

Einführung

Regelgröße	Ausgangsgröße der Regelstrecke, die auf einem vorgegebenen konstanten o. veränderlichen Wert gehalten werden soll,	
Führungsgröße	Von außen zugeführte Größe, der die Regelgröße folgen soll.	
Störgröße	Jede Größe, die auf die Regelgröße wirkt, mit Ausnahme der Stellgröße.	
Stellgröße	Ausgangsgröße des Reglers, durch deren Änderung die Regelgröße über die Regelstrecke beeinflusst werden.	
Regelstrecke	Gerät, Anlage o.a., dessen Ausgangsgröße geregelt wird, indem eine oder mehrere Eingangsgrößen verändert werden.	
Regler	Gerät, das Regel- und Führungsgröße bzw. Sollwert miteinander vergleicht und aus der Differenz die Stellgröße bildet	

statisches Verhalten

Eigenschaften von Regelkreisgliedern u. Regelkreisen nach Abklingen von Übergangs- u. Einschwingvorgängen
 Darstellungsmöglichkeiten: Kennlinie, Kennlinienfeld, Wertetabelle, Formel

Linearisierung

geg.: nichtlin. Zusammenhang (Formel, Kennlinie(nfeld))	$Y = f(U, Z_1, Z_2, \dots)$
Ansatz	$y = K_u \cdot u + K_{z1} \cdot z_1 + K_{z2} \cdot z_2 + \dots$
analytische Linearisierung	$K_u = \left[\frac{\partial Y}{\partial U} \right]_A$
graphische Linearisierung (Tangentenverfahren)	$K_u \approx \left[\frac{\Delta Y}{\Delta U} \right]_{Z_1=Z_{10}, Z_2=Z_{20}, \dots}$

!!!! Bei Darstellung in impliziter Form und/oder Verwendung von Zwischenvariablen folgendes Vorgehen:!!!

- 1) Mit den gegebenen nichtlinearen Beziehungen sind alle benötigten **Arbeitspunktwerte** für alle Variablen zu **ermitteln**.
- 2) **Jede** gegebene **nichtlineare** Beziehung ist durch eine vollständige **lineare** Gleichung zu **ersetzen**, die durch Linearisierung für den gegebenen Arbeitspunkt entsteht.
- 3) Durch **Zusammenfassung** mit **Elimination** von Zwischenvariablen und Umformen sind die nach 2. gewonnenen linearen Gleichungen in die gewünschte Form zu bringen.

statisches Verhalten von Regelkreisen

P - Regler <ul style="list-style-type: none"> ➤ Gerade als Kennlinie; vgl. S.22 (2.32) ➤ bleibende Regelabweichung ➤ schnelle Reaktion 		I - Regler <ul style="list-style-type: none"> ➤ waagerechte Kennlinie; vgl. S.22 Absatz 2 ➤ keine bleibende Regelabweichung ➤ langsame Reaktion
Regelfaktor $R = \frac{\Delta X_{mR}}{\Delta X_{oR}} = \frac{1}{1 + K_R K_y} < 0,2$ <p>Steigung der Reglerkennlinie muss ein der Steigung der Regelstreckenkennlinie entgegengesetztes Vorzeichen haben</p>		Proportionalbereich <p>X_h : Regelbereich a : Proportionalbereich X_p : bezogener Prop.-bereich (auf X_h) $1\% < X_p < 500\%$ $\downarrow X_p$ bei $\uparrow K_R$</p>

Dynamisches Verhalten von Übertragungsgliedern

lineare Übertragungsglieder

Beschreibung durch **lineare Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten**:

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_2 \ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y = b_0 u + b_1 \dot{u} + b_2 \ddot{u} + \dots + b_m u^{(m)}$$

deren **homogener Teil der Lösung** (rechte Seite zu Null gesetzt) für einfache reelle Nullstellen von der Form:

$$y_h(t) = C_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot e^{\lambda_2 t} + \dots + C_n \cdot e^{\lambda_n t} \quad \text{ist (andere Fälle vgl. Taschenbuch S. 59)}$$

mit λ_i als Nullstellen des **charakteristischen Polynoms**

$$a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0 = 0$$

Für Untersuchungen von Stabilität und Einschwingverhalten ist wichtig:

- charakteristisches Polynom enthält die Koeffizienten der homogenen linearen DGL
- die Nullstellen λ_i bestimmen maßgeblich das Verhalten der Lösung

Verstärkungsprinzip	Eingangsgröße $c \cdot u(t) \Rightarrow$ Ausgangsgröße $c \cdot y(t)$
Überlagerungsprinzip	Eingangsgröße $u(t)=u_1(t)+u_2(t)+u_3(t) \Rightarrow$ Ausgangsgröße $y(t)=y_1(t)+y_2(t)+y_3(t)$

Laplace-Transformation

anwendbar, wenn die Eingangsgröße für $t < 0$ verschwindet

$F(s)$	$f(t)$ für $t > 0$ ($f(t) = 0$ für $t \leq 0$)
$\frac{1}{(s-s_p)^n}$	$\frac{1}{(n-1)!} t^{n-1} e^{s_p t}$ $n = 1, 2, 3, \dots$
1	$\delta(t)$
$\frac{1}{s}$	$1(t)$
$\frac{1}{s^2}$	t
$\frac{1}{1+sT}$	$\frac{1}{T} e^{-t/T}$
$\frac{\omega_0^2}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2}$	$\frac{\omega_0}{\sqrt{1-D^2}} e^{-D\omega_0 t} \sin(\sqrt{1-D^2} \omega_0 t)$ $D < 1$ $\omega_0^2 t e^{-D\omega_0 t}$ $D = 1$ $\frac{\omega_0}{\sqrt{D^2-1}} e^{-D\omega_0 t} \sinh(\sqrt{D^2-1} \omega_0 t)$ $D > 1$
$\frac{1}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$	$\frac{1}{T_1 - T_2} (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2})$ $T_1 \neq T_2$
$\frac{s}{1+sT}$	$\frac{1}{T} (\delta(t) - \frac{1}{T} e^{-t/T})$
$\frac{s}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$	$\frac{1}{T_1 T_2 (T_1 - T_2)} (T_1 e^{-t/T_2} - T_2 e^{-t/T_1})$ $T_1 \neq T_2$
$\frac{s\omega_0^2}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2}$	$\omega_0^2 e^{-D\omega_0 t} (\cos \omega_D t - \frac{D}{\sqrt{1-D^2}} \sin \omega_D t)$ $D < 1$ $\omega_D = \sqrt{1-D^2} \omega_0$
$\frac{1}{s(1+sT)}$	$1 - e^{-t/T}$
$\frac{1}{s(1+sT_1)(1+sT_2)}$	$1 - \frac{1}{T_1 - T_2} (T_1 e^{-t/T_1} - T_2 e^{-t/T_2})$ $T_1 \neq T_2$
$\frac{\omega_0^2}{s(s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2)}$	$1 - e^{-D\omega_0 t} (\cos \omega_D t + \frac{D}{\sqrt{1-D^2}} \sin \omega_D t)$ $D < 1$ $\omega_D = \sqrt{1-D^2} \omega_0$

Rechenregeln

Operation	Zeitbereich	Bildbereich
Multiplikation mit einer Konstanten	$f(t) = a \cdot f_1(t)$	$F(s) = a \cdot F_1(s)$
Summenbildung	$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + \dots$	$F(s) = F_1(s) + F_2(s) + \dots$
Verschiebung	$f(t) = f_1(t - T_t)$	$F(s) = F_1(s) \cdot e^{-sT_t} \quad (T_t \geq 0)$
Verallgemeinerte Differentiation	$f(t) = \dot{f}_1(t)$	$F(s) = sF_1(s) - f_1(-0)$
	$f(t) = \ddot{f}_1(t)$	$F(s) = s^2 F_1(s) - s f_1(-0) - \frac{df_1}{dt}(-0)$
	$f(t) = f_1^{(n)}(t)$	$F(s) = s^n F_1(s) - \sum_{k=1}^n s^{n-k} \frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}} f_1(-0)$
		$f(-0)$ ist der Grenzwert von $f(t)$, der sich ergibt, wenn t von negativen Werten aus gegen null geht, $\frac{df}{dt}(-0)$ ist der Grenzwert der gewöhnlichen Differentiation.
Integration	$f(t) = \int_0^t f_1(\tau) d\tau$	$F(s) = \frac{1}{s} F_1(s)$
Anfangswert	$\lim_{t \rightarrow 0} f(t)$	$\lim_{s \rightarrow \infty} s \cdot F(s)$
Endwert	$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t)$	$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot F(s)$

Gesucht	Gegeben		
	Übertragungsfunktion $G(s)$	Gewichtsfunktion $g(t)$	Übergangsfunktion $h(t)$
Übertragungsfunktion $G(s)$	–	$G(s) = \mathcal{L}\{g(t)\}$	$G(s) = \mathcal{L}\{h(t)\} s$
Gewichtsfunktion $g(t)$	$g(t) = \mathcal{L}^{-1}\{G(s)\}$	–	$g(t) = \frac{d}{dt} h(t)$
Übergangsfunktion $h(t)$	$h(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{G(s)}{s}\right\}$	$h(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$	–

Übergangsfunktion

$$h(t) = \frac{\text{Sprungantwort}}{\text{Sprunghöhe}} = \frac{y(t)}{u_0}$$

Antwort bzw. Lösung der DGL für einen Einheitssprung $1(t)$

Dimension: gleich der des Übertragungsfaktors

Gewichtsfunktion

$$g(t) = \frac{\text{Impulsantwort}}{\text{Impulsfläche}} = \frac{y(t)}{\int u \cdot dt}$$

Antwort bzw. Lösung der DGL für einen Einheitsimpuls $\delta(t)$

Dimension: gleich der des Übertragungsfaktors dividiert durch Sekunde

Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0}$$

für den Fall verschwindender Anfangsbedingungen

- **Y(s)** und **U(s)** sind die **Laplace-Trafos** von **y(t)** und **u(t)**
- Zusammenhang mit der DGL vgl. S.53 (3.71 ff) ⇒ Differentiation im Bildbereich im Fall verschwindender Anfangsbedingungen
- grafische Darstellung in der komplexen Ebene durch Pol- und Nullstellen (Satz von Vieta, vgl. S.54 (3.75f))
- gleiche **Koeffizienten** wie die **lineare DGL**
- siehe auch Rechenregeln (S.5)

