Mess- und Regelungstechnik

Studieneinheit 2

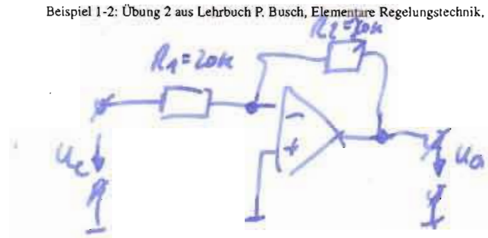
Rechenübungen zum Thema Übertragungsglieder

Dr. Wilfried Kubinger

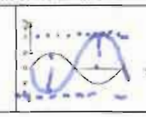
SS 2009

✓ 25.2.2009, WK

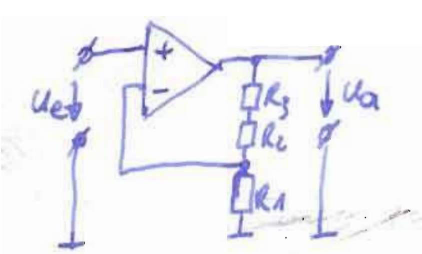
Beispiel 1-2: Übung 2 aus Lehrbuch P. Busch, Elementare Regelungstechnik, S.30



$$\frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1} = -2$$

Name: WK	Personenkennzahl: –	Datum: 25.2
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
$U_a = -2 \cdot u_e$		

Beispiel 1-1: Übung 1 aus Lehrbuch P. Busch, Elementare Regelungstechnik, S.29



$R_1 = 10k$

$R_2 = 10k$

$R_3 = 0..40k$

Unbelasteter Spannungsteiler:

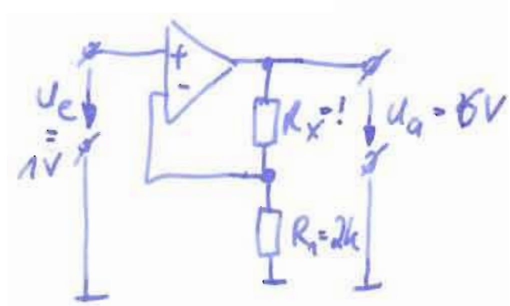
$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1}$$

a) $R_3 = 40k$ $\quad \frac{U_a}{U_e} = \frac{60k}{10k} = 6$

b) $R_3 = 0k$ $\quad \frac{U_a}{U_e} = \frac{20k}{10k} = 2$

Name: WK	Personenkennzahl: --	Datum: 25.2.
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
$U_{amin} = 2 \cdot U_e$	$U_{amax} = 6 \cdot U_e$	

Beispiel 1-3: Übung 3 aus Lehrbuch P. Busch, Elementare Regelungstechnik, S.30



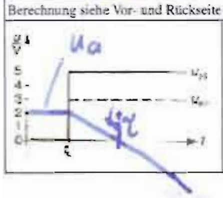
$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{R_1 + R_x}{R_1} \rightarrow \frac{U_a}{U_e} \cdot R_1 = R_1 + R_x$$

$$R_x = R_1 \cdot \left(\frac{U_a}{U_e} - 1\right) = R_1 \cdot (6-1) = 5 \cdot R_1 = 10k$$

Name: WK	Personenkennzahl: –	Datum: 25.2
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
$R_x = 10k$		

Beispiel 1-4: Übung 1 aus Lehrbuch P. Busch, Elementare Regelungstechnik, S.30

siehe Beiblatt

Name: WM	Personenkennzahl: - -	Datum: 1.2
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter 1		Zusatzblätter: 1
		

Beispiel 1-6: Übung 7 aus Lehrbuch P. Busch, Elementare Regelungstechnik, S.63

$$\underline{z} = \underline{z}_1 \cdot \underline{z}_2 + \underline{z}_3 = (1-j2)(-2+j3) + (-3-j8) =$$

$$= (-2 + j4 + j3 + 6) - (3 + j8) =$$

$$= (4 + j7) - (3 + j8) = 1 - j1$$

Name: WM	Personenkennzahl: - -	Datum: 1.2
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 0
Z=Z1*Z2+Z3= $1 - j1$	Re(Z)= 1	Im(Z)= $-j1$

