

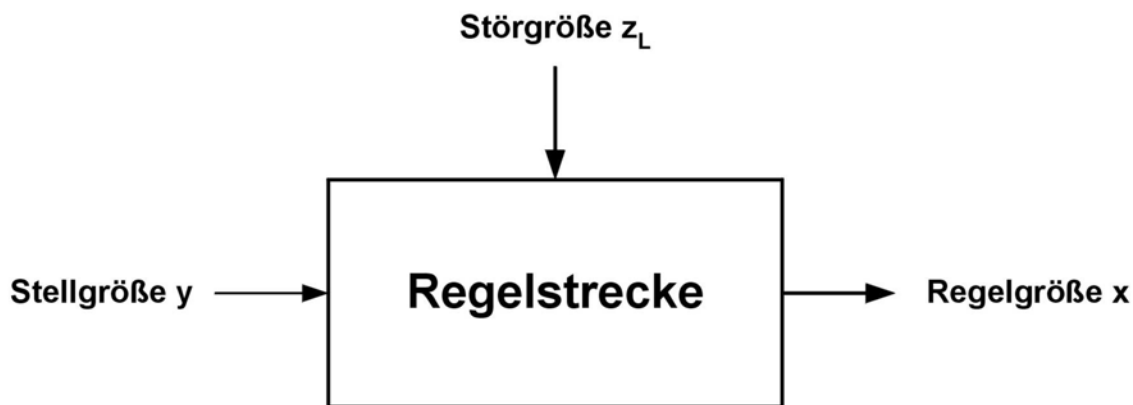
**Inhaltsverzeichnis:**

<b>Thema</b>	<b>Unterpunkt</b>	<b>Seite</b>
Regelstrecke allgemein	Definitionen	3-2
Typen von Regelstrecken	Strecke mit Ausgleich	3-2
	Strecke ohne Ausgleich	3-2
	Strecke mit Totzeit	3-2
Totzeit-Verhalten bei Regelstrecken	Übergangsfunktion	3-3
	Übertragungsfunktion	3-3
	Amplitudengang	3-3
	Phasengang	3-3
	Diagramme	3-3
Dynamisches Verhalten von Regelstrecken	Formel Strecke mit Ausgleich	3-4
	Formel Strecke ohne Ausgl.	3-4
Anlaufwert einer Regelstrecke	Definition	3-4
	Berechnung	3-4
Ausgleichswert einer Regelstrecke	Definition	3-4
	Berechnung	3-4
Übersicht Kennwerte Regelstrecke ohne Ausgl.	Kennwerte	3-5
	Kennlinie ohne Verzögerung	3-5
	Kennlinie mit Verzögerung	3-5
Übersicht Kennwerte Regelstrecke mit Ausgleich	Kennwerte	3-6
	Kennlinie ohne Verzögerung	3-6
	Kennlinie mit Verzögerung T1	3-6
	Kennlinie mit Verzögerung T2	3-6
Regelbarkeit einer Regelstrecke	Definition	3-7
	Anhaltspunkte aus der Praxis	3-7
Amplitudenrand- und Phasenrand	Definition und Kennlinie	3-7
	Nyquist-Kriterium	3-7
Stetige Regler mit OP	P-Regler	3-8
	I-Regler	3-8
	D-Regler	3-8
Kombination von stetigen Reglern	Diagramm	3-9
	Kennwerte	3-9
Graphische Bestimmung Nachstellzeit	Diagramm	3-9
Graphische Bestimmung Vorhaltezeit	Diagramm	3-9
Einstellen von Reglern	Ziegler-Nichols-Verfahren	3-10
	Chien-Hrones- und Reswick-Verfahren	3-10
Kombinationsarten von Regelkreisgliedern	Kettenschaltung	3-11
	Parallelschaltung	3-11
	Kreisstruktur	3-11
Verschieben von Summationspunkten	Hinter ein RKG	3-11
	Vor ein RKG	3-11
Verschieben von Knotenpunkten	Vor ein RKG	3-12
	Hinter ein RKG	3-12

**Regelstrecke allgemein:**

Die Regelstrecke ist der Teil des Regelkreises, in dem die Regelgröße  $x$  (Istwert) mit Hilfe der Stellgröße  $y$  auf den Wert der Führungsgröße  $w$  (Sollwert) gebracht und gehalten werden soll. Im allgemeinen ist die Regelstrecke der Bereich zwischen Stellort und Messort.

Der Eingang der Regelstrecke ist die Stellgröße  $y$   
Auf die Regelstrecke wirkt die Störgröße  $z_L$  (Last-Störgröße)  
Der Ausgang der Regelstrecke ist die Regelgröße  $x$



Die Regelstrecke ist in Ihrem Verhalten meist durch technische Gegebenheiten festgelegt. Dadurch lässt sich das Verhalten meist nicht beeinflussen. Das Verhalten kann auch meist nicht berechnet werden und wird daher durch Messung ermittelt.

Um ein günstiges Regelergebnis zu erhalten muss also ein geeigneter Regler gewählt werden.