Frequenzgang

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{U(j\omega)} = \frac{\underline{y}(t)}{\underline{u}(t)} = \frac{Y \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}}{U \cdot e^{j\omega t}} = \frac{\underline{y}}{\underline{u}} = \frac{Y \cdot e^{j\varphi}}{U} = \frac{b_m(j\omega)^m + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + \dots + a_1(j\omega) + a_0} = |G(j\omega)| \cdot e^{j\varphi}$$

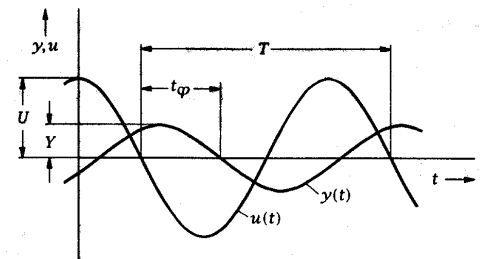
- unterstrichene Größen sind **komplexe Zeiger**
- Zusammenhang mit der DGL vgl. S. 58 (3.82 ff) ⇒ Differentiation im Frequenzbereich im Fall verschwindender Anfangsbedingungen (formal durch Ersetzen von s der Übertragungsfunktion durch $j\omega$)
- gleiche **Koeffizienten** wie die **lineare DGL**
- **Betrag** gibt das **Verhältnis der Amplituden** von Ausgangs- und Eingangsschwingung im eingeschwungenen Zustand an

graphische Ermittlung des Frequenzganges

zeitlicher Verlauf von Ausgangs- u. Eingangsgröße für eine bestimmte Frequenz Ω (vgl. auch S. 93 (4.4)-(4.7))

$$|G(j\Omega)| = \frac{Y}{U} \quad \text{Betrag}$$

$$\varphi(j\Omega) = -\frac{t_\varphi}{T} = \arctan\left(\frac{\text{Im}\{G(j\Omega)\}}{\text{Re}\{G(j\Omega)\}}\right) \quad \text{Phase}$$

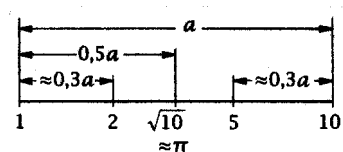


Ortskurve

- graphische **Darstellung** des **Frequenzganges** in der komplexen Ebene, (Parameter ω)
- Punkte = **Endpunkte von Zeigern** des Frequenzganges
- Punkte = Zeiger der Ausgangsgröße, falls die Eingangsgröße der Einheitszeiger ist
- Ortskurven werden immer **im Uhrzeigersinn** durchlaufen (mit wachsendem ω)
- vgl. S.68 (3.114 ff)

Bode-Diagramm

- graphische, **logarithmische Darstellung** des Frequenzganges (Amplituden- und Phasengang)
- Aufteilung der logarithmischen Einheit (vgl. Bild)
- Tabelle mit Rechenregeln (Seite 5) gilt ebenfalls für die Übertragungsfunktion



Grenzwertsätze

Übertragungsfunktion und Übergangsfunktion

$$\lim_{s \rightarrow 0} G(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} G(s) = \lim_{t \rightarrow 0} h(t)$$

Die Grenzwerte der Übergangsfunktion müssen existieren und endlich sein.

Frequenzgang und Übergangsfunktion

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} G(j\omega) = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} G(j\omega) = \lim_{t \rightarrow 0} h(t)$$

Es müssen jeweils beide Grenzwerte existieren.

- Wenn $\lim_{s \rightarrow \infty} G(s)$ für $s \rightarrow \infty$ existiert dann existiert meist auch $\lim_{t \rightarrow 0} h(t)$.
- $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$ für $t \rightarrow \infty$ existiert, wenn $G(s)$ bzw. $G(j\omega)$ ein stabiles System beschreibt. (vgl. S. 79 ff.)

Rechenregeln für Frequenzgänge und Übertragungsfunktionen

Bez.	Frequenzgang	Wirkungsplan
Parallelschaltung	$\underline{v}_1 = G_1 \cdot \underline{u}$ $\underline{v}_2 = G_2 \cdot \underline{u}$ $\underline{y} = \underline{v}_1 \pm \underline{v}_2$ $= (G_1 \pm G_2) \cdot \underline{u}$ $G = \frac{\underline{y}}{\underline{u}} = G_1 \pm G_2$	
Reihenschaltung	$\underline{y} = G_2 \cdot \underline{v}$ $\underline{v} = G_1 \cdot \underline{u}$ $\underline{y} = G_1 \cdot G_2 \cdot \underline{u}$ $G = \frac{\underline{y}}{\underline{u}} = G_1 \cdot G_2$	
Rückkopplung	$\underline{x} = G_v \cdot \underline{v}$ $\underline{y} = G_r \cdot \underline{x}$ $\underline{v} = \underline{z} \mp \underline{y}$ $\underline{x} = G_v (\underline{z} \mp \underline{y})$ $\underline{x} = G_v \cdot \underline{z} \mp G_v G_r \cdot \underline{x}$ $\underline{x} (1 \pm G_v G_r) = G_v \cdot \underline{z}$ $\underline{x} = \frac{G_v}{1 \pm G_v G_r} \underline{z}$ $G = \frac{\underline{x}}{\underline{z}} = \frac{G_v}{1 \pm G_v G_r}$ $G = \frac{G_v}{1 + G_0}$ $G_0 = - \frac{\underline{x}_a}{\underline{x}_e} = \pm G_v G_r$	

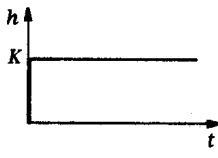
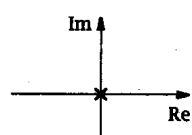
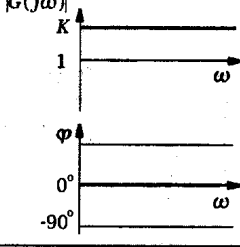
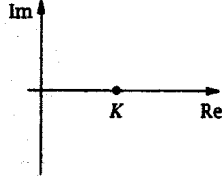
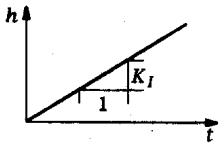
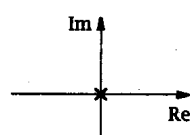
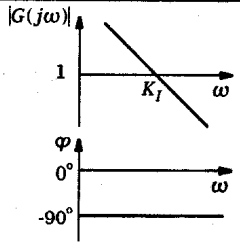
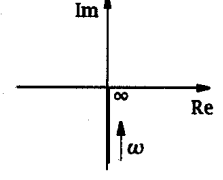
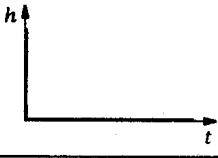
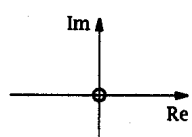
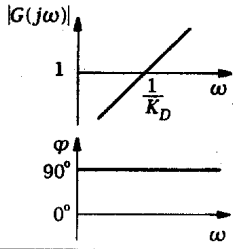
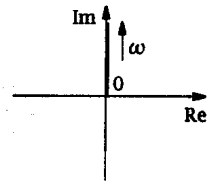
lineare Regelkreisglieder

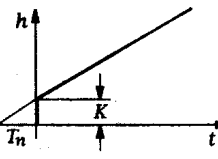
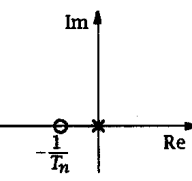
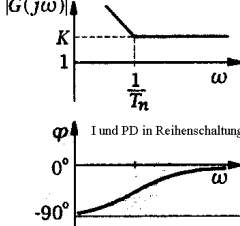
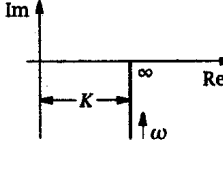
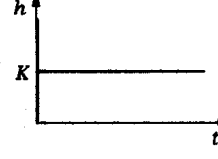
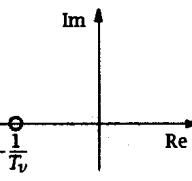
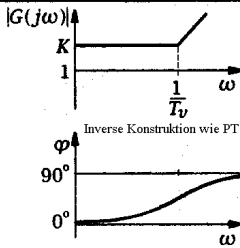
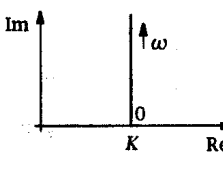
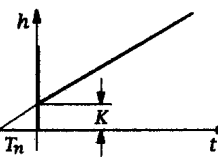
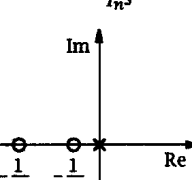
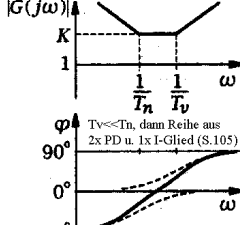
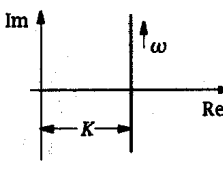
allgemeine lineare DGL unter Berücksichtigung von Totzeitgliedern:

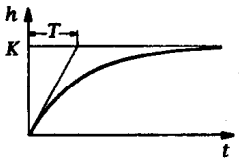
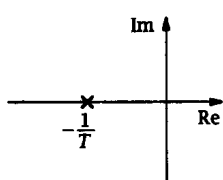
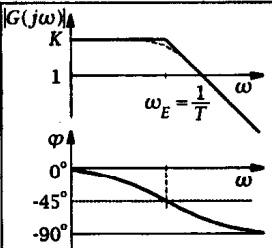
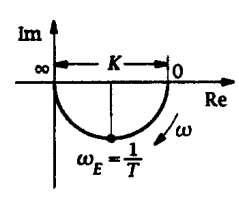
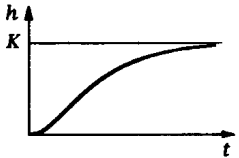
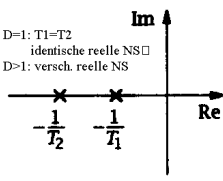
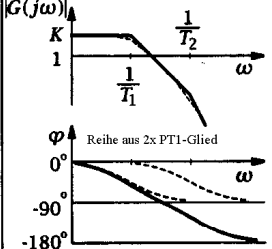
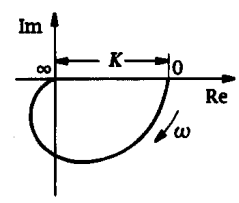
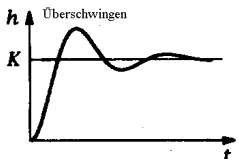
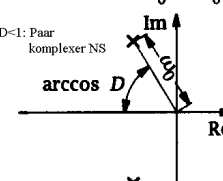
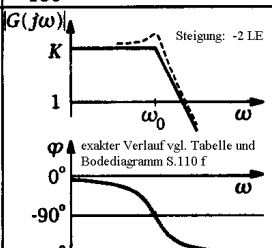
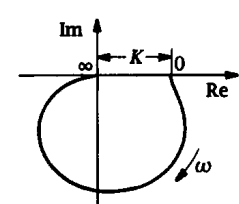
$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_2 \ddot{y}(t) + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = b_0 u(t - T_t) + b_1 \dot{u}(t - T_t) + b_2 \ddot{u}(t - T_t) + \dots + b_m u^{(m)}(t - T_t)$$

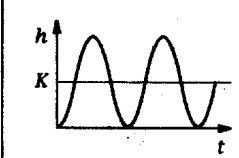
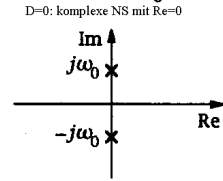
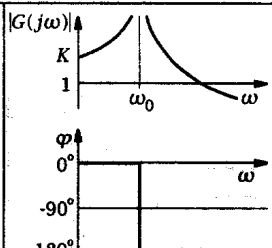
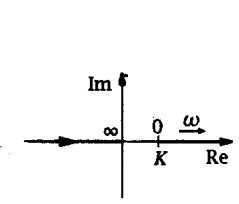
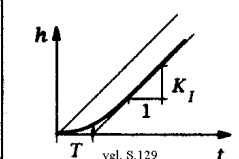
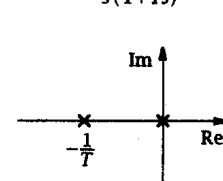
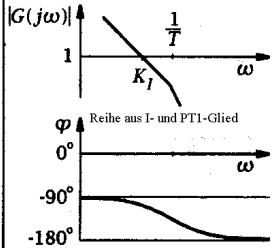
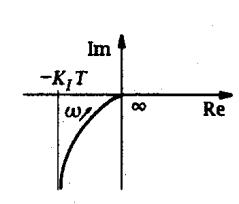
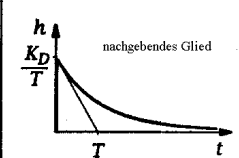
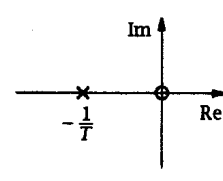
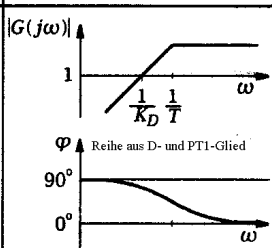
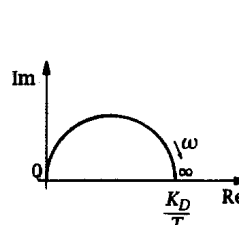
zugehörige allgemeine Übertragungsfunktion:

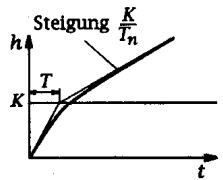
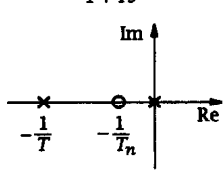
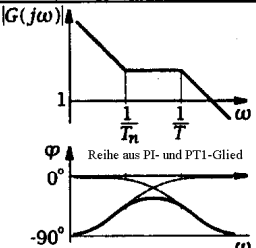
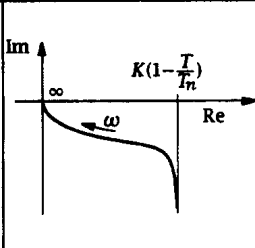
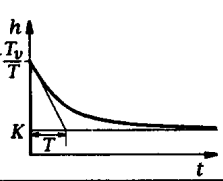
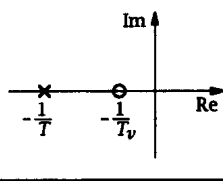
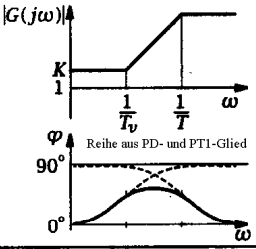
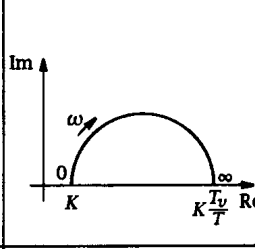
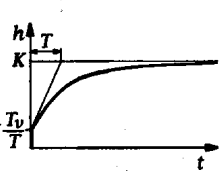
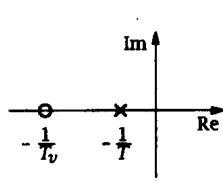
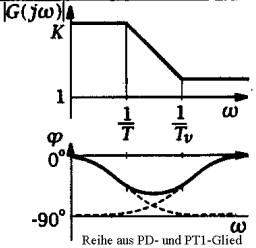
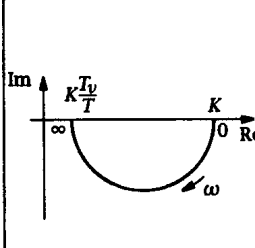
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \cdot e^{-sT_t}$$

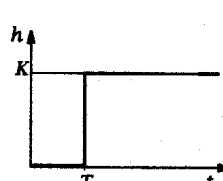
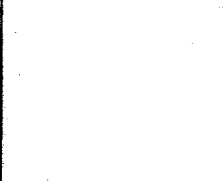
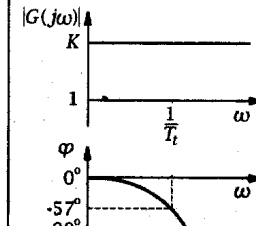
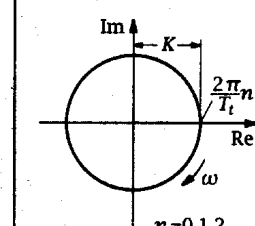
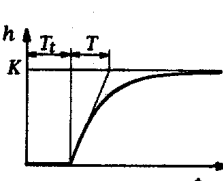
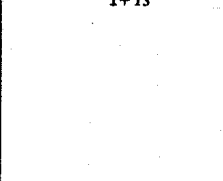
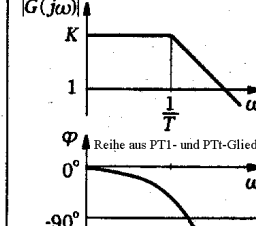
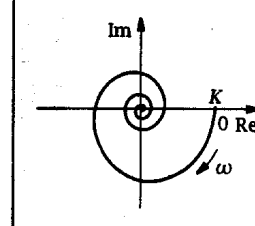
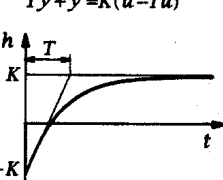
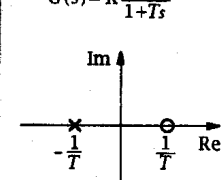
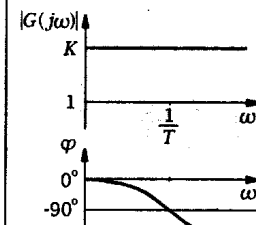
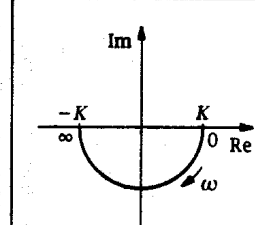
Bez.	Differentialgleichung und Übergangsfunktion	Übertragungsfunktion und Pol- und Nullstellen- Diagramm	Bode-Diagramm Amplituden- und Phasengang	Ortskurve des Frequenzgangs
P	$y = Ku$ 	$G(s) = K$ 		
I	$y = K_I \int u dt$ 	$G(s) = \frac{K_I}{s}$ 		
D	$y = K_D \dot{u}$ 	$G(s) = K_D s$ 		

PI S.102	$y = K(u + \frac{1}{T_n} \int u dt)$ 	$G(s) = K(1 + \frac{1}{T_n s})$ 		
PD S.100	$y = K(u + T_v \dot{u})$ 	$G(s) = K(1 + T_v s)$ 		
PID S.103	$y = K(u + \frac{1}{T_n} \int u dt + T_v \dot{u})$ 	$G(s) = K(1 + \frac{1}{T_n s} + T_v s)$ 		

Bez.	Differentialgleichung und Übergangsfunktion	Übertragungsfunktion und Pol- und Nullstellen Diagramm	Bode-Diagramm Amplituden- und Phasengang	Ortskurve des Frequenzgangs
PT_1	$T\dot{y} + y = Ku$ 	$G(s) = \frac{K}{1+Ts}$ 		
PT_2 ($D \geq 1$) S.107	$T_1 T_2 \ddot{y} + (T_1 + T_2) \dot{y} + y = Ku$ 	$G(s) = \frac{K}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}$ $D=1: T_1=T_2$ identische reelle NS $D>1$: versch. reelle NS 		
PT_2 ($D < 1$) S.109	$\ddot{y} + 2D\omega_0 \dot{y} + \omega_0^2 y = \omega_0^2 Ku$ 	$G(s) = \frac{\omega_0^2 K}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2}$ $D < 1$: Paar komplexer NS 		