Beispiel 1-5: Übung 6 aus Lehrbuch P. Busch, Elementare Regelungstechnik, S.63

$$\underline{z} = \underline{z}_1 - \underline{z}_2 = -3 + j5 - j7 = -3 - j2$$

Name:	Personenkennzahl:	Datum:
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter:
Z=Z1+Z2= $-3-j2$	Re(Z)= -3	Im(Z)= $-j2$

Beispiel 1-7: Übung 10 aus Lehrbuch P. Busch, Elementare Regelungstechnik, S.66

$$\underline{z} = \frac{5}{3-j4} = \frac{5\cdot(3+j4)}{(3-j4)(3+j4)}$$

$$= \frac{15 + j20}{9 + 16} =$$

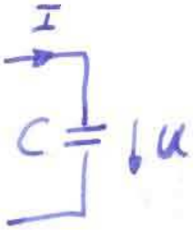
$$= \frac{15}{25} + j\,\frac{20}{25} = \frac{3}{5} + j\,\frac{3}{4}$$

$$|z| = \frac{\sqrt{15^2 + 20^2}}{25} = \frac{625}{25} = \frac{25}{25} = 1$$

$$\varphi = \arg(z) = \arctan\left(\frac{20}{15}\right) = 53{,}13^\circ$$

Name: WM	Personenkennzahl: - -	Datum: 2.1.2.
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter 0		Zusatzblätter: 0
|Z|= 1	α=arg(Z)= $53{,}13$	

…ispiel 1-4



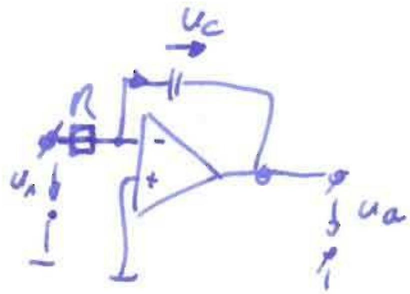
$$U = \frac{1}{C}\int I\,dt + U_0$$

$$U = \frac{1}{C} I \int_0^\infty dt + U_0$$

$$U_t = \frac{1}{C} \cdot I \cdot t \Big|_0^\infty + U_0$$

$$U_c\big|_{t<0}: U_0 = -2V$$

$$U_c\big|_{t\geq 0}: \frac{1}{C}\cdot\frac{U_1}{R} t + U_0$$

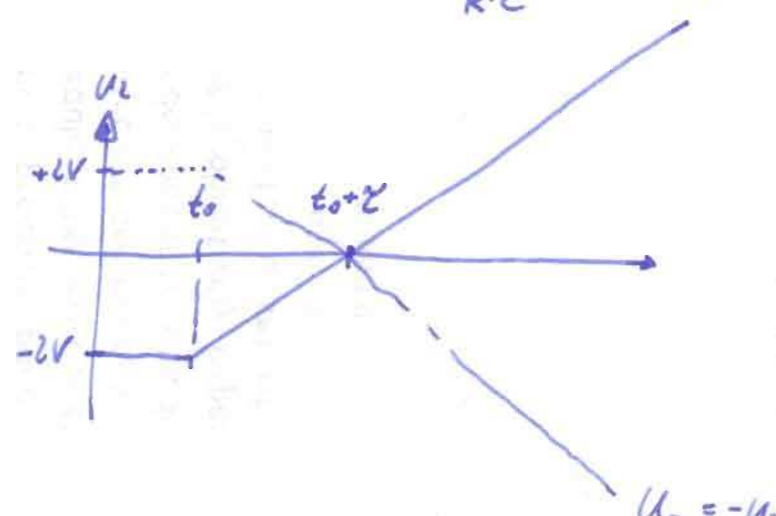


$$U_a = -U_C$$

$$\tau = R \cdot C = 3{,}2\,sec$$

$$I = \frac{U_1}{R} \qquad U_C = \frac{1}{C}\cdot\frac{U_1}{R} t + U_0 \qquad (U_1 \text{ ist negativ!})$$

