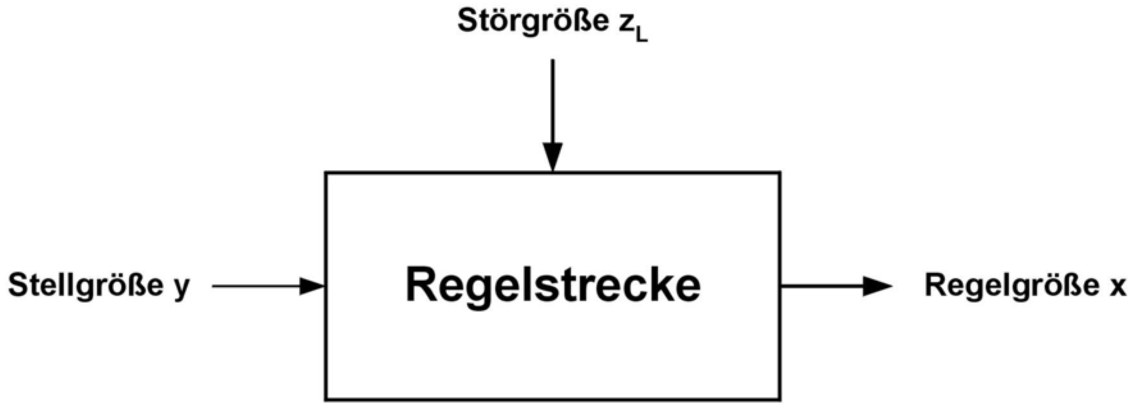
Inhaltsverzeichnis:

Thema	Unterpunkt	Seite
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

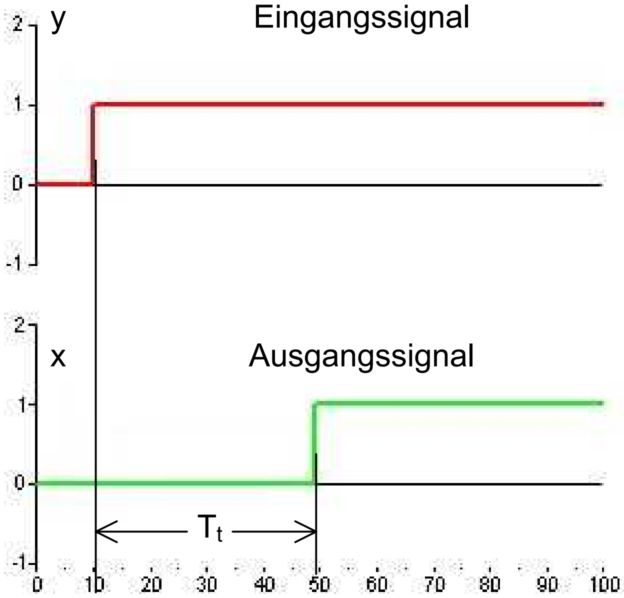
Regelstrecken ohne Ausgleich:

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:



$x = y \bullet K_S \bullet (t - T_t)$

Kenngröße: T_t

Übertragungsfunktion:

$\boxed{\underline{F}(j\omega) = K_S \bullet e^{-j\omega T_t}}$

$\boxed{F(p) = K_S \bullet e^{-pT_t}}$

Amplitudengang (für Bodediagramm):

$\boxed{|\underline{F}(j\omega)| = K_S}$ $\qquad L(\omega) = 20 \bullet \log(|\underline{F}(j\omega)|)$

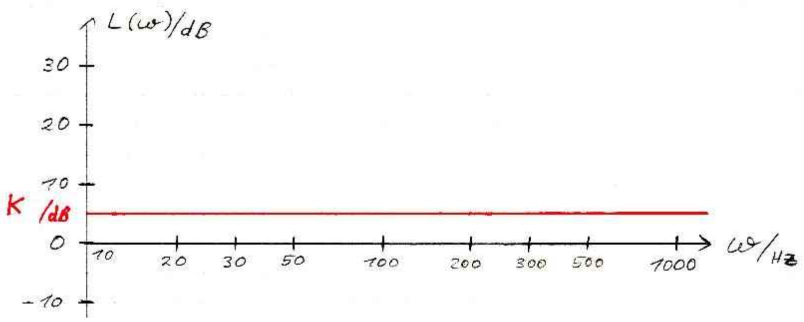
$\boxed{L(\omega) = 20 \bullet \log(K_S)}$