PT_2 ($D=0$) S.109	$\ddot{y} + \omega_0^2 y = \omega_0^2 Ku$ 	$G(s) = \frac{\omega_0^2 K}{s^2 + \omega_0^2}$ $D=0$: komplexe NS mit Re=0 		
IT_1 S.113	$T\dot{y} + y = K_I \int u dt$  vgl. S.129 entspricht Rampenantwort eines PT1-Gliedes	$G(s) = \frac{K_I}{s(1+Ts)}$ 		
DT_1 S.114	$T\dot{y} + y = K_D \dot{u}$  nachgebendes Glied	$G(s) = \frac{K_D s}{1+Ts}$ 		

Bez.	Differentialgleichung und Übergangsfunktion	Übertragungsfunktion und Pol- und Nullstellen Diagramm	Bode-Diagramm Amplituden- und Phasengang	Ortskurve des Frequenzgangs
PIT₁ S.115	$T\dot{y} + y = K(u + \frac{1}{T_n} \int u dt)$ 	$G(s) = \frac{K(1 + \frac{1}{T_n s})}{1 + Ts}$ 	 <p>Reihe aus PI- und PT1-Glied</p>	
Tv > T PDT₁ S.115	$T\dot{y} + y = K(u + T_v \dot{u})$ 	$G(s) = K \frac{1 + T_v s}{1 + Ts}$ 	 <p>Reihe aus PD- und PT1-Glied</p>	
Tv < T PPT₁ S.116	$T\dot{y} + y = K(u + T_v \dot{u})$ 	$G(s) = K \frac{1 + T_v s}{1 + Ts}$ 	 <p>Reihe aus PD- und PT1-Glied</p>	

PT_t S.117	$y(t) = Ku(t - T_t)$ 	$G(s) = Ke^{-sT_t}$ 		 <p>$n=0,1,2,\dots$</p>
PT₁T_t S.117	$T\dot{y}(t) + y(t) = Ku(t - T_t)$ 	$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} e^{-sT_t}$ 	 <p>Reihe aus PT1- und PTt-Glied</p>	
PA₁ S.117	$T\dot{y} + y = K(u - T\dot{u})$ 	$G(s) = K \frac{1 - Ts}{1 + Ts}$ 		

Anmerkungen zu den Tabellen

P	I	D
➤ Regelstrecken, Mess- u. Stellgeräte, Regler		➤ Regelstrecken, Mess- u. Stellgeräte, selten als Regler

PI	PD	PID
➤ Regler		
➤ Parallelschaltung P- und I-Glied	➤ Parallelschaltung P- und D-Glied	➤ Parallelschaltung P-, I- und D-Glied
➤ Nachstellzeit $T_n = \frac{K_R}{K_I}$	➤ $\varphi = \arctan(\omega T_v)$	➤ Nachstellzeit $T_n = \frac{K_R}{K_I}$
➤ $\downarrow T_n \Rightarrow \uparrow$ Wirkung des I-Gliedes	➤ Vorhaltzeit $T_v = \frac{K_D}{K_R}$	➤ Vorhaltzeit $T_v = \frac{K_D}{K_R}$
	➤ für exakten Amplituden- und Phasengang Tabelle mit Korrekturwerten benutzen (PT ₁ und VZW)	➤ Vereinfachung S. 105 (4.31) ff beachten

PT ₁	PT ₂			PT _n
➤ Regelstrecken, Mess- und Stellglieder				
➤ keine Ableitung der Eingangsgröße u(t) auf der rechten Seite der DGL				
➤ Tangente im Ursprung der Übergangsfunktion h(t) lt. Tabelle ➤ für exakten Amplituden- und Phasengang Tabelle mit Korrekturwerten benutzen	➤ waagerechte Tangente der Übergangsfunktion h(t) im Ursprung			
	Dämpfung	Nullstellen λ_i		➤ φ strebt gegen $n \cdot (-90^\circ)$ ➤ Ortskurve durchläuft n Quadranten ➤ Steigung von $ G $ maximal $-n$ LE ➤ Reihenschaltung aus PT ₁ - und PT ₂ -Gliedern
	D > 1	reell	➤ 2 PT ₁ -Glieder in Reihe	
	D = 1	reell identisch	➤ 2 PT ₁ -Glieder in Reihe (T ₁ =T ₂)	
	D < 1	komplex	➤ Eigenkreisfrequenz <div>$\omega_C = \omega_0 \sqrt{1 - D^2}$</div> ➤ für Amplituden- und Phasengang Tabelle mit Korrekturwerten benutzen ➤ Überschwingen	
	D = 0	komplex, Re=0	➤ Eigenkreisfrequenz ω_0	

IT ₁	DT ₁	PIT ₁
➤ Regelstrecken ohne Ausgleich und integrierend wirkende Stellantriebe mit Verzögerung	➤ nachgebendes Glied: Übergangsfunktion h(t) ist endlich für alle t und strebt für große t gegen Null	➤ Regler
➤ ohne Ausgleich : h(t→∞) gegen ∞	➤ auch aus Parallelschaltung von P- und PT ₁ -Glieder zu erzielen	
➤ Übergangsfunktion h(t) entspricht Rampenantwort (vgl. S. 129 ff) des PT ₁ -Gliedes		

PDT ₁	PPT ₁	PT _t	PT ₁ T _t
➤ Kompensationsglieder zur Beeinflussung des dynamischen Verhaltens von Regelkreisen		➤ Beschreibung von Regelstrecken	
➤ phasenanhebendes Glied	➤ amplitudenabsenkendes	➤ nichtrationale Übertragungsfunktion (keine Pol- und Nullstellendarstellung möglich)	
➤ Regler			
➤ T < T_v	➤ T > T_v		

PA ₁	PA _n
➤ Allpass : konstanter Betrag des Frequenzganges für alle Kreisfrequenzen	
➤ Pole nur in der linken s-Halbebene, spiegelbildlich dazu Nullstellen in der rechten s-Halbebene	
➤ Regelstrecken	
	➤ h(t=0) < 0; für ungerade n ⇒ Regelstrecken mit Allpassanteilen sind schlecht regelbar
	➤ $\varphi(\omega \rightarrow \infty)$ strebt gegen 2n·(-90°)

Minimalphasenglieder (Phasenminimumsysteme)	Nichtminimalphasenglieder
➤ alle Übertragungsglieder mit gebrochener rationaler Übertragungsfunktion, deren Polstellen und Nullstellen negative Realteile aufweisen	➤ Glieder, die nebenstehende Forderung nicht erfüllen
➤ Frequenzgang weist einen bestimmten negativen Mindestphasenwinkel auf	➤ z.B. Totzeit- und Allpassglieder
	➤ schlecht regelbar
	➤ bei rationaler Übertragungsfunktion: Auffassung als Reihenschaltung aus Minimalphasenglied u. Allpass

Inversion und Negation

	Amplitudengang	Phasengang	Ortskurve
Negation des Re	kein Einfluss	Spiegelung an der 0° Achse und Verschiebung um -180°	Spiegelung an der imaginären Achse
Negation des Im	kein Einfluss	Spiegelung an der 0° Achse	Spiegelung an reeller Achse
Negation von G	kein Einfluss	Verschiebung um -180°	Spiegelung an beiden Achsen ($\Delta\varphi = -180^\circ$)
Inversion von G	Spiegelung an $ G =1$	Spiegelung an der 0° Achse	?

Korrekturwerte für exakten Amplituden- und Phasengang

$\lg G - \lg Asymptote $					$ \varphi - \varphi_{Asymptote} $			
$\frac{\omega}{\omega_E}$ bzw. $\frac{\omega_E}{\omega}$	0,1	0,5	0,8	1	0,1	0,5	0,8	1
PT_1	-0,002	-0,048	-0,107	-0,151	5,7	26,6	38,7	45,0
PT_2	D							
	1	-0,004	-0,097	-0,215	-0,301	11,4	53,1	77,3
	0,707	0,000	-0,013	-0,075	-0,151	8,1	43,4	72,3
	0,5	0,002	0,045	0,057	0,000	5,8	33,7	65,8
	0,4	0,003	0,071	0,134	0,097	4,6	28,1	60,6
	0,3	0,004	0,093	0,222	0,222	3,5	21,8	53,1
	0,2	0,004	0,110	0,317	0,398	2,3	14,9	41,6
	0,1	0,004	0,121	0,405	0,699	1,2	7,6	24,0
	0,05	0,004	0,124	0,433	1,000	0,6	3,8	12,5

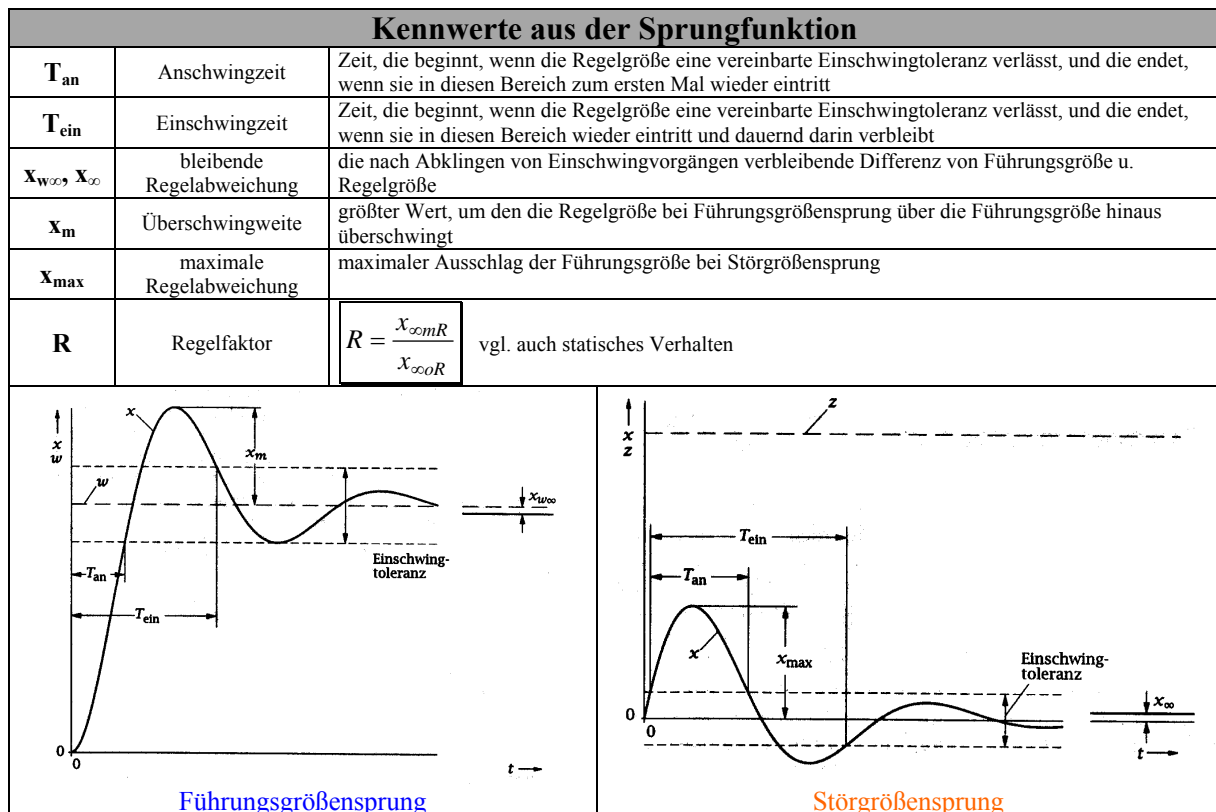
Stabilität, Gütemaße und Reglereinstellung