$$U_C = \frac{t}{R \cdot C}\cdot U_1 + U_0$$



Beispiel 1-8: Übung 11 aus Lehrbuch P. Busch, Elementare Regelungstechnik, S.66

$$\underline{z} = \frac{3-j}{2-j2} = \frac{(3-j)(2+j2)}{(2-j2)(2+j2)} =$$

$$= \frac{6-2j+6j+2}{4+4} = \frac{8+4j}{8} =$$

$$= 1 + \frac{j}{2}$$

$$|\underline{z}| = \sqrt{1+\frac{1}{4}} = 1{,}12$$

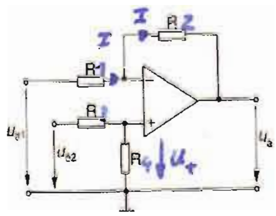
$$\varphi = \arg(\underline{z}) = \arctan\left(\frac{\frac{1}{2}}{1}\right) = \arctan\left(\frac{1}{2}\right) = 26{,}6°$$

Name: WK	Personenkennzahl:	Datum: 21.5
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 0
|Z|= 1,12	α=arg(Z)= 26,6°	

Beispiel 1-10: Berechnen Sie die Widerstände des folgenden Subtrahierers derart, dass gilt:

$u_a = -(2*u_{e1} - 3*u_{e2})$

Der Eingangswiderstand des Subtrahierers muss mindestens 47kΩ betragen (siehe auch Lehrbuch P. Busch, Elementare Regelungstechnik, S.29)



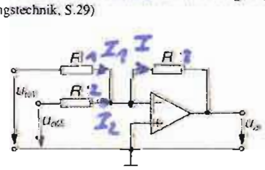
Siehe Beiblatt

Name: WK	Personenkennzahl:	Datum: 21.2
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 1
R_{e1}= R_3 50k (bel.)	R_{e2}= R_4 ∞	
R_{e1}= R_1 50k	R_{a}= R_2 100k	

Beispiel 1-9: Berechnen Sie die Widerstände des folgenden Addierers derart, dass gilt:

$u_a = -(2*u_{e1} + 3*u_{e2})$

Der Eingangswiderstand des Addierers muss mindestens 10kΩ betragen (siehe auch Lehrbuch P. Busch, Elementare Regelungstechnik, S.29)



$$u_a = -I \cdot R_3 = -(I_1 + I_2) \cdot R_3 =$$

$$= -\left(\frac{u_{e1}}{R_1} + \frac{u_{e2}}{R_2}\right) \cdot R_3 =$$

$$= -\left(u_{e1} \cdot \underbrace{\frac{R_3}{R_1}}_{2} + u_{e2} \cdot \underbrace{\frac{R_3}{R_2}}_{3}\right)$$

$$R_{ein}\Big|_{u_{e1}} = R_1 \geq 10k$$

$$R_{ein}\Big|_{u_{e1}} = R_2 \geq 10k$$

$$\frac{R_3}{R_1} = 2 \qquad \frac{R_3}{R_2} = 3$$

Vorab: 2 Möglichkeiten, aber nur eine geht!

$$R_2 = 10k$$

$$\Rightarrow R_3 = 30k$$

Name: WK	Personenkennzahl:	Datum: 21.3
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 1
R_{e1}= 15k	R_{e2}= 10k	R_3= 30k