**Typen von Regelstrecken:****Regelstrecken mit Ausgleich:**

Von Regelstrecken mit Ausgleich spricht man, wenn ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Stellgröße  $y$  und Regelgröße  $x$  besteht und ein stationärer Endwert der Regelgröße  $x$  erreicht wird. Diese Strecken haben meist P- oder P-Tx-Verhalten

**Regelstrecken ohne Ausgleich:**

Von Regelstrecken ohne Ausgleich spricht man, wenn kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Stellgröße  $y$  und Regelgröße  $x$  besteht und kein stationärer Endwert der Regelgröße  $x$  erreicht wird. Diese Strecken haben meist I- oder I-Tx-Verhalten

**Regelstrecken mit Totzeit:**

Von Regelstrecken mit Totzeit spricht man, wenn die Regelgröße  $x$  erst nach einer bestimmten Zeit  $T_t$  eine Reaktion auf die Stellgröße  $y$  zeigt. Die Totzeit kann in allen Typen von Regelstrecken vorkommen. Totzeiten sind im Bereich der Regelungstechnik nicht erwünscht, da sie die Regelung sehr nachhaltig beeinflussen.

**Totzeit-Verhalten von Regelstrecken:**

$$x = y \cdot K_s \cdot (t - T_t)$$

**Kenngröße:  $T_t$**

Übertragungsfunktion:

$$\underline{F}(j\omega) = K_s \cdot e^{-j\omega T_t}$$

$$F(p) = K_s \cdot e^{-p T_t}$$

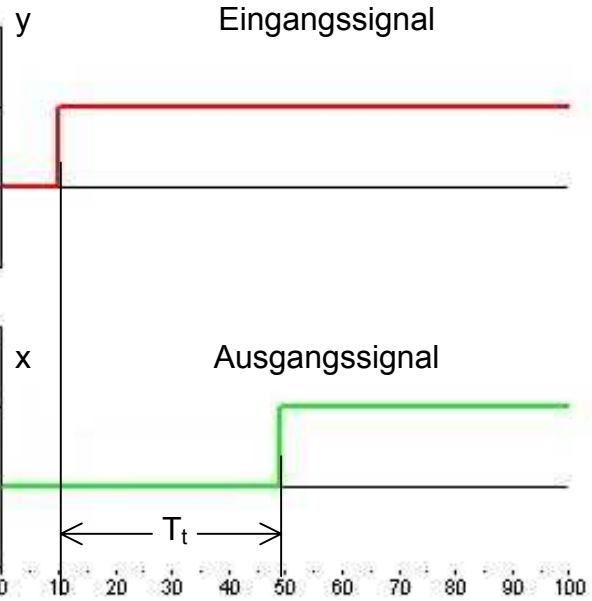
Amplitudengang (für Bodediagramm):

$$|\underline{F}(j\omega)| = K_s \quad L(\omega) = 20 \cdot \log(|\underline{F}(j\omega)|)$$

$$L(\omega) = 20 \cdot \log(K_s)$$

Phasengang (für Bodediagramm):

$$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega \cdot T_t) \quad \text{RAD einstellen !!!!!}$$

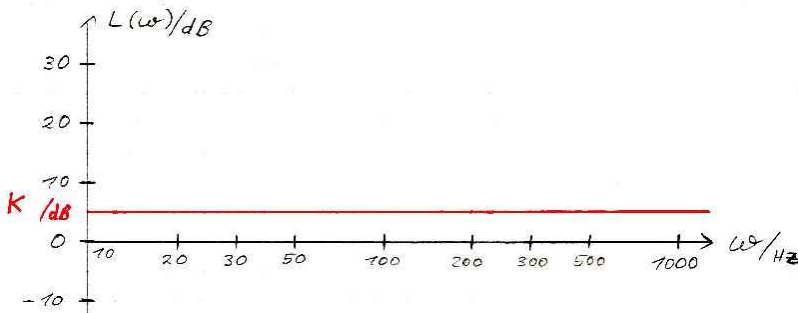


$$\omega_K = \frac{\pi}{T_t}$$

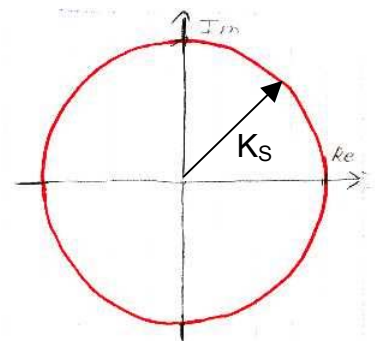
x = Ausgangssignal der Regelstrecke  
 y = Eingangssignal der Regelstrecke  
 $T_t$  = Totzeit in s

$K_s$  = Übertragungsbeiwert der Regelstrecke  
 $\underline{F}(j\omega)$  = komplexe Übertragungsfunktion  
 $F(p)$  = allgemeine Übertragungsfunktion  
 $|\underline{F}(j\omega)|$  = Amplitudengang der Regelstrecke  
 $L(\omega)$  = Amplitudengang der Regelstrecke in dB  
 $\varphi(\omega)$  = Phasengang der Regelstrecke in °  
 $\omega_K$  = kritische Kreisfrequenz bei der  $\varphi(\omega)$  den Wert  $-180^\circ$  überschreitet

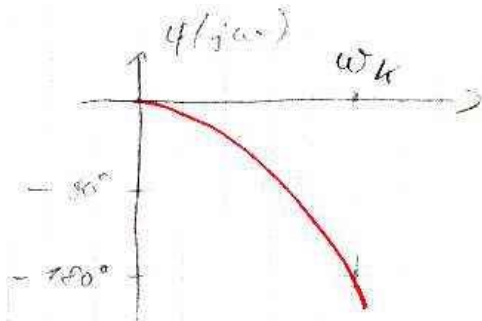
Amplitudengang Totzeit-Verhalten idealisiert:



Ortskurve Totzeit-Verhalten:



Phasengang Totzeit-Verhalten idealisiert:



**Dynamisches Verhalten von Regelstrecken:****Regelstrecken mit Ausgleich:**

Durch ihr P-Verhalten haben sie folgende Übertragungsfunktion:

$$\underline{F}(j\omega) = \frac{K_{PS}}{1 + [(j\omega) \cdot T_1] + [(j\omega)^2 \cdot T_2^2] + \dots + [(j\omega)^n \cdot T_n^n]}$$

$$F(p) = \frac{K_{PS}}{1 + (p \cdot T) + (p^2 \cdot T_2^2) + \dots + (p^n \cdot T_n^n)}$$

**Regelstrecken ohne Ausgleich:**

Durch ihr I-Verhalten haben sie folgende Übertragungsfunktion:

$$\underline{F}(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega} \cdot K_{IS}}{1 + [(j\omega) \cdot T_1] + [(j\omega)^2 \cdot T_2^2] + \dots + [(j\omega)^n \cdot T_n^n]}$$

$$F(p) = \frac{\frac{1}{p} \cdot K_{IS}}{1 + (p \cdot T) + (p^2 \cdot T_2^2) + \dots + (p^n \cdot T_n^n)}$$

$\underline{F}(j\omega)$  = Komplexe Übertragungsfunktion der Regelstrecke

$F(p)$  = Allgemeine Übertragungsfunktion der Regelstrecke

$K_{PS}$  = Proportionalbeiwert der Regelstrecke. **Ohne Einheit und frequenzunabhängig !!!**

$K_{IS}$  = Integrierbeiwert in  $\frac{1}{s}$  der Regelstrecke

$T_1$  = 1. Zeitkonstante in s

$T_2^2$  = 2. Zeitkonstante in  $s^2$

$T_n$  = n. Zeitkonstante

n = Grad der Zeitfunktion

**Anlaufwert einer Regelstrecke:**

Der Anlaufwert einer Regelstrecke ist der Kehrwert der maximalen Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße x

$$A = \frac{1}{v_{\max}}$$

$$v_{\max} = \frac{1}{A}$$

$$v_{\max} = K_S \cdot y_{\max}$$

$$A = \frac{1}{K_S \cdot y_{\max}}$$

A = Anlaufwert der Regelstrecke

$v_{\max}$  = maximale Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße x

$y_{\max}$  = maximales Eingangssignal (Stellgröße)

$K_S$  = Übertragungsbeiwert der Regelstrecke

**Ausgleichswert der Regelstrecke:**

Der Ausgleichswert der Regelstrecke ist das Verhältnis der Eingangsgröße (Stellgröße y) zur Ausgangsgröße (Regelgröße x) der Regelstrecke bei  $t \rightarrow \infty$  (eingeschwungen)

$$Q = \left( \frac{y}{x} \right)_{t \rightarrow \infty}$$

$$Q = \frac{1}{K_S}$$

$$K_S = \frac{1}{Q}$$

Q = Ausgleichswert der Regelstrecke

**Kennwerte für Regelstrecken ohne Ausgleich (I-Verhalten):**

$$F(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega} \cdot K_{IS}}{1 + [(j\omega) \cdot T_1] + [(j\omega)^2 \cdot T_2^2] + \dots + [(j\omega)^n \cdot T_n^n]}$$

$$F(p) = \frac{\frac{1}{p} \cdot K_{IS}}{1 + (p \cdot T) + (p^2 \cdot T_2^2) + \dots + (p^n \cdot T_n^n)}$$

$$A = \frac{1}{K_{IS} \cdot y_{\max}}$$

$$y_{\max} = \frac{1}{K_{IS} \cdot A}$$

$$K_{IS} = \frac{1}{A \cdot y_{\max}}$$

$$Q = \left( \frac{y}{x} \right)_{t \rightarrow \infty} \quad \text{und } t \rightarrow \infty \text{ gilt } x \rightarrow \infty \quad \Rightarrow \quad \boxed{Q = 0}$$

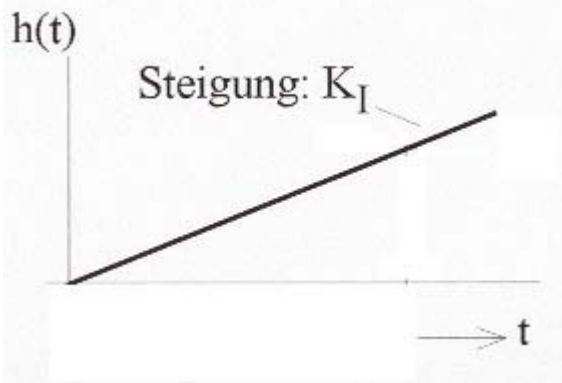
A = Anlaufwert der Regelstrecke in  $\frac{s}{[y]}$  z.B.  $\frac{s}{m}$ ,  $\frac{s}{l}$ ,  $\frac{s}{m^3}$

Q = Ausgleichswert der Regelstrecke

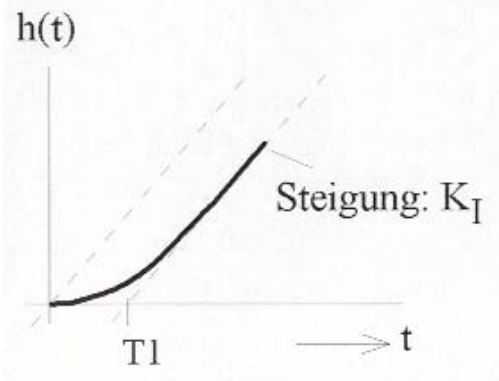
K<sub>IS</sub> = Integrierbeiwert in  $\frac{1}{s}$

y<sub>max</sub> = maximale Eingangsgröße der Regelstrecke (Stellgröße y)