Festwertregelung	➤ Begrenzung des Störgrößeneinflusses bei konstanter Führungsgröße; d.h.: $h(t \rightarrow \infty)$ möglichst klein
Folgeregelung	➤ Folgeverhalten der Regelgröße bzgl. Führungsgrößenverlauf; d.h. $h(t)$ soll schnell gegen 1 streben ➤ Rampenantwort ist eine häufig benutzte Kenngröße für das dynamische Verhalten (vgl. S.129)

Gütemaße

Optimierung = Minimierung des Gütemaßes

Integral- oder Flächenkriterien			
Voraussetzung: keine bleibende Regelabweichung $e = x-w$			
$I = \int_0^\infty e^2 dt$	quadratische Regelfläche	$I = \int_0^\infty e \cdot t \cdot dt$	zeitbeschwerte betragslineare Regelfläche



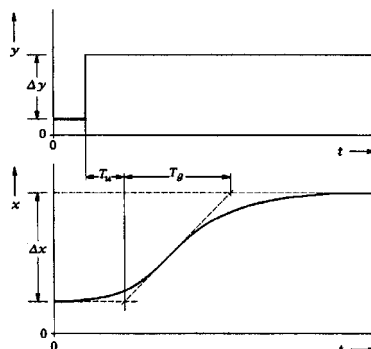
Einstellregeln

anhand Sprungantwort der Regelstrecke

Regler		Aperiodischer Regelverlauf		Regelverlauf mit 20% Überschwingen	
		Störung	Führung	Störung	Führung
P	K_R	$\frac{0,3 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,3 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,7 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,7 T_g}{K_S T_u}$
PI	K_R	$\frac{0,6 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,35 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,7 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,6 T_g}{K_S T_u}$
	T_n	$4 T_u$	$1,2 T_g$	$2,3 T_u$	$1 T_g$
PID	K_R	$\frac{0,95 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,6 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{1,2 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,95 T_g}{K_S T_u}$
	T_n	$2,4 T_u$	$1 T_g$	$2 T_u$	$1,35 T_g$
	T_v	$0,42 T_u$	$0,5 T_u$	$0,42 T_u$	$0,47 T_u$

nur für $T_g/T_u > 3$ gültig (schlecht für Strecken mit Totzeit)
Bestimmung von T_g und T_u durch Konstruktion o. Berechnung der Wendetangente in der Sprungantwort

$$K_S = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$



anhand von Versuchsergebnissen

Regler	K_R	T_n	T_v
P	$0,5 \cdot K_{R \text{ krit}}$	-	-
PI	$0,45 \cdot K_{R \text{ krit}}$	$0,85 \cdot T_{\text{krit}}$	-
PID	$0,6 \cdot K_{R \text{ krit}}$	$0,5 \cdot T_{\text{krit}}$	$0,12 \cdot T_{\text{krit}}$

- exp. Bestimmung von $K_{R,krit}$ und $T_{R,krit}$ dazu Veränderung von K_R bei Versuch mit P-Regler, bis Dauerschwingungen eintreten
- Regelungen mit unübersichtlichen Mess- und Stellgrößen

Stabilität

algebraische Stabilitätskriterien

ungeeignet bei Totzeitverhalten

Die Stabilität eines linearen Übertragungssystems hängt nicht von der Eingangsgröße ab

Übertragungsstabilität: Ein stabiles System muss auf eine beschränkte Eingangsgröße mit einer beschränkten Ausgangsgröße reagieren!

BIBO-Kriterium	<i>Ein Übertragungssystem ist dann stabil, wenn sämtliche Nullstellen des zu seiner Differentialgleichung gehörenden charakteristischen Polynoms bzw. sämtliche Polstellen der Übertragungsfunktion negative Realteile aufweisen</i>
-----------------------	--

Routh	Hurwitz
notwendige Bedingung:	<i>Das System ist nur dann stabil, wenn alle Koeffizienten des charakteristischen Polynoms (bzw. der homogenen linearen DGL) $a_n \dots a_0$ vorhanden und positiv sind.</i>
hinreichende Bedingung	
<p><i>Das System ist nur dann stabil, wenn die Routhschen Probefunktionen R_i (1. Spalte des Schemas) sämtlich größer als Null sind.</i></p> $ \begin{array}{ccc} a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ \underbrace{a_{n-2} - \frac{a_n}{a_{n-1}} a_{n-3}}_{a'_{n-2}} & \underbrace{a_{n-4} - \frac{a_n}{a_{n-1}} a_{n-5}}_{a'_{n-4}} & \underbrace{a_{n-6} - \frac{a_n}{a_{n-1}} a_{n-7}}_{a'_{n-6}} \\ a_{n-3} - \frac{a_{n-1}}{a_{n-2}} a'_{n-4} & a_{n-5} - \frac{a_{n-1}}{a_{n-2}} a'_{n-6} & \\ R_n = a_n & R_{n-1} = a_{n-1} & R_{n-2} = a'_{n-2} \quad \dots \end{array} $ <p>Ende, wenn nur noch in der 1. Spalte Elemente stehen. Bei ungerader Ordnung steht unten rechts eine Null</p>	<p><i>Das System ist nur dann stabil, wenn die Hurwitzdeterminante und ihre Unterdeterminanten sämtlich größer als Null sind.</i></p> $ \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & & a_3 & a_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & 0 & 0 & & a_5 & a_3 & a_1 \end{vmatrix} = H $
Sonderfälle	<p>System 2. Ordnung \Rightarrow notwendige Bedingung ist auch hinreichend</p> <p>System 3. Ordnung \Rightarrow hinreichend wenn 1. Bed. erfüllt und zusätzlich $a_1 a_2 > a_0 a_4$</p>

Bei **einschleifigen Regelkreisen** (vgl. Einführung) reicht eine **Untersuchung des aufgeschnittenen Regelkreises** aus. Prüfe Nullstellen des nebenstehenden Ausdruckes.

Achtung falsche Schlüsse sind möglich, wenn in $G(s)$ gekürzt werden kann (vgl. S.147 (5.43)f)

$$1 + G_0(s) = 0$$

Stabilitätsprüfung nach Nyquist

geeignet auch bei Totzeitverhalten

- Analyse der grafischen Darstellung des aufgeschnittenen Regelkreises (Ortskurve o. Bode-Diagramm)
- neben der Stabilität werden **gleichzeitig** Aussagen über die Güte und Optimierungsmöglichkeiten gewonnen

➤ Betrachtung der Ortskurve

Nyquist	<p>Wenn die Übertragungsfunktion $G_0(s)$ des aufgeschnittenen Regelkreises p Pole in der rechten s-Halbebene aufweist, dann gilt:</p> <p>Wenn die Ortskurve des Frequenzganges $G_0(j\omega)$ beim Durchlaufen der Frequenzwerte von $-\infty$ bis ∞ den Punkt -1 auf der reellen Achse genau p Mal im mathematisch positiven Sinn umfährt, dann ist der geschlossene Regelkreis stabil. Andernfalls ist er nicht stabil.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Die Ortskurve ist nach den Regeln für Inversion bzw. Negation für negative ω zu ergänzen ➤ Beim Zählen der Umläufe einfach die vollständigen Umdrehungen eines Zeigers betrachten, der in -1 auf der reellen Achse befestigt ist und die Ortskurve von $\omega = -\infty$ bis $\omega = \infty$ abgetastet wird. 	