...spiel 1-10

$$U_+ = U_{e2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$U_a = -I \cdot R_2 + U_x = -I \cdot R_2 + U_{e2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$U_{e1} = I \cdot R_1 + U_x = I \cdot R_1 + U_{e2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$I \cdot R_1 = U_{e1} - U_{e2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$I = \frac{1}{R_1} \cdot \left(U_{e1} - U_{e2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

$$U_a = -I \cdot R_2 + U_{e2}$$

$$U_{e1} = I \cdot R_1 + U_{e2}$$

$$I = \frac{1}{R_1} \cdot (U_{e1} - U_{e2})$$

$$U_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot (U_{e1} - U_{e2}) + U_{e2}$$

$$U_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{e1} + U_{e2} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$-2 \cdot U_{e1} + 3 \cdot U_{e2}$$

$$U_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \left(U_{e1} - U_{e2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) + U_{e2} \cdot \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

$$\Rightarrow \quad U_a = -\underbrace{\frac{R_2}{R_1}}_{2} \cdot U_{e1} + U_{e2} \cdot \underbrace{\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} + \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)}_{2}$$

$R_1 > 47k$

$R_3 + R_4 > 47k$

$$x + 2x = 2$$

$$3x = 5$$

$$x = \frac{2}{3}$$

100k 100k

50k 150k

Beachte die Fallenfalle:

$U_a = -(U_{e1} - U_{e2})$ $R =$ alle gleich

Mess- und Regelungstechnik

Studieneinheit 4

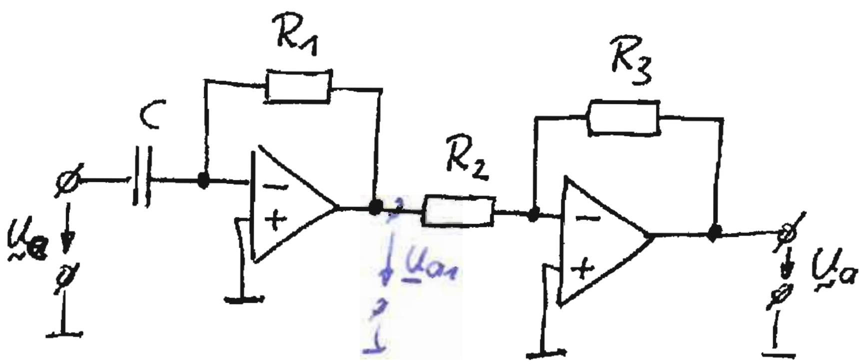
Rechenübungen zum Thema Ortskurve, Bode-Diagramm

Dr. Wilfried Kubinger

SS 2009

2.3.'09, WK

Beispiel 4-1: Bitte berechnen Sie die komplexe Übertragungsfunktion der folgenden Schaltung



Um welchen Grundglied-Typus handelt es sich?

$$\underline{F}_1 = \frac{\underline{U}_{a1}}{\underline{U}_e} = -\frac{\underline{Z}_{R1}}{\underline{Z}_C} = -\frac{R_1}{\frac{1}{j\omega C}} = -j\omega R_1 C$$

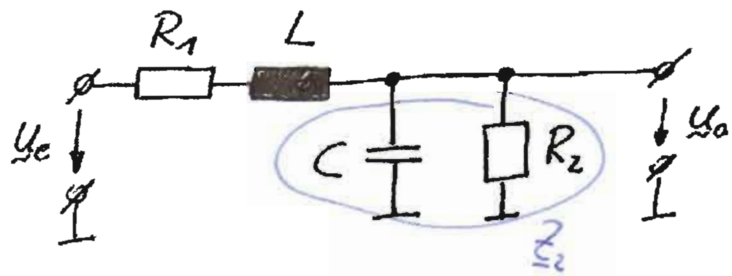
$$\underline{F}_2 = \frac{\underline{U}_a}{\underline{U}_{a1}} = -\frac{R_3}{R_2}$$

$$\underline{F} = \frac{\underline{U}_a}{\underline{U}_e} = \frac{\underline{U}_a}{\underline{U}_{a1}} \cdot \frac{\underline{U}_{a1}}{\underline{U}_e} = -\frac{R_3}{R_2} \cdot (-j\omega R_1 C) = j\omega C \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}$$

