach umrahmt

**Superposition** Lineare Abbildung  $f(ax+y) = af(x) + f(y)$

**Laplace Transformation**

$$F(s) = L\{f(t)\} = \int_{-0}^{\infty} f(t) \cdot e^{-st} dt$$

**Impulsfunktion**

$$\delta(t) =$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \begin{cases} 1/\varepsilon & \text{für } t \in [0, \varepsilon] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\text{mit } \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau) d\tau = 1$$

**Gewichtsfunktion** Grenzwertverhalten gibt Information über die Stabilität.

$$g(t) = \frac{y(t)}{\int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau}$$

**Sprungfunktion**

$$u(t) = u_0 H(t)$$

**Sprungfunktion**

$$s(t) = \int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau$$

**Übergangsfunktion**

$$h(t) = \frac{y(t)}{u_0} = \frac{\text{Sprungantwort}}{\text{Sprunghöhe}} = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau$$

**Sprungantwort** Reaktion des Systems auf die Sprungfunktion.

**Impulsantwort** Reaktion des Systems auf die Impulsfunktion.

**Bode-Diagramm** logarithmische Darstellung der Amplitude und Phasenverschiebung.

**Reihenschaltung im Bode-Diagramm** Multiplikation wird zur Addition durch logarithmische Scalierung

**Frequenzgang** Ein-/Ausgangsverhältnis von Amplitude und Phase  $\frac{Y}{U} = G(i\omega)$

**Ortskurve** Darstellung von Phase und Frequenz als Verlauf des Vektors  $\begin{pmatrix} \Re(G(i\omega)) \\ \Im(G(i\omega)) \end{pmatrix}$  bestimmbar durch Anregung und Messung von verschiedenen Frequenzen.

**Amplituden-/phasenreserve** gibt mögliche Amplituden-

/phasenerhöhung bis zur Instabilität an.

**Übertragungsstabil**

beschränktes Eingangssignal → beschränktes Ausgangssignal

**Kaskadenregelung** Hauptregler legt Sollwert eines Hilfsreglers fest

Untergeordneter Hilfsregler verbirgt Störungen in dem Prozessteil, den er regelt, vor dem übergeordneten Regler

**Zweck:** oft zur Beschleunigung von Regelvorgängen



**Vorregelung** Regle wichtige Größe, bevor sie das eigentliche zu regelnde System erreicht, zur minder von Störungen. duh *Beispiel:* isothermer Reaktor zu Bakteriellen Abwasserreinigung

**Störgrößenaufschaltung**

Messen von Störgrößen bevor sie bei der Hauptregelung ankommen, benötigt hilfsregler und messbare Störgröße. Ermöglicht schnelleres eingreifen.

**Override-Regelung** Regelung kann zwischen verschiedenen Modi umgeschaltet werden

**Auswahllogik** Ein Regler wählt immer die relevanteste Größe von verschiedenen Sensoren aus

**Verhältnisregelung** Verhältnis von Messgrößen wird ausgewertet

**Advanced Process Control (APC)** In technischer Anwendung müssen , Prozessregler während des Betriebs zur

Verbesserung der Regelgüte angepasst werden (Control Performance Management)

**Massnahmen:** Integration von Überwachungsbausteinen in die jeweiligen Regelkreise (z.B. ConPerMon von Siemens), Automatische Protokollierung von Regelgüte und auftretenden Fehlern Verbess bedarf

Hintergrund: Durch große Anzahl an (PID-) Reglern innerhalb eines großtechnischen Prozesses ist eine manuelle Überwachung der Regelkreise und Veränderung der Parameter während des Betriebs oft nicht möglich. → Process-Controll-Management

**Loopshaping** Optimierung der offenen Kette meist durch "Spaping" von Frequenzgang/Ortskurve.

**Nyquist Kriterium** Die Ortskurve muss den Punkt -1 für den Durchlauf der Frequenzen von  $-\infty \rightarrow \infty$  so oft umlaufen, wie der offene Kreis Pole in der Linken Halbebene besitzt.

**Nyquist-Vorteil** auf offene kette anwendbar

$$\text{Regelfaktor } R = \frac{\Delta_{\text{MISO}}}{\Delta_{\text{MISO}0}} = \frac{\text{bl. Regelabweichung mit Regler}}{\text{bl. Regelabweichung ohne Regler}}$$

**betraglineare Regelfläche**  $I = \int_0^{\infty} |y(t) - w| dt$

**zeitbeschwerte**

**betraglineare Regelfläche**  $I = \int_0^{\infty} |y(t) - w| t dt \rightarrow$  gewichtet später auftretende Abweichungen stärker.

**quadratische Regelfläche**  $I = \int_0^{\infty} (y(t) - w)^2 dt \rightarrow$  gewichtet größere abweichun-

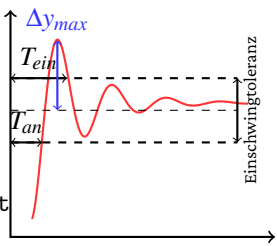
gen Stärker.

**Totzeitglied** Zeitliche Verzögerung ohne verstärkung z.B Rohr, Mechanische Laufzeiten

**Systemidentifikation Bild-vs Zeitbereich** Zeitbereich ist einfacher aber Bildbereich ist genauer.

**Festwertregelung** w = const.

**Folgeregelung** w = w(t)



**Fließbilder**

TC = Temperaturregler

FC = Durchflussregler

CC = Konzentrationsregler

TI = Temperatursensor

LI = Höhenmesser

**KI** Mustererkennung, Analyse, Kommunikation

**Fuzzy-Control** Fuzzifizierung (Bewertungsfunktionn), Auswertung von Expertenregeln, Defuzzifizieren

**Neural-Network** Menschliches Denken nachbilden

**Neuron** Empfang und Ausgang von Signalen, nimmt gewichtung vor