Nyquist	<p>Wenn der aufgeschnittene Regelkreis stabil ist oder integrierendes Verhalten aufweist (d.h. $G_0(s)$ hat nur Pole mit negativem Realteil und bei I-Verhalten zusätzlich $\text{Pol}(e)$ bei $s=0$), dann gilt:</p> <p>Wenn der Punkt -1 auf der reellen Achse im Gebiet zur Linken der in Richtung zunehmender Frequenz durchlaufenen Ortskurve des Frequenzganges $G_0(j\omega)$ liegt, dann ist der geschlossene Regelkreis stabil. Andernfalls ist er nicht stabil</p>
---------	---

Nyquist (vereinfacht)	<p>Wenn der aufgeschnittene Regelkreis stabil ist oder integrierendes Verhalten aufweist (d.h. $G_0(s)$ hat nur Pole mit negativem Realteil und bei I-Verhalten zusätzlich $\text{Pol}(e)$ bei $s=0$) und die Ortskurve des Frequenzganges $G_0(j\omega)$ die reelle Achse nur so schneidet, dass beim Übergang vom 3. in den 2. Quadranten die Frequenz zunimmt, dann gilt:</p> <p>Wenn die Ortskurve des Frequenzganges $G_0(j\omega)$ die reelle Achse nur rechts vom Punkt -1 der reellen Achse schneidet, dann ist der geschlossene Regelkreis stabil. Andernfalls ist er nicht stabil.</p>
-----------------------	--

➤ Betrachtung des Bode-Diagramms

Nyquist (vereinfacht)	<p>Wenn der aufgeschnittene Regelkreis stabil ist oder integrierendes Verhalten aufweist (d.h. $G_0(s)$ hat nur Pole mit negativem Realteil und bei I-Verhalten zusätzlich $\text{Pol}(e)$ bei $s=0$) und der Phasengang seines Frequenzganges im Bode-Diagramm die Linien -180° - $n \cdot 360^\circ$ nur mit negativer Steigung schneidet, dann gilt:</p> <p>Wenn der Betrag des Frequenzganges $G_0(j\omega_\pi)$ bei den Frequenzwerten, für die der Phasengang $\varphi_0(\omega_\pi) = -180^\circ - n \cdot 360^\circ$ kleiner ist als 1, dann ist der geschlossene Regelkreis stabil. Andernfalls ist er nicht stabil</p>
-----------------------	--

Gütemaße

Amplitudenreserve

$$A_R = \frac{1}{|G(j\omega_\pi)|}$$

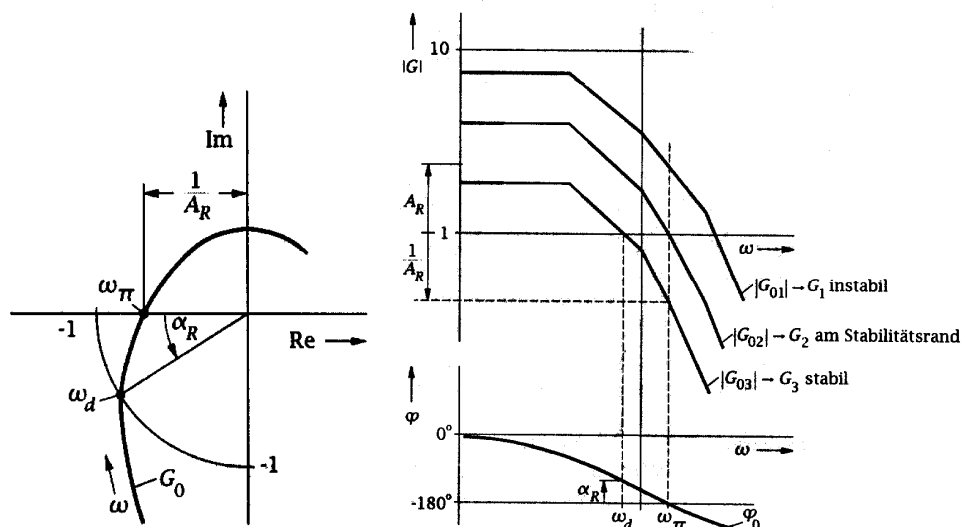
Phasenreserve

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

mit:

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

$$|G_0(j\omega_d)| = 1$$



Einstellregeln

gutes Störverhalten	$1,5 < A_R < 3$	$20^\circ < \alpha_R < 70^\circ$
gutes Führungsverhalten	$4 < A_R < 10$	$40^\circ < \alpha_R < 60^\circ$
! wirkt die Störgröße am Ende der Regelstrecke \Rightarrow Auslegung für gutes Führungsverhalten (vgl. S.161 Bild 5-25)		

weitere Forderungen

- ω_d und ω_n möglichst groß \Rightarrow schnellere Reaktion auf Stör- o. Führungsgrößenänderungen
- $|G(j\omega)|$ möglichst groß (besonders für kleine ω) \Rightarrow geringer statischer Fehler der Regelung
- Realisierung durch Verwendung von Kompensationsgliedern (PDT₁, PPT₁; vgl. S.165ff)

Erfahrungsregeln

- der Amplitudengang soll die Linie $|G(j\omega)| = 1$ mit der Steigung -1 schneiden, weil zu dieser Steigung bei Phasenminimumsystemen ein Phasenwinkel von -90° gehört
- das Kurvenstück mit der Steigung -1 sollte sich mindestens von $|G(j\omega)| = 2$ bis $|G(j\omega)| = 0,4$ erstrecken

Gerätetechnik

Klassifizierung von Regelungen

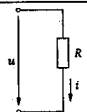
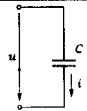
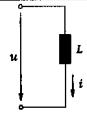
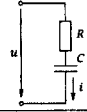
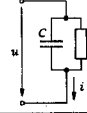
einfachste Regelungen	Einheitsregelsysteme	Prozessrechner o. -leitsysteme
<ul style="list-style-type: none"> meist einfache und billige P-Regler ohne Hilfsenergie (1 Gerät) geringe Anforderungen (Genauigkeit, Geschwindigkeit) Fliehkraftpendel (S.195) Druckminderer (S.195) Temperaturregler (S.196) 	<ul style="list-style-type: none"> Regel- u. Stellgröße sind genormte elektr. Einheitssignale \Rightarrow geeignete Gerätekombinationen versch. Hersteller möglich (geringe Lagerhaltung) 	<ul style="list-style-type: none"> zeitdiskret u. keine parallelen Operationen \Rightarrow bei mehreren angeschlossenen Regelkreisen ist momentan immer nur ein Kreis geschlossen einfache Modifizierung durch Programmänderung

Regler

<ul style="list-style-type: none"> ohne Hilfsenergie \Rightarrow vgl. einfachste Regelungen mit Hilfsenergie <ul style="list-style-type: none"> - elektrisch - hydraulisch - pneumatisch 	<ul style="list-style-type: none"> Signalverstärkung durch aktiven Verstärker (mit passiver Rückführung) mit einstellbarem statischen u. dynamischen Verhalten (S.199 Bild 6-7) hoher Übertragungsfaktor \Rightarrow stat. u. dyn. Verhalten nur abhängig von der Rückführung (vgl. S.199 (6.1)ff) keine Stabilitätsprobleme bei P-Verstärkern mit P-, D- oder PT₁-Rückführung (S.200) I-Verstärker als Regler unbrauchbar (vgl. S.200f)
---	--

hydraulische Regler	
<ul style="list-style-type: none">keine Signalübertragung über große Entfernungen möglichVerstärker hat I-Verhalten<ul style="list-style-type: none">ohne Rückführung (S.202 Bild 6-9)überwiegend mit starrer Rückführung (P-Verhalten)<ul style="list-style-type: none">Wegvergleich (S.203 Bild 6-10)Kraftvergleich (S.203 Bild 6-10)selten nachgebende Rückführung (DT₁-Verhalten)für große Flüssigkeitsströme → Verwendung von Vorsteuerungen (S.203f)	
elektronische Regler	
<ul style="list-style-type: none">hohe Flexibilität und Vielseitigkeitbeschalteter Differenzverstärker (S.206 Bild 6-13)<ul style="list-style-type: none">I_d ≈ 0, hoher K-Faktor ⇒ U_d ≈ 0U_y ~ U_xP-Regler (S.209 Bild 6-14)PI-Regler (S. 210 Bild 6-16 mit gewichteter Eingangssumme)PID – Regler (S.209 Bild 6-15)Spannungsteiler zur <u>Veränderung des K-Faktors</u>, dessen Widerstand gegenüber der Rückführung vernachlässigbar ist	

$$G_{Regler}(j\omega) = \frac{u_y}{u_x} = - \frac{Z_r(\omega)}{Z_e(\omega)} = - \frac{G_{Eingang}(j\omega)}{G_{Rückführung}(j\omega)}$$

Schaltung	Differentialgl. $i = f(u, t)$	Frequenzgang $G(j\omega) = \frac{i}{u}$	kompl. Widerst. $Z(\omega) = \frac{u}{i}$
	$i = \frac{1}{R} u$	$\frac{1}{R}$	R
	$i = C \dot{u}$	$j\omega C$	$\frac{1}{j\omega C}$
	$\dot{i} = \frac{1}{L} u$	$\frac{1}{j\omega L}$	$j\omega L$
	$RC \dot{i} + i = C \dot{u}$	$\frac{j\omega C}{1 + j\omega RC}$	$R + \frac{1}{j\omega C}$
	$i = \frac{1}{R} u + C \dot{u}$	$\frac{1}{R} + j\omega C$	$\frac{R}{1 + j\omega RC}$

Messgeräte

Regelungen arbeiten nicht genauer als die Messgenauigkeit bei der Regelgrößenerfassung

Messen	<ul style="list-style-type: none"> ➤ mit geringem Aufwand eine zuverlässige, genaue u. reproduzierbare Erfassung der interessierenden Größe ➤ inkl. Ausdruck durch eine geeignete (digitale o. analoge) Größe ➤ sowie Weiterleitung an Regler, Anzeiger o. Überwacher ➤ <i>im engeren Sinne</i>: Ausdruck der Messgröße als Vielfaches einer SI-Einheit (S.211) bzw. SI-Kombination 	
Messsystem	<ul style="list-style-type: none"> ➤ idealisiert (S.212 Bild 6-17) ➤ fehlerbehaftet (S.2-13 Bild 6-18; vgl. auch Fehlerbegrenzungsmaßnahmen und Berücksichtigung der stabilitätsgefährdenden dynamischen Messfehler S.212 ff) ➤ erweitert (S.213 Bild 6-19) 	
Messverfahren	<ul style="list-style-type: none"> ➤ direkt \longleftrightarrow indirekt ➤ analog \longleftrightarrow digital 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ zeitlich: kontinuierlich \longleftrightarrow diskontinuierlich ➤ Ausschlagsverfahren \longleftrightarrow Kompensationsverfahren

Temperatur	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Widerstandthermometer (S.215) ➤ Thermoelement (S.215) 	
Kraft	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Piezoaufnehmer (S.216) ➤ Dehnungsmessstreifen (DMS S.217) 	
Druck	➤ Druckmessgeräte mit Membran in Verbindung mit DMS oder Piezoelement (S. 219)	
Beschleunigung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Piezoelement ➤ kapazitiv \Rightarrow S.220 ➤ DMS 	
Durchfluss	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Düsen o. Blenden (S.220) ➤ Coriolisprinzip (S.222) 	
Weg	kleine Wege:	➤ kapazitive Weggeber
	große Wege:	➤ optische Abtastung von Strichmaßstäben (inkremental o. absolut S.223)
Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> ➤ induktiv (S.223) ➤ Tachogenerator (S.223) 	