**Ausgangskennlinie ( Regelgröße x ) der Regelstrecke ohne Verzögerung:**



**Ausgangskennlinie ( Regelgröße x ) der Regelstrecke mit Verzögerung:**

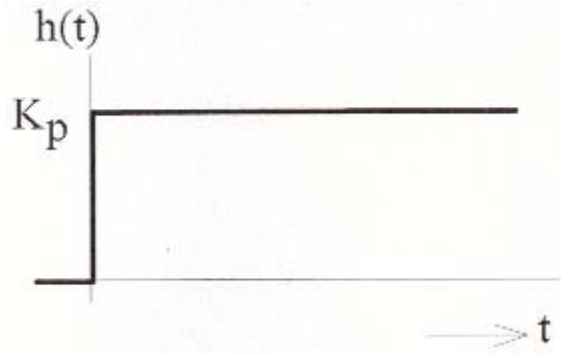


**Übersicht Kennwerte für Regelstrecken mit Ausgleich (P-Verhalten):**

$$F(j\omega) = \frac{K_{PS}}{1 + [(j\omega) \cdot T_1] + [(j\omega)^2 \cdot T_2^2] + \dots + [(j\omega)^n \cdot T_n^n]} \quad F(p) = \frac{K_{PS}}{1 + (p \cdot T) + (p^2 \cdot T_2^2) + \dots + (p^n \cdot T_n^n)}$$

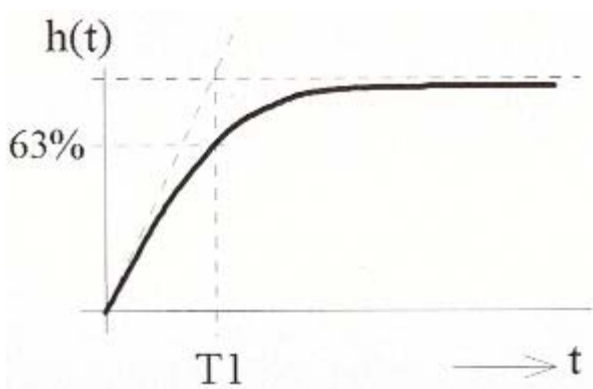
$$Q = \frac{1}{K_S} \quad \text{mit } K_S = K_P \Rightarrow \boxed{Q = \frac{1}{K_P}}$$

Regelstrecke ohne Verzögerung:



$$A = \frac{1}{v_{\max}} \quad \text{mit } v_{\max} = 0 \Rightarrow \boxed{A = \infty}$$

Regelstrecke mit Verzögerung T1:

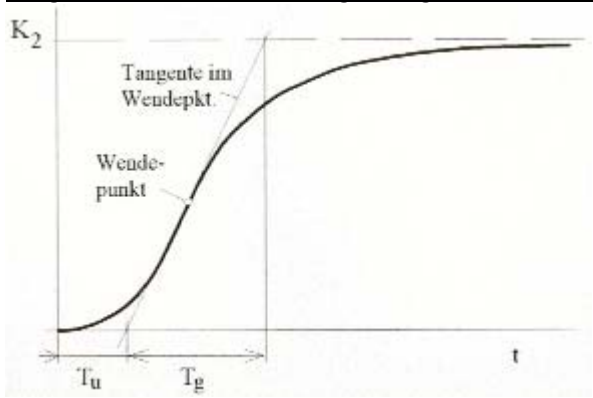


$$A = \frac{T_1}{K_P \cdot y_{\max}} \quad \text{mit } K_P \cdot y_{\max} = x_{\max}$$

$$\boxed{A = \frac{T_1}{x_{\max}}} \quad \boxed{x_{\max} = \frac{T_1}{A}} \quad \boxed{T_1 = A \cdot x_{\max}}$$

$$\boxed{K_P = \frac{T_1}{A \cdot y_{\max}}}$$

Regelstrecke mit Verzögerung T2 und höher:



$$\boxed{A = \frac{T_g}{x_{\max}}} \quad \boxed{x_{\max} = \frac{T_g}{A}} \quad \boxed{T_g = A \cdot x_{\max}}$$

$$\boxed{K_P = \frac{T_g}{A \cdot y_{\max}}}$$

A = Anlaufwert der Regelstrecke in  $\frac{[y]}{s}$

Q = Ausgleichswert der Regelstrecke

Kp = Proportionalbeiwert

y<sub>max</sub> = maximale Eingangsgröße der Regelstrecke (Stellgröße y)

x<sub>max</sub> = maximale Regelgröße der Regelstrecke (Regelgröße x)

T<sub>1</sub> = Zeitkonstante der 1. Ordnung

T<sub>g</sub> = Ausgleichszeit in s

T<sub>u</sub> = Verzugszeit in s

**Regelbarkeit einer Regelstrecke:**

Die Regelbarkeit einer Strecke hängt von den Zeitkonstanten  $T_1$  bzw. der Ausgleichszeit  $T_g$  und der häufig auftretenden zusätzlichen Totzeit  $T_t$  ab.

Bei einer Regelung wartet zunächst der Regler auf eine Störgröße, die die Regelgröße  $x$  verändert.

Dann reagiert der Regler und gibt eine korrigierte Stellgröße  $y$  aus, um die Störung möglichst komplett auszugleichen.