Phasengang (für Bodediagramm):

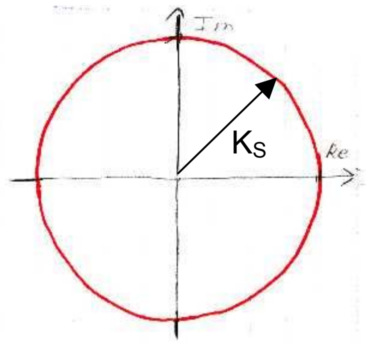
$\boxed{\varphi(\omega) = -\arctan(\omega \bullet T_t)}$ **RAD einstellen !!!!!** $\boxed{\omega_K = \frac{\pi}{T_t}}$

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(ω) = Amplitudengang der Reglestrecke in dB
φ(ω) = Phasengang der Regelstrecke in °
ω_K = kritische Kreisfrequenz bei der φ(ω) den Wert -180 ° überschreitet

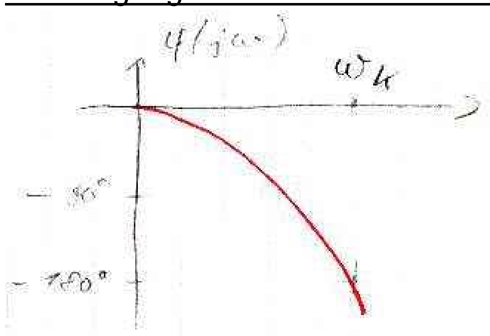
Amplitudengang Totzeit-Verhalten idealisiert:



Ortskurve Totzeit-Verhalten:



Phasengang Totzeit-Verhalten idealisiert:



Dynamisches Verhalten von Regelstrecken:

Regelstrecken mit Ausgleich:

Durch ihr P-Verhalten haben sie folgende Übertragungsfunktion:

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

$$F(p)=\frac{K_{PS}}{1+(p\bullet T)+\left(p^2\bullet T_2{}^2\right)+\ldots+\left(p^n\bullet T_n{}^n\right)}$$

Regelstrecken ohne Ausgleich:

Durch ihr I-Verhalten haben sie folgende Übertragungsfunktion:

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

$$F(p)=\frac{\frac{1}{p}\bullet K_{IS}}{1+(p\bullet T)+\left(p^2\bullet T_2{}^2\right)+\ldots+\left(p^n\bullet T_n{}^n\right)}$$

$\underline{F}(j\omega)$ = 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

$$A=\frac{1}{v_{\max}}\qquad v_{\max}=\frac{1}{A}\qquad v_{\max}=K_S\bullet y_{\max}\qquad A=\frac{1}{K_S\bullet y_{\max}}$$

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)

$$Q=\left(\frac{y}{x}\right)_{t\rightarrow\infty}\qquad Q=\frac{1}{K_S}\qquad K_S=\frac{1}{Q}$$

Q = Ausgleichswert der Regelstrecke

Kennwerte für Regelstrecken ohne Ausgleich (I-Verhalten):

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

$$F(p)=\frac{\frac{1}{p}\bullet K_{IS}}{1+(p\bullet T)+\left(p^2\bullet T_2{}^2\right)+...+\left(p^n\bullet T_n{}^n\right)}$$

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

$Q=\left(\frac{y}{x}\right)_{t\to\infty}$ und t→∞ gilt x→∞ $\Rightarrow$ $\boxed{Q=0}$