Stelleinrichtungen

Stellantrieb (Steller)	Umformung der Stellgröße in eine geeignete Zwischengröße (z.B. elektro-pneumatischer Umformer)
Stellglied	direkte Beeinflussung des Prozesses bzw. der Regelstrecke (Ventile, Drosselklappen, Fördereinrichtungen, Lenkeinrichtungen, Stelltrafos)

- Berücksichtigung stabilitätsgefährdender dynamischer Eigenschaften
- häufig treten problematische Nichtlinearitäten (Ansprechschwelle, Hysterese) auf

Steller

pneumatisch	hydraulisch	elektrisch
<ul style="list-style-type: none"> ➤ geradlinige Bewegungen mit beträchtlichen Kräften 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ translatorische Bewegungen ➤ Schwenk- und Drehbewegungen 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ hohe Flexibilität ➤ breiterer Einsatzbereich
<ul style="list-style-type: none"> ➤ kostengünstig ➤ gute Dynamik ➤ ausreichende Genauigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ hohe Kräfte und Momente ➤ fast immer mit Stellungsregler (steuert den Fluss von Hydrauliköl, der die Stellbewegung verursacht) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ integrales Verhalten (vgl. Mann/Schiffelgen S.359 oben) ➤ fast immer mit Stellungsregler
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kolben und Zylinder ➤ Membranantriebe (vgl. S.226 Bild 6-28) ➤ elektropneumatische Steller ($P_y \sim I_y \rightarrow$ vgl. S. 225 Bild 6-27) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kolben u. Zylinder (einfach o. doppeltwirkend) evtl. mit Getriebe ➤ Schwenk- und Drehmotoren 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gleich- und Drehstrommotoren mit Getrieben und Gewindespindeln

lineare Abtastregelungen

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Glieder, die Größen nur zu diskreten, äquidistanten Zeitpunkten übertragen ➤ Regelkreis mit kontinuierlicher Regelstrecke und abtastend arbeitendem Regler ➤ Abtaster liefert Folge äquidistanter Impulse oder Werte ➤ Halteglied (0. Ordnung) hält Abtastwert über die Abtastzeit T konstant ➤ Regler wandelt Folge von Eingangssignalen in eine Folge von Ausgangssignalen um 	
--	--

Differenzengleichung	$a_0 y_k + a_1 y_{k-1} + \dots + a_n y_{k-n} = b_0 u_k + b_1 u_{k-1} + \dots + b_m u_{k-m}$ vgl. S.234 (7.3) u. (7.4)	
Rechenregeln (vgl. Bsp. PT ₁ -Glied S.235)		
Differentiation	$y = K \cdot \dot{u}$	$\Rightarrow y_k = \frac{K}{T} \cdot (u_k - u_{k-1})$
Integration	$y = K \cdot \int_0^t u(\tau) \cdot d\tau$	$\Rightarrow y_k - y_{k-1} = K \cdot T \cdot u_k$
stat. Übertragungsfaktor eines stabilen Systems	$K = \frac{b_0 + b_1 + \dots + b_m}{a_0 + a_1 + \dots + a_n}$	
Frequenzgang (entspricht der z-Übertragungsfunktion)	$G(e^{j\omega T}) = \frac{y_k}{u_k} = \frac{y \cdot e^{j\omega k T}}{u \cdot e^{j\omega k T}} = \frac{y}{u} = \frac{b_0 + b_1 e^{-j\omega T} + b_2 e^{-j\omega 2T} + \dots + b_m e^{-j\omega m T}}{a_0 + a_1 e^{-j\omega T} + a_2 e^{-j\omega 2T} + \dots + a_n e^{-j\omega n T}}$	
	Das Argument von G ist periodisch in $\frac{2\pi}{T}$ (Bsp. D- und I-Glied S.237f)	

Shannon-Abtast-Theorem	
<i>Eine zeitkontinuierliche Funktion kann aus ihren Abtastwerten nur dann fehlerfrei rekonstruiert werden, wenn die höchste in dieser Funktion enthaltene Frequenz kleiner als die Shannon-Frequenz (bzw. die Abtastzeit kürzer als die Hälfte der kürzesten Periodendauer der in der abzutastenden Funktion) ist.</i>	
$\omega_{\max} < \omega_s = \frac{\pi}{T} \quad \text{bzw.} \quad T < \frac{T_{\min}}{2}$	
Folgen von Unterabtastung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Signalverfälschung im interessierenden, niederfrequenten Bereich ➤ Verlust höherfrequenter Signalbereich (meist unproblematisch)
Anti-Aliasing-Filter	kontinuierliches, analoges Tiefpassfilter unterdrückt unerwünschte höherfrequente Signalanteile die wg. Unterabtastung zu Signalverfälschungen führen

quasikontinuierliche Abtastregelungen

Das Gesamtsystem kann als quasikontinuierlich aufgefasst werden, wenn T so klein ist, dass der Abtastvorgang das Gesamtverhalten nicht wesentlich beeinflusst.	
Bedingung:	$T < \frac{T_g}{2}$ (T_g : Ausgleichszeit der Regelstrecke, vgl. Gütemaße bzgl. Sprungantwort)
Durch Vertauschung von verzögerungsfreiem Regler und Halteglied können Abtaster und Halteglied für kleine ω (d.h. $\omega T < 1$) durch ein Totzeitglied (PT _t mit $T_t = 0,5 \cdot T$) ersetzt werden \Rightarrow Ersatzregelkreis (vgl. S.231f) ! Stabilitätsprobleme durch Totzeitglied !	

rekursive Rechenvorschrift zur Bestimmung der Werte der Stellgröße eines zeitdiskreten PID -Reglers: PI $\rightarrow T_v = 0$ P $\rightarrow T_v = T_n = 0$	$y_k = y_{k-1} + K_R \left[\left(1 + \frac{T}{T_n} + \frac{T_v}{T}\right) \cdot u_k - \left(a + 2 \frac{T_v}{T}\right) \cdot u_{k-1} + \frac{T_v}{T} \cdot u_{k-2} \right]$
Häufig in Verbindung mit integrierenden Stellgliedern , denen nur die Stellgrößenänderung ($y_k - y_{k-1}$) zugeführt wird (vgl. S.244 (7.43)) und die bei Ausfall des Reglers den letzten Stellgrößenwert beibehalten .	

Einstellregeln (vgl. S.11)

anhand Sprungantwort der Regelstrecke				anhand von Schwingversuchen			
Regler	K_P	K_I	K_D	Regler	K_P	K_I	K_D
P	$\frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_\theta}{T_u + T}$	-	-	P	$0,5 K_{krit}$	-	-
PI	$\frac{0,9}{K_S} \cdot \frac{T_\theta}{T_u + 0,5 T} - 0,5 K_I$	$\frac{0,27}{K_S} \cdot \frac{T \cdot T_\theta}{(T_u + 0,5 T)^2}$	-	PI	$0,45 K_{krit} - 0,5 K_I$	$0,54 \frac{K_{krit}}{T_{krit}}$	-
PID	$\frac{1,2}{K_S} \cdot \frac{T_\theta}{T_u + T} - 0,5 K_I$	$\frac{0,6}{K_S} \cdot \frac{T \cdot T_\theta}{(T_u + 0,5 T)^2}$	$\frac{0,5}{K_S} \cdot \frac{T_\theta}{T}$	PID	$0,6 K_{krit} - 0,5 K_I$	$1,2 \frac{K_{krit}}{T_{krit}}$	$0,075 K_{krit} \cdot \frac{T_{krit}}{T}$
Die Reglerparameter sind die eines Geschwindigkeitsalgorithmus von der Form: $\Delta y_k = y_k - y_{k-1} = K_P \cdot (u_k - u_{k-1}) + K_I \cdot u_k + K_D \cdot (u_k - 2u_{k-1} + u_{k-2})$							
!!! nur gültig für $T/T_u > 4$!!!							

Regelungssysteme mit nichtlinearen Übertragungsgliedern

- Betrachtung von Regelkreisen mit einem nichtlinearen, verzögerungsfreien Übertragungsglied
- **Dauerschwingungen** definierter Amplitude und Frequenz können als stationärer Zustand auftreten
- Die **Stabilität** kann von den Eingangsgrößen abhängen.

Folgeregelungen mit nichtlinearen Übertragungsgliedern

Begrenzung der Stellgeschwindigkeit	Folgesystem mit Ansprechschwelle
<ul style="list-style-type: none"> ➤ $e > e_0$ Rampe ➤ $e < e_0$ Exponentialfunktion (PT_1-Verhalten S.280 (8.3)) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ bleibende Regelabweichung aufgrund „toter Zone“ ➤ für $e > e_0$ PT_1-Verhalten (S.281 (8.7))

Regelungen mit schaltenden Reglern

- Vorteil: preiswert (Regler und Stellorgan)
- Nachteil: Arbeitsbewegung als stationärer Zustand (Ausgangsgröße kann nur wenige Werte annehmen)
 \Rightarrow zur Realisierung von Zwischenzuständen tritt wechselweises Schalten ein

Dreipunktregler

- häufig zur Ansteuerung integrierend wirkender Stellmotoren \Rightarrow keine Arbeitsbewegung wg. stetig verstellbarer Stellgröße
- Kombination aus Dreipunktregler + Stellgröße + proportionaler Rückführung \Rightarrow nahezu stetig wirkendes Stellglied (vgl. S.289)