Wenn nun die Zeitkonstante  $T_1$  bzw die Ausgleichszeit  $T_g$  klein ist (Regelstrecke reagiert schnell) und die Totzeit  $T_t$  bzw.  $T_t + T_u$  auch sehr klein ist, kann die Stellgröße  $y$  schnell auf die Regelgröße  $x$  wirken und damit die Störgröße schnell ausgleichen.

⇒ Je größer  $\frac{T_1}{T_t}$  bzw.  $\frac{T_g}{T_t + T_u}$  ist, desto besser ist die Regelstrecke regelbar.

Aus der Praxis ergeben sich folgende Anhaltspunkte:

$\frac{T_1}{T_t}$ bzw. $\frac{T_g}{T_t + T_u}$	kleiner 1,2	1,2 bis 2,5	2,5 bis 5	5 bis 10	über 10
Regelbarkeit	sehr schlecht	schlecht	mäßig	gut	sehr gut

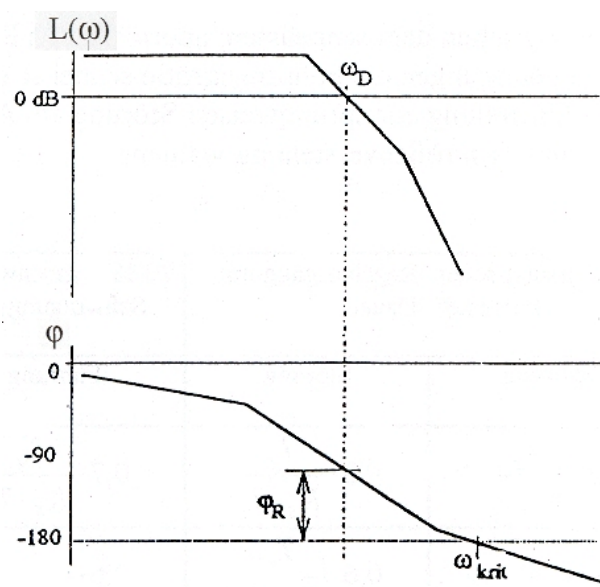
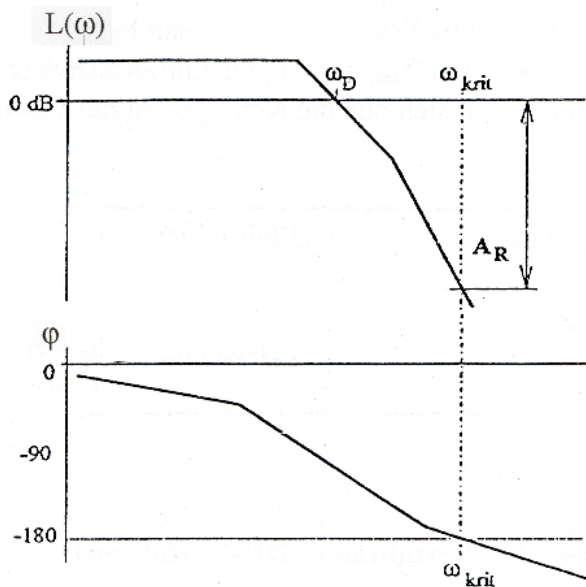
$T_1$  = Zeitkonstante der 1. Ordnung  
 $T_g$  = Ausgleichszeit in s

$T_t$  = Totzeit in s  
 $T_u$  = Verzugszeit in s

**Amplituden- und Phasenrand:**

Der Amplitudenrand  $A_R$  ist der Abstand zwischen dem Amplitudengang bei  $\omega_{krit}$  ( $\varphi = -180^\circ$ ) und der 0dB-Linie.

Der Phasenrand  $\varphi_R$  ist der Abstand zwischen dem Phasengang bei  $\omega_D$  ( $L(\omega)=0dB$ ) und der  $0^\circ$ -Linie.



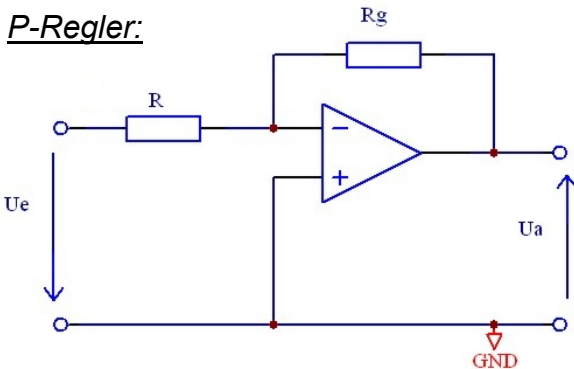
**Nyquist-Kriterium:**

Das Regelkreisglied ist ausreichend stabil, wenn der Phasenrand  $\varphi_R \geq 30^\circ$ , bzw. der Amplitudenrand  $A_R \geq 2$  dB ist.