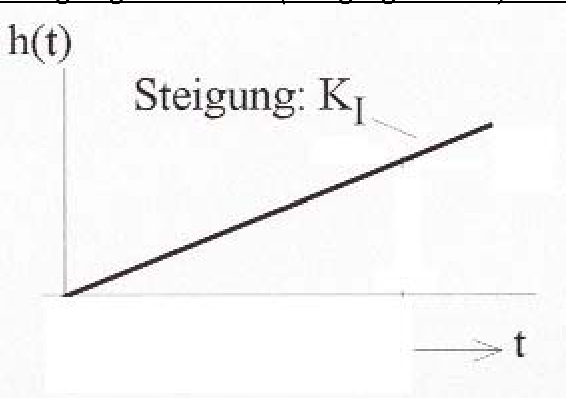
A = Anlaufwert der Regelstrecke in $\frac{s}{[y]}$ z.B. $\frac{s}{m}$, $\frac{s}{l}$, $\frac{s}{m^3}$

Q = Ausgleichswert der Regelstrecke

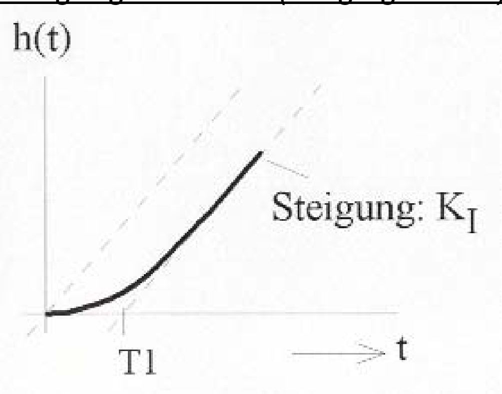
K_{IS} = Integrierbeiwert in $\frac{1}{s}$

y_{max} = maximale Eingangsgröße der Regelstrecke (Stellgröße y)

Ausgangskennlinie (Regelgröße x) der Regelstrecke ohne Verzögerung:



Ausgangskennlinie (Regelgröße x) der Regelstrecke mit Verzögerung:

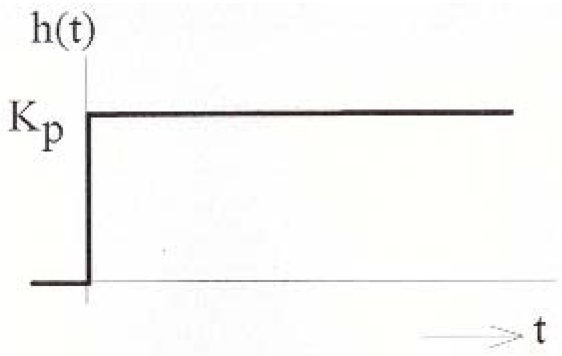


Übersicht Kennwerte für Regelstrecken mit Ausgleich (P-Verhalten):

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

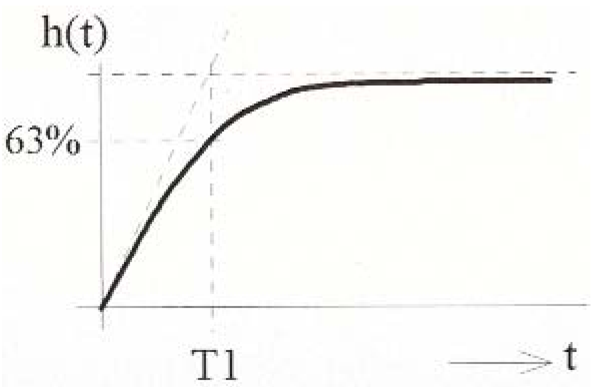
$Q=\frac{1}{K_S}$ mit $K_S = K_P$ $\Rightarrow$ $\boxed{Q=\frac{1}{K_P}}$

Regelstrecke ohne Verzögerung:



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

Regelstrecke mit Verzögerung T1:

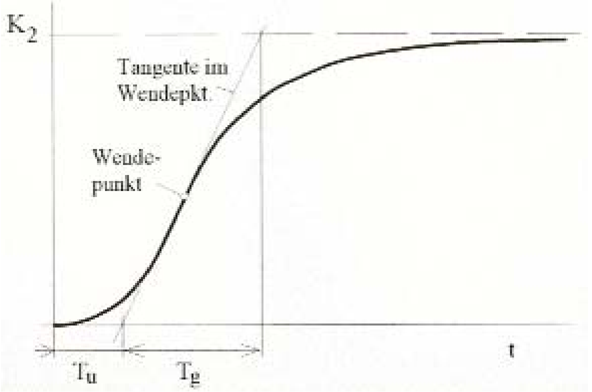


$A=\frac{T_1}{K_P\bullet y_{\max}}$ mit $K_P\bullet y_{\max}=x_{\max}$

$\boxed{A=\frac{T_1}{x_{\max}}}$ $\boxed{x_{\max}=\frac{T_1}{A}}$ $\boxed{T_1=A\bullet x_{\max}}$

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

Regelstrecke mit Verzögerung T2 und höher:



$\boxed{A=\frac{T_g}{x_{\max}}}$ $\boxed{x_{\max}=\frac{T_g}{A}}$ $\boxed{T_g=A\bullet x_{\max}}$

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

A = Anlaufwert der Regelstrecke in $\frac{[y]}{s}$
Q = Ausgleichswert der Regelstrecke
K_P = Proportionalbeiwert
y_{max} = maximale Eingangsgröße der Regelstrecke (Stellgröße y)
x_{max} = maximale Regelgröße der Regelstrecke (Regelgröße x)
T_1 = Zeitkonstante der 1. Ordnung
T_g = Ausgleichszeit in s
T_u = Verzugszeit in s

Regelbarkeit einer Regelstrecke:

Die Regelbarkeit einer Strecke hängt von den Zeitkonstanten T1 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.

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

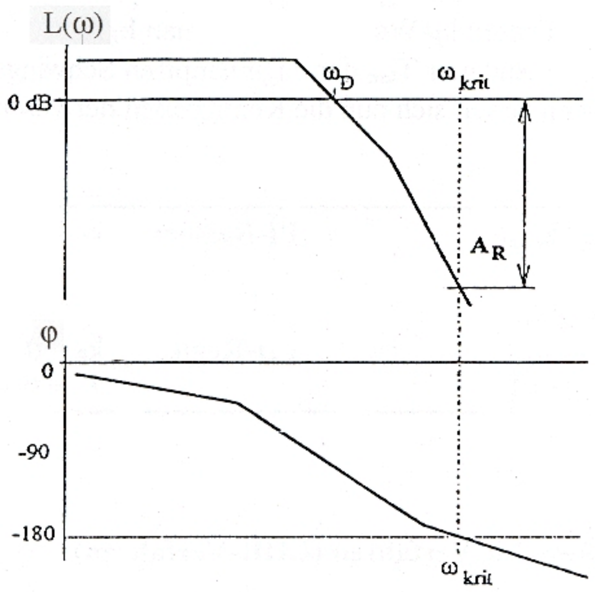
Aus der Praxis ergeben sich folgende Anhaltspunkte:

$\frac{T_1}{T_t}$ 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

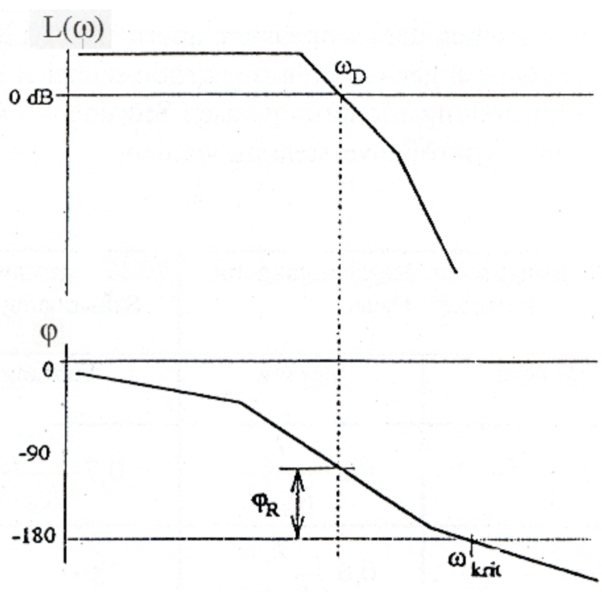
T_1 = Zeitkonstante der 1. Ordnung
T_g = Ausgleichszeit in s
T_t = Totzeit in s
T_u = Verzugszeit in s