Name: Kubqa	Personenkennzahl:	Datum: 2.3.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
$\underline{F}$= $+j\omega C \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}$	Grundglied-Typus= D-Glied	

$$\frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_2+R_1} \checkmark$$

Beispiel 4-2: Bitte berechnen Sie die komplexe Übertragungsfunktion der folgenden Schaltung



Um welchen Grundglied-Typus handelt es sich?

$$\underline{F} = \frac{\underline{U_a}}{\underline{U_e}} = \frac{\underline{Z_2}}{R_1 + j\omega L + \underline{Z_2}}$$

$$\underline{Z_2} = R_2 \parallel C = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\frac{R_2}{j\omega C}}{\frac{1+j\omega R_2 C}{j\omega C}} = \frac{R_2}{1+j\omega R_2 C}$$

$$\underline{F} = \frac{\frac{R_2}{1+j\omega R_2 C}}{R_1 + j\omega L + \frac{R_2}{1+j\omega R_2 C}} = \frac{R_2}{R_2 + (R_1+j\omega L)(1+j\omega R_2 C)} =$$

$$= \frac{R_2}{R_2 + R_1 + j\omega L + j\omega R_1 R_2 C - \omega^2 L C R_2^{!}} = \frac{R_2}{R_1+R_2-\omega^2 LCR^2 + j(\omega L + \omega R_1 R_2 C)}$$

$$= \frac{R_2}{(R_1+R_2-\omega^2 LCR_2^{!}) + j(\omega L + \omega R_1 R_2 C)}$$

Name: [illegible]	Personenkennzahl:	Datum: 23.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
$\underline{F} = \frac{R_2}{(R_1+R_2-\omega^2 LCR_2^{!})+j(\omega L+\omega R_1 R_2 C)}$	Grundglied-Typus= ca. T_2-Verhalten	

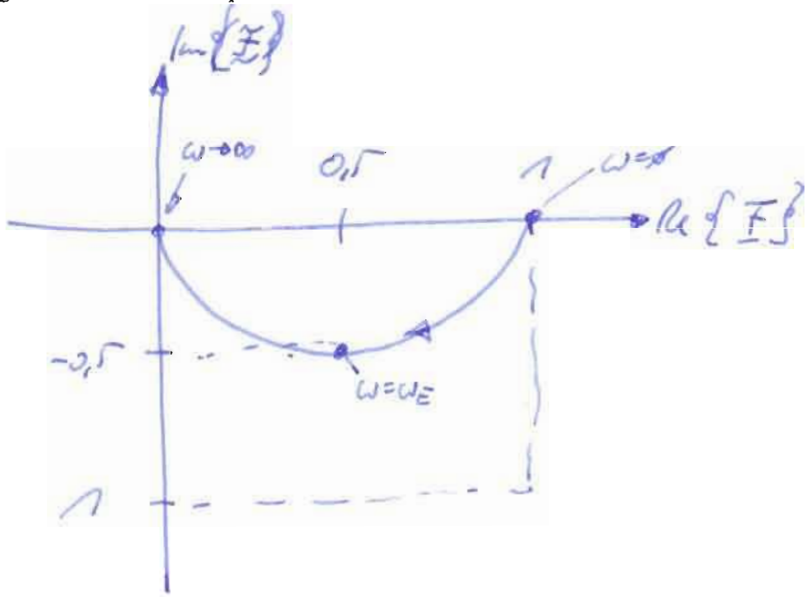
Beispiel 4-3: Bitte skizzieren Sie maßstäblich die Ortskurve des folgenden T_1-Gliedes (bitte beschriften Sie auch die Achsen korrekt).

$$\underline{F} = \frac{1}{1 + j3w}$$

$$\underline{F} = \frac{1}{1 + j\omega T_1}$$

$$\Rightarrow T_1 = 3 \text{ sec.}$$

Wie groß ist die Eckfrequenz w_E?



$$\omega_E = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{3} = 0,\dot{3} \text{ sec}^{-1}$$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 2.3.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
w_E= $\frac{1}{T_1} = 0,\dot{3} \text{ sec}^{-1}$		

Beispiel 4-4: Bitte skizzieren Sie maßstäblich die Ortskurve des folgenden T_2-Gliedes (bitte beschriften Sie auch die Achsen korrekt).