**Stetige Regler mit OP:**

allgemein gilt:  $F(j\omega) = \frac{u_a}{u_e}$  bzw.  $F(j\omega) = \frac{u_2}{u_1}$

P-Regler:

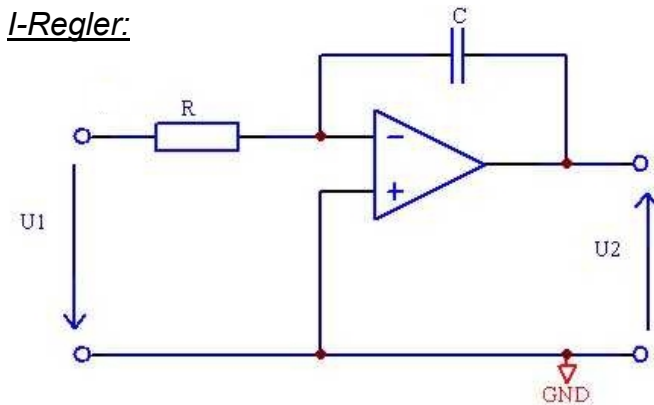


$$F(j\omega) = \frac{R_g}{R}$$

$$F(j\omega) = K_{PR}$$

$$K_{PR} = \frac{R_g}{R}$$

I-Regler:

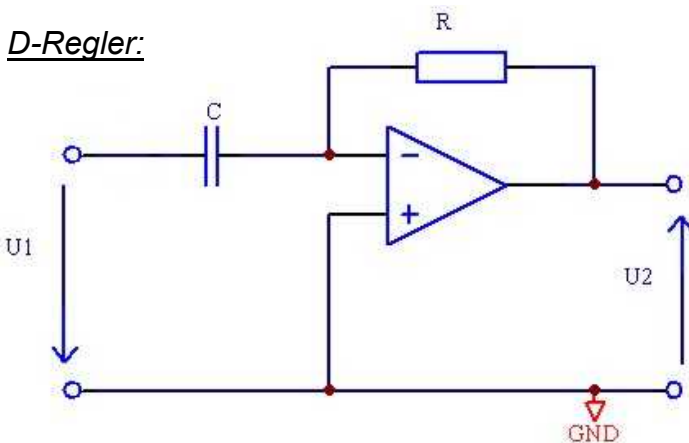


$$F(j\omega) = \frac{1}{j\omega \cdot R \cdot C}$$

$$F(j\omega) = \frac{1}{j\omega} \cdot K_{IR}$$

$$K_{IR} = \frac{1}{R \cdot C}$$

D-Regler:



$$F(j\omega) = j\omega \cdot R \cdot C$$

$$F(j\omega) = j\omega \cdot K_{DR}$$

$$K_{DR} = R \cdot C$$

Mit  $u_e$  bzw.  $u_1$  = Regeldifferenz  $e$  und  $u_a$  bzw.  $u_2$  = Stellgröße  $y$  folgt daraus:

$$K_R = \frac{y}{e}$$

$$y = e \cdot K_R$$

$$e = \frac{y}{K_R}$$

$$e = w - x$$

$K_R$  = Reglerbeiwert ( $K_{PR}$ ,  $K_{IR}$ ,  $K_{DR}$ )

$y$  = Stellgröße

$e$  = Regeldifferenz

$w$  = Führungsgröße (Sollwert)

$x$  = Regelgröße (Istwert)



**Kombination von stetigen Reglern mit OP:**

$$\underline{F}(j\omega) = K_{PR} + \left( \frac{1}{j\omega} \cdot K_{IR} \right) + (j\omega \cdot K_{DR})$$

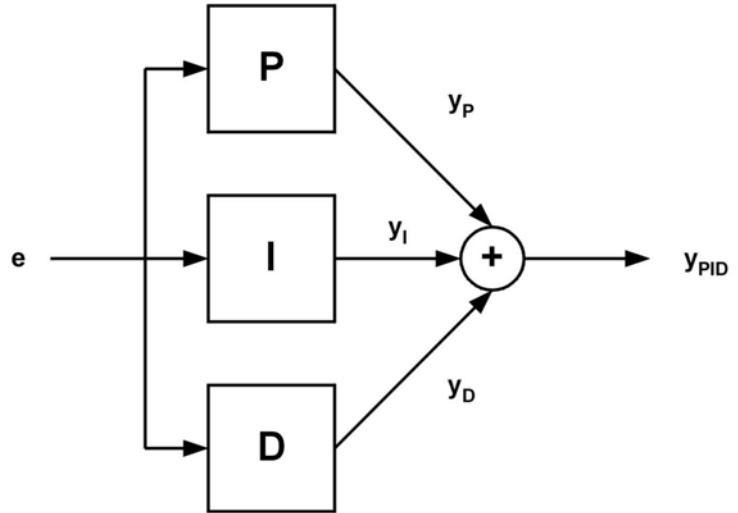
mit

$$T_N = \frac{K_{PR}}{K_{IR}}$$

$$T_V = \frac{K_{DR}}{K_{PR}}$$

folgt:

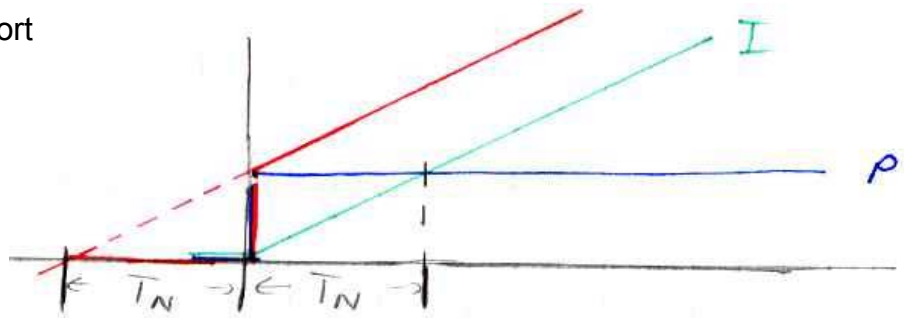
$$\underline{F}(j\omega) = K_{PR} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{1}{T_N} \right) + (j\omega \cdot T_V) \right]$$