Zweipunktregler

$w = 0,5 \cdot x_\infty$	$w \neq 0,5 \cdot x_\infty$
Sprungantwort für Regelstrecke mit Verzögerung und Totzeit (Regelstrecke ohne Totzeit \Rightarrow Verzugszeit T_u verwenden)	
<p>➤ Mittelwert der Arbeitsbewegung ist w</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> $X_A \approx \frac{T_t}{T_s} \cdot w$ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> $T \approx 4 \cdot T_t$ </div> <p>minimale Periodendauer</p>	<p>➤ bleibende Regelabweichung</p> <p>➤ X_A wird weniger stark von einer Führungsgrößenverschiebung beeinflusst (im Gegensatz zu T)</p> <p>➤</p>
<p style="color: red;">ungeeignet für Regelstrecken mit PT_1-Verhalten und</p> <p>➤ ohne Totzeit \Rightarrow hohe Schaltfrequenz ($T \rightarrow 0$)</p> <p>➤ großer Tot- bzw. Verzugszeit T_u (X_A wird unzulässig groß)</p>	

Zweipunktregler mit Hysterese

erwünschte Hysterese	unerwünschte Hysterese
Regelstrecken ohne Tot- bzw. Verzugszeit	Regelstrecken mit Tot- oder Verzugszeit
<p>➤ Minderung der Schaltfrequenz</p> <p>➤ Vermeidung von Fehlschaltungen bei Schwankungen der gemessenen Regelgröße</p>	<p>➤ Vergrößerung von X_A (durch technisch unvermeidliche Hysterese)</p> <p>➤ Abhilfe: Rückführung zur Steigerung der Schaltfrequenz u. zur Senkung von X_A (vgl. S.186 u.)</p>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> $X_A = \frac{1}{2} \cdot 2d$ </div>	<p>PD-Glied = verzögernd</p> <p>PID-Glied = verzögernd nachgebend</p>

Zweipunktglied aus stetigem Regler und Pulslängenmodulator

<p>Regler (P-, PI-, PD- oder PID-Verhalten)</p> <p>\Rightarrow erzeugt wert- und zeitkontinuierliche Stellgröße y_s</p>	
<p>Pulslängenmodulator</p> <p>\Rightarrow erzeugt binäre Stellgröße y_B</p> <p>(Periodendauer T wird, unabhängig von den Reglereigenschaften, so gewählt, dass X_A und die Stellgliedbelastung im technisch sinnvollen Bereich liegen)</p>	

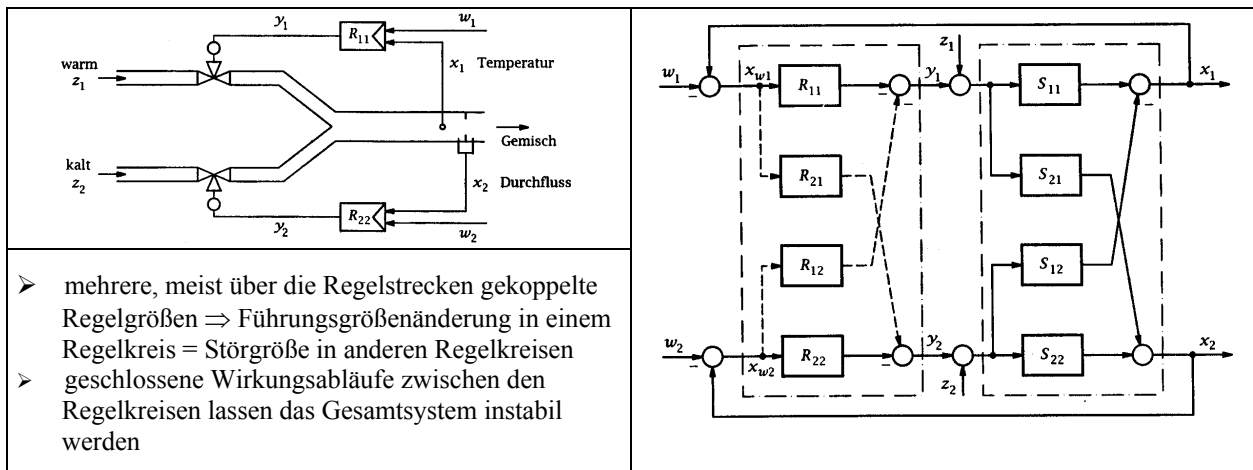
Vorgehensweise zur Analyse nichtlinearer Folgesysteme

- 1) Der Arbeitsbereich des nichtlinearen Übertragungsgliedes wird in Bereiche eingeteilt, in denen eine lineare Beziehung für den Zusammenhang von Ein- und Ausgangsgröße gefunden werden kann.
- 2) Für jeden dieser Bereiche wird der funktionale Zusammenhang von Ein- und Ausgangsgröße des Gesamtsystems bestimmt. Überlegung: Handelt es sich vielleicht um ein bekanntes Standardübertragungsverhalten?
- 3) Soweit möglich, wird die Eingangsgröße des nichtlinearen Übertragungsgliedes in die grafische Darstellung eingetragen, und es werden die oben bestimmten Bereiche in diesem Graphen markiert.
- 4) Die Anfangswerte aller zu zeichnenden Größen werden bestimmt. In welchem Bereich des nichtlinearen Übertragungsgliedes befindet sich das System? Der Verlauf der Größen wird mit Kenntnis der linearen Zusammenhänge für den gefundenen Bereich gezeichnet. Bei Bereichswechseln wird, mit der zugeordneten linearen Beschreibung, weitergezeichnet.

Vermaschte Regelkreise

Vorregelung	Störgrößenaufschaltung	Hilfsstellgröße
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Verbesserung des Störverhaltens (Störungen werden verringert, indem störende Einflussgrößen konstant gehalten werden) ➤ der Stellbereich kann verringert werden 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ aus Störgrößenänderungen werden zweckmäßige Stellgrößenänderungen abgeleitet, die die Störwirkung (teilweise) kompensieren ➤ bei wenigen, gut messbaren Störgrößen, wenn eine Vorregelung nicht möglich ist ➤ bei Regelstrecken mit Totzeit (wenn die Störgröße über T_1 auf die Regelgröße wirkt) ⇒ wesentliche Verbesserung gegenüber einfacher Regelung ➤ keine Stabilitätsbeeinflussung ➤ bei Regler mit I-Verhalten muss das Aufschaltgerät bei zeitlich konstanter Störgröße eine verschwindende Ausgangsgröße ausgeben (→ DT_1-Glieder) ➤ bei analogen Regelkreisen vgl. S.310 Bild 9-4 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Regelstrecke = Reihenschaltung mehrerer Verzögerungsglieder ➤ zusätzliche Hilfsstellgröße y_h aus Unterregelkreis (mit kleinem Stellbereich) mit günstigen dynamischen Eigenschaften (y_h muß in der Regelstrecke einfügbar sein) ➤ verbessertes Stör- und Führungsverhalten ➤ Stabilitätsprobleme bei Ausfall von y_h ➤ Regler mit P-, PD- oder nachgebendem Verhalten (DT_1-Glieder) ➤ Dynamikänderung ⇒ Übertragungsfaktor des Hauptreglers kann erhöht werden
Hilfsregelgröße	Kaskadenregelung	Vorsteuerung u Führungsgrößenfilter
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Regelstrecke = Reihe von Verzögerungsgliedern + Störgrößen greifen in der Nähe des Stellgrößenangriffspunktes an ➤ Regler mit P-, PD- oder nachgebendem Verhalten (DT_1) ➤ Dynamikänderung ⇒ Übertragungsfaktor des Hauptreglers kann erhöht werden ➤ Stabilitätsprobleme bei Ausfall des Hilfsregelkreises ➤ bei analogen Regelkreisen vgl. S.314 Bild 9-7b 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Regelstrecke = Reihe von Verzögerungsgliedern + Störgrößen greifen in der Nähe des Stellgrößenangriffspunktes an ➤ der Hauptregler erzeugt die Führungsgröße des Hilfsreglers ⇒ unterlagter Regelkreis gleicht alle auf vorderen Teil der Regelstrecke wirkende Störungen aus ➤ Verbesserung der Dynamik und Ausgleich von Nichtlinearitäten bestimmter Regelstreckenteile ➤ die Dimensionierung erfolgt von innen nach außen 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Minderung dynamischer Fehler ohne nachteilige Stabilitätsbeeinflussung durch Aufschaltung der Führungsgröße bei Folgeregelungen ➤ Regelstrecke hat meist I-Verhalten mit Verzögerung (IT_1, IT_n) ⇒ Aufschaltgerät muss mehrfach differenzieren u. gewichten ⇒ Berücksichtigung nur weniger Ableitungen möglich ⇒ keine vollständige Fehlerkompensation, daher können die Ableitungen bei bekanntem Führungsverlauf im Voraus bestimmt werden (S.318 Bild 9-12) ➤ bei Verwendung eines Führungsgrößenfilters kann dem Regelkreis ein gewünschtes Führungsverhalten eingeprägt werden, während der Regler bzgl. Störverhalten ausgelegt wird (vgl. S. 319 Bild 9-13)

Mehrgrößenregelung



positive Kopplung	negative Kopplung
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ausgangsgrößen beider Koppelstrecken wirken mit gleichem Vorzeichen auf die Regelgrößen ➤ Dämpfung der Einzelregelkreise steigt \Rightarrow Verlust an Reglerwirksamkeit (vgl. S.321f) ➤ effektive K-Faktoren steigen 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ausgangsgrößen beider Koppelstrecken wirken mit gleichem Vorzeichen auf die Regelgrößen ➤ Dämpfung der Einzelregelkreise sinkt

Entkopplungsregler

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Verminderung der Auswirkungen unerwünschter Kopplungen ➤ Ziel: vollständige Entkopplung, d.h. aus gekoppelten Mehrgrößensystemen sollen mehrere unabhängige Eingrößensysteme werden (vollständig kaum erreichbar, Schwierigkeiten bereiten v.a. Verzögerungsglieder höherer Ordnung sowie solche mit Totzeit- oder Allpassanteilen), daher schwerpunktmäßig <ul style="list-style-type: none"> \Rightarrow Führungs- oder Störautonomie \Rightarrow Eigenautonomie (Entkopplung des aufgeschnittenen Systems) \Rightarrow statische Entkopplung (nur für $\omega = 0$) liegt vollständige Entkopplung vor ➤ Entkopplungsregler können als Störgrößenaufschaltung aufgefasst werden, wenn die von Kopplungsgliedern eingebrachten Größen als Störgrößen betrachtet werden |
|--|