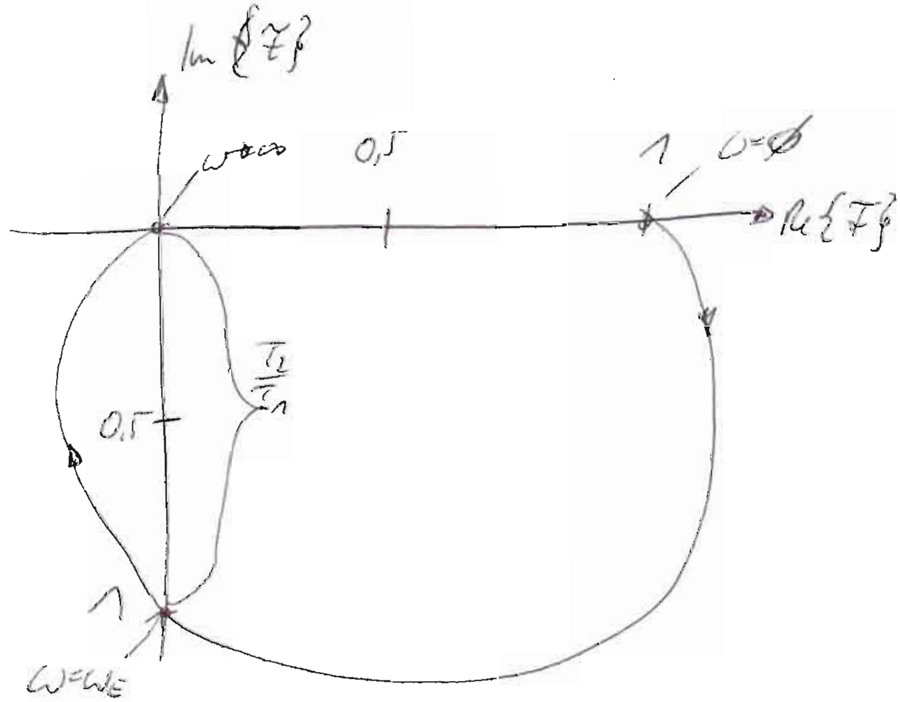
$$\underline{F} = \frac{1}{1-4w^2+j2w}$$

Wie groß sind die Eckfrequenz w_E und die Dämpfung D?

$$\underline{F} = \frac{1}{1-(\omega T_2)^2 + j\omega T_1} \Rightarrow \quad T_1 = 2 \quad T_2 = 2$$

$$\omega_E = \frac{1}{T_2} = 1 sec^{-1}$$

$$D = \frac{T_1}{2 \cdot T_2} = 0,5$$



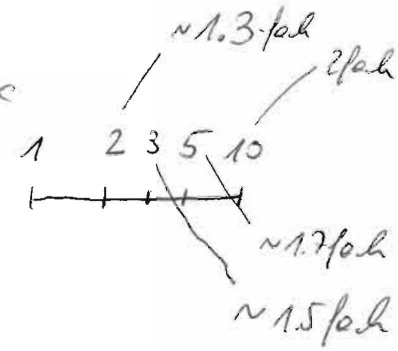
Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 2.3.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
$w_E = \frac{1}{T_2} = 1 sec^{-1}$	$D = \frac{T_1}{2T_2} = 0,5$	

Beispiel 4-5: Bitte skizzieren Sie maßstäblich das Bode-Diagramm des folgenden T_1-Gliedes (bitte beschriften Sie auch die Achsen korrekt).