- $\underline{E}(j\omega)$  = komplexe Übertragungsfunktion des Reglers
- $K_{PR}$  = Proportionalbeiwert des Reglers. Ohne Einheit !!!
- $K_{IR}$  = Integrierbeiwert des Reglers in  $\frac{1}{s}$
- $K_{DR}$  = Differenzierbeiwert des Reglers in s
- $T_N$  = Nachstellzeit in s
- $T_V$  = Vorhaltezeit in s

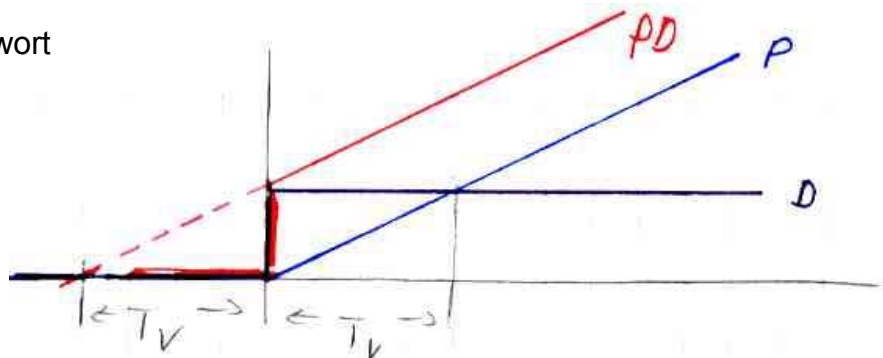
**Graphische Bestimmung der Nachstellzeit:**

Dazu wird die Sprungantwort des PI-Teils des Reglers untersucht.



**Graphische Bestimmung der Vorstellzeit:**

Dazu wird die Rampenantwort des PD-Teils des Reglers untersucht.



**Einstellen von Reglern:**

Eigenschaften(Kenngrößen) der Regelstrecke sind nicht bekannt:

**Ziegler-Nichols-Verfahren:**

- Der Regler wird zuerst als P-Regler betrieben. (  $\Rightarrow T_N = \infty$  und  $T_V = 0$  )
- Nun wird  $K_{PR}$  solange erhöht, bis das Regelsystem gerade ungedämpfte Schwingungen ausführt. Dieser  $K_{PR}$ -Wert wird  $K_{PRkrit}$  genannt.

Es wird die Periodendauer  $T_{krit}$  der ungedämpften Schwingungen ermittelt.

Nun können die Kenngrößen der verschiedenen Reglertypen wie folgt berechnet werden:

- P-Regler:  $K_{PR} = 0,5 \cdot K_{PRkrit}$
- PI-Regler:  $K_{PR} = 0,45 \cdot K_{PRkrit}$        $T_N = 0,83 \cdot T_{krit}$
- PD-Regler:  $K_{PR} = 0,8 \cdot K_{PRkrit}$        $T_V = 0,12 \cdot T_{krit}$
- PID-Regler:  $K_{PR} = 0,6 \cdot K_{PRkrit}$        $T_N = 0,5 \cdot T_{krit}$        $T_V = 0,125 \cdot T_{krit}$

Eigenschaften(Kenngrößen) der Regelstrecke sind bekannt:

**Chien-Hrones- und Reswick-Verfahren:**

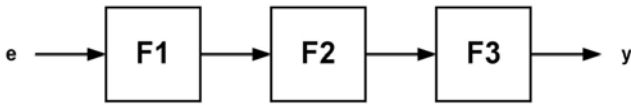
Reglerverhalten		Aperiodischer Regelvorgang mit kürzester Dauer		20% Überschwinger mit kleinster Schwingungsphase	
		sprungweise Sollwertverstellung (Führungsgr.)	sprungweise Störungen	sprungweise Sollwertverstellung (Führungsgr.)	sprungweise Störungen
<b>P-Regler</b>	$K_{PR}$	$0,3 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,3 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,7 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,7 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$
		$0,35 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,6 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,6 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,7 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$
<b>PI-Regler</b>	$T_N$	$1,2 \cdot T_g$	$4 \cdot T_U$	$1 \cdot T_g$	$2,3 \cdot T_U$
	$K_{PR}$	$0,6 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,95 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$0,95 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$	$1,2 \cdot \frac{T_g}{K_S \cdot T_u}$
<b>PID-Regler</b>	$T_N$	$1 \cdot T_g$	$2,4 \cdot T_U$	$1,35 \cdot T_g$	$2 \cdot T_U$
	$T_V$	$0,5 \cdot T_U$	$0,42 \cdot T_U$	$0,47 \cdot T_U$	$0,42 \cdot T_U$

- $K_{PR}$  = Proportionalbeiwert des Reglers. Ohne Einheit !!!
- $T_N$  = Nachstellzeit in s
- $T_V$  = Vorhaltezeit in s
- $K_S$  = Übertragungsbeiwert der Regelstrecke
- $T_g$  = Ausgleichszeit in s
- $T_u$  = Verzugszeit in s