Amplituden- und Phasenrand:

Der Amplitudenrand A_R ist der Abstand zwischen dem Amplitudengang bei ω_{krit} (φ = -180°) und der 0dB-Linie.



Der Phasenrand φ_R ist der Abstand zwischen dem Phasengang bei ω_D ($L(\omega)$=0dB) und der 0°-Linie.

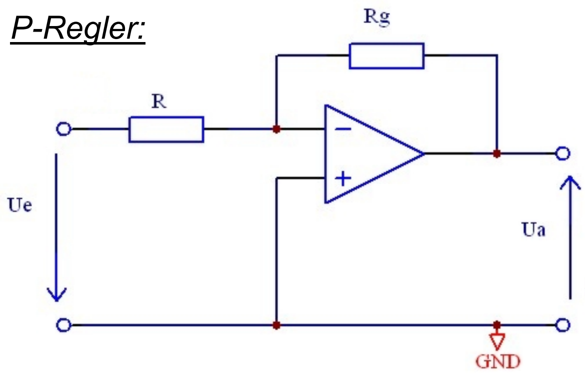


Nyquist-Kriterium:
Das Regelkreisglied ist ausreichend stabil, wenn der Phasenrand $\varphi_R \geq 30°$, bzw. der Amplitudenrand $A_R \geq 2$ dB ist.

Stetige Regler mit OP:

allgemein gilt: $\boxed{\underline{F}(j\omega)=\frac{\underline{u}_a}{\underline{u}_e}}$ bzw. $\boxed{\underline{F}(j\omega)=\frac{\underline{u}_2}{\underline{u}_1}}$

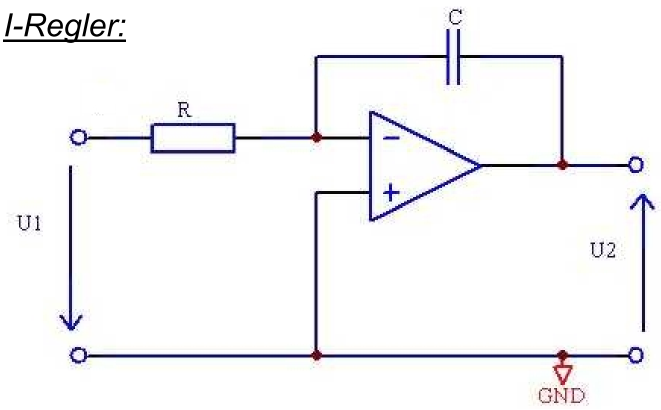
P-Regler:



$\boxed{\underline{F}(j\omega)=\frac{R_g}{R}}$ $\boxed{\underline{F}(j\omega)=K_{PR}}$

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

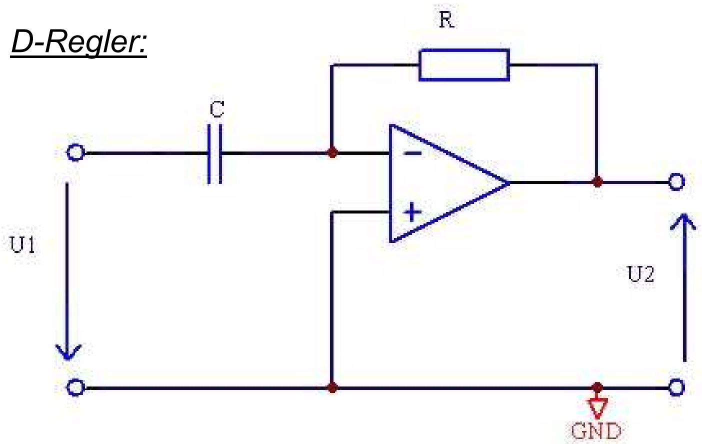
I-Regler:



$\boxed{\underline{F}(j\omega)=\frac{1}{j\omega\bullet R\bullet C}}$ $\boxed{\underline{F}(j\omega)=\frac{1}{j\omega}\bullet K_{IR}}$

$\boxed{K_{IR}=\frac{1}{R\bullet C}}$

D-Regler:



$\boxed{\underline{F}(j\omega)=j\omega\bullet R\bullet C}$ $\boxed{\underline{F}(j\omega)=j\omega\bullet K_{DR}}$

$\boxed{K_{DR}=R\bullet C}$

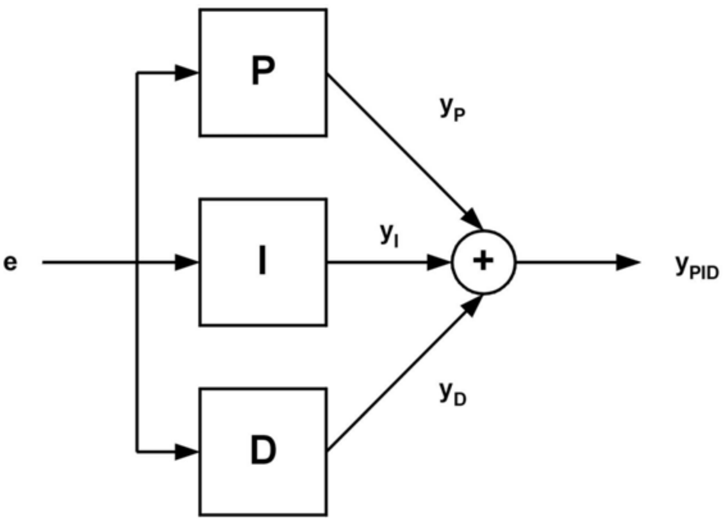
Mit u_e bzw. u_1 = Regeldifferenz e und u_a bzw. u_2 = Stellgröße y folgt daraus:

$\boxed{K_R=\frac{y}{e}}$ $\boxed{y=e\bullet K_R}$ $\boxed{e=\frac{y}{K_R}}$ $\boxed{e=w-x}$

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:

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



mit

$$T_N = \frac{K_{PR}}{K_{IR}} \qquad T_V = \frac{K_{DR}}{K_{PR}}$$

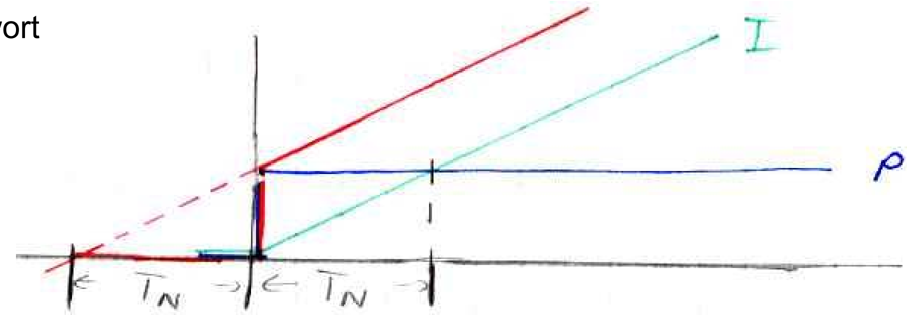
folgt:

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

$\underline{F}(j\omega)$ = 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

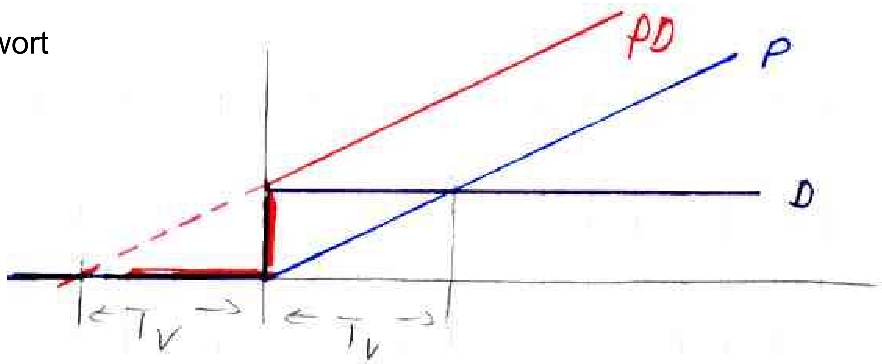
Graphische Bestimmung der Nachstellzeit:

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

Eigenschaften(Kenngrößen) der Regelstrecke sind bekannt:

Chien-Hrones- und Reswick-Verfahren:

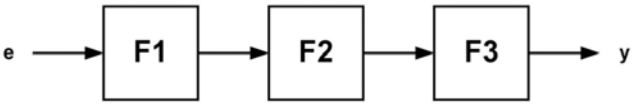
Reglerverhalten		Aperiodischer Regelvorgang mit kürzester Dauer		20% Überschwinger mit kleinster Schwingungsphase	
		sprungweise Sollwert-verstellung (Führungsgr.)	sprungweise Störungen	sprungweise Sollwert-verstellung (Führungsgr.)	sprungweise Störungen
P-Regler	K_{PR}	$0,3 \bullet \frac{T_g}{K_S \bullet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

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:

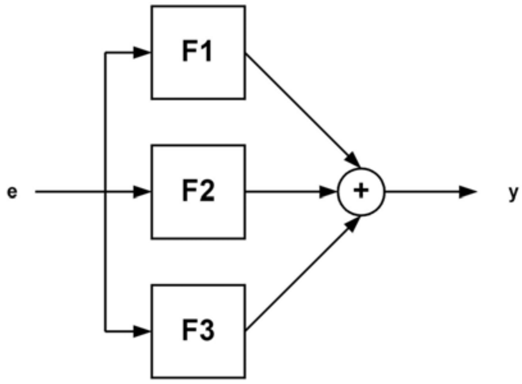
Kettenschaltung:

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



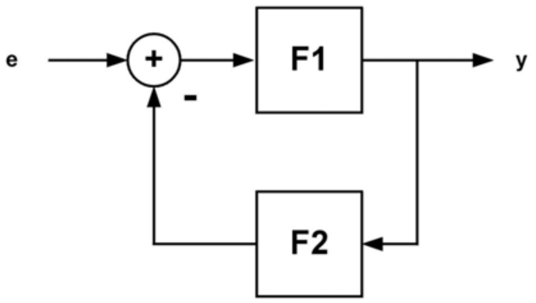
Parallelschaltung:

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



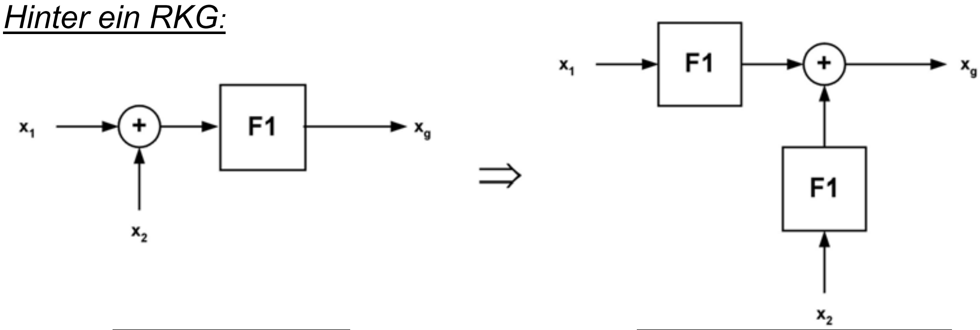
Kreisstruktur:

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



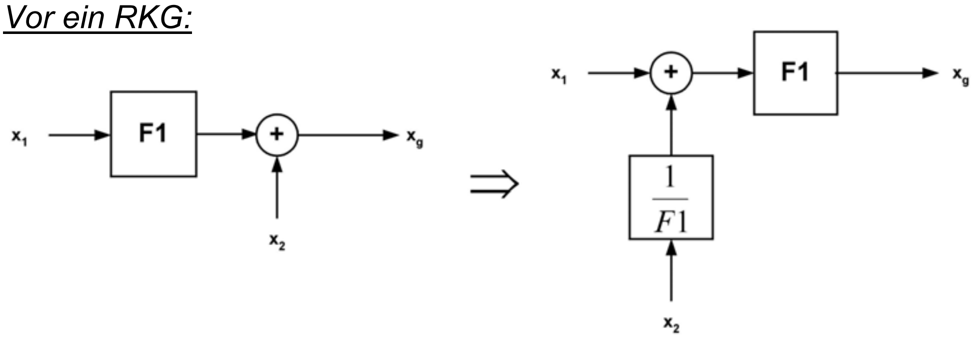
Verschieben von Summationsstellen:

Hinter ein RKG:



$$x_g = (x_1 + x_2) \bullet F1 \quad \Rightarrow \quad x_g = (x_1 \bullet F1) + (x_2 \bullet F1)$$

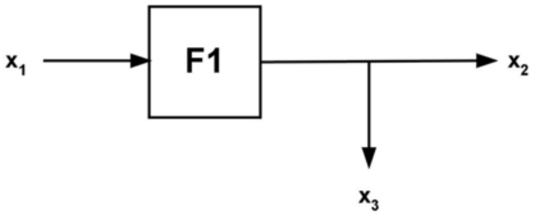
Vor ein RKG:



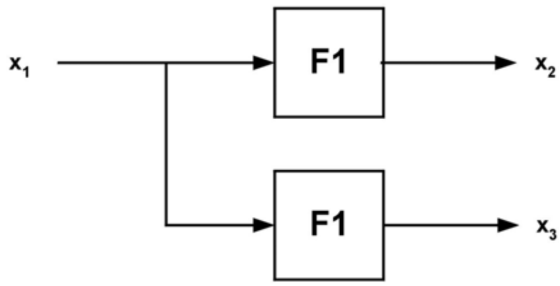
$$x_3 = (x_1 \bullet F1) + x_2 \quad \Rightarrow \quad x_3 = \left[x_1 + \left(x_2 \bullet \frac{1}{F1}\right)\right] \bullet F1$$

Verschieben von Knotenpunkten:

Vor ein RKG:

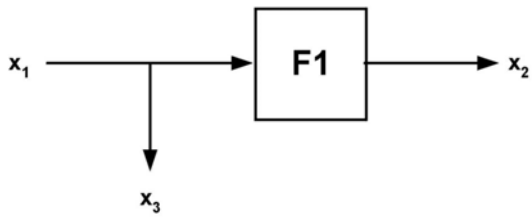


$\Rightarrow$

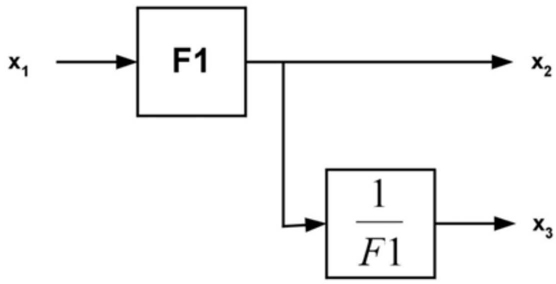


$\boxed{x_2 = x_3 = x_1 \bullet F1}$ $\Rightarrow$ $\boxed{x_2 = x_1 \bullet F1}$ $\boxed{x_3 = x_1 \bullet F1}$

Hinter ein RKG:



$\Rightarrow$



$\boxed{x_1 = x_3}$ $\boxed{x_2 = x_1 \bullet F1}$ $\Rightarrow$ $\boxed{x_2 = x_1 \bullet F1}$ $\boxed{x_3 = x_1 \bullet \frac{1}{F1}}$