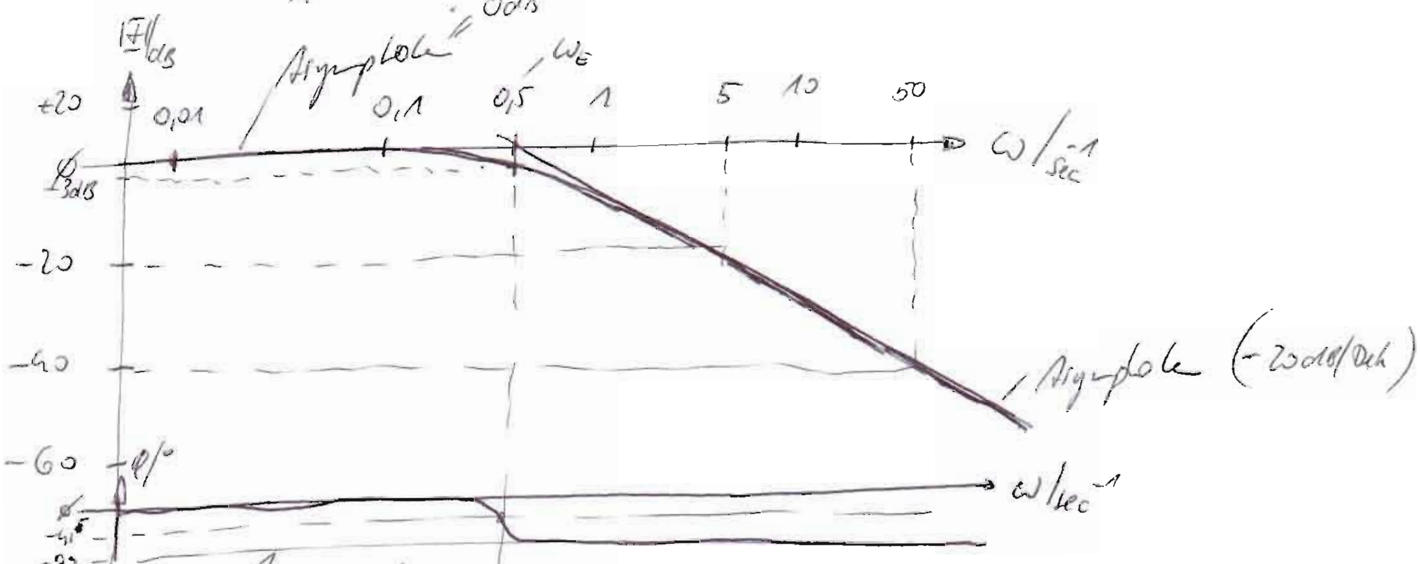
$$\underline{F} = \frac{1}{1 + j2w}$$

Wie groß ist die Eckfrequenz w_E?
Wie groß sind Betrag und Phase der Übertragungsfunktion bei der Eckfrequenz?

$$\underline{F} = \frac{1}{1 + j\omega T_1} \Rightarrow T_1 = 2\,sec$$



$$\omega_E = \frac{1}{T_1} = 0.5\,sec^{-1}$$



$$\omega_E = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{2\,sec} = 0,5\,sec^{-1}$$

Name: Kubinger	Personenkennzahl:	Datum: 2.3.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
$w_E = \frac{1}{T_1} = 0,5\,sec^{-1}$	$\lvert F\rvert(w_E) = \frac{1}{\sqrt{2}} = -3,0103\,dB \approx -3\,dB$	$\varphi(w_E) = -45°$

Beispiel 4-6: Bitte skizzieren Sie maßstäblich das Bode-Diagramm des folgenden T_2-Gliedes (bitte beschriften Sie auch die Achsen korrekt).

$$\underline{F} = \frac{1}{1 - 4w^2 + j4w}$$

Wie groß sind die Eckfrequenz w_E und die Dämpfung D?
Wie groß sind Betrag und Phase der Übertragungsfunktion bei der Eckfrequenz?