**Kombinationsarten von Regelkreisgliedern:**

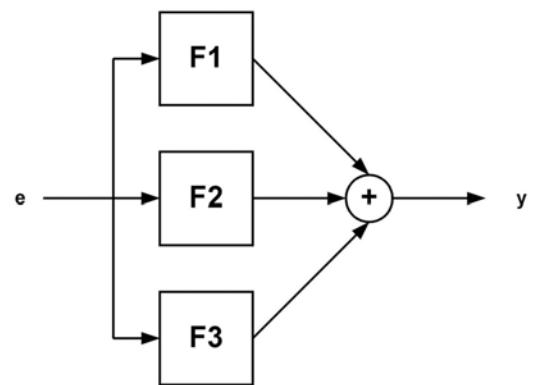
Kettenschaltung:

$$F_{ges} = F1 \cdot F2 \cdot F3$$



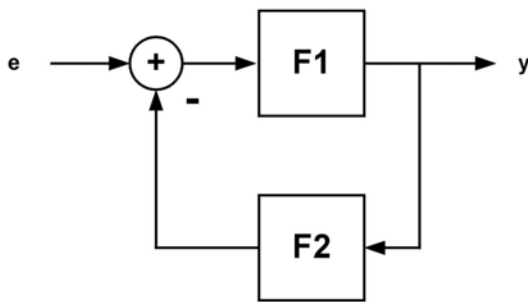
Parallelschaltung:

$$F_{ges} = F1 + F2 + F3$$



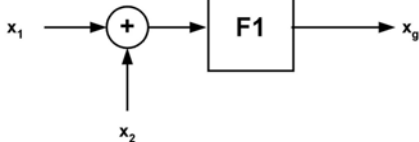
Kreisstruktur:

$$F_{ges} = \frac{F1}{1 + (F1 \cdot F2)}$$



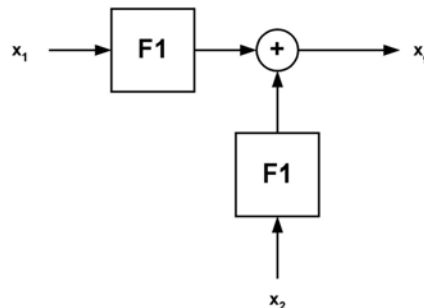
**Verschieben von Summationsstellen:**

Hinter ein RKG:



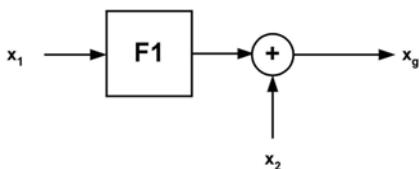
$$x_g = (x_1 + x_2) \cdot F1$$

⇒



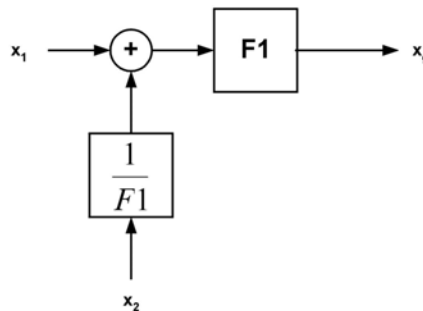
$$x_g = (x_1 \cdot F1) + (x_2 \cdot F1)$$

Vor ein RKG:



$$x_g = (x_1 \cdot F1) + x_2$$

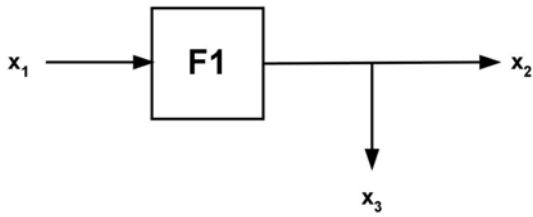
⇒



$$x_g = \left[ x_1 + \left( x_2 \cdot \frac{1}{F1} \right) \right] \cdot F1$$

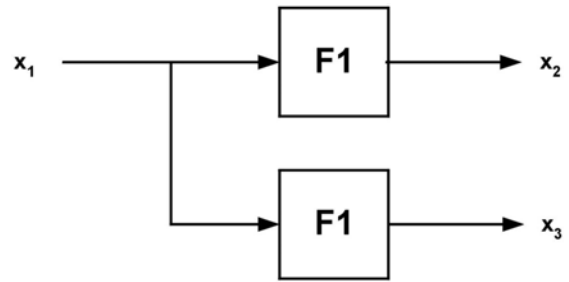
**Verschieben von Knotenpunkten:**

Vor ein RKG:



$$x_2 = x_3 = x_1 \cdot F1$$

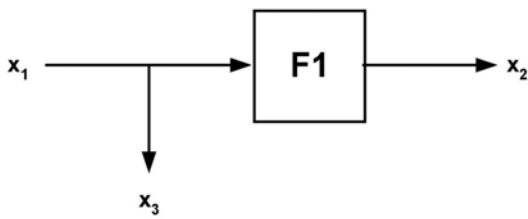
⇒



⇒

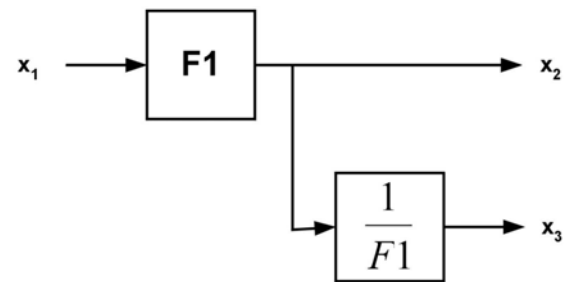
$$x_2 = x_1 \cdot F1 \quad x_3 = x_1 \cdot F1$$

Hinter ein RKG:



$$x_1 = x_3 \quad x_2 = x_1 \cdot F1$$

⇒



⇒

$$x_2 = x_1 \cdot F1 \quad x_3 = x_1 \cdot \frac{1}{F1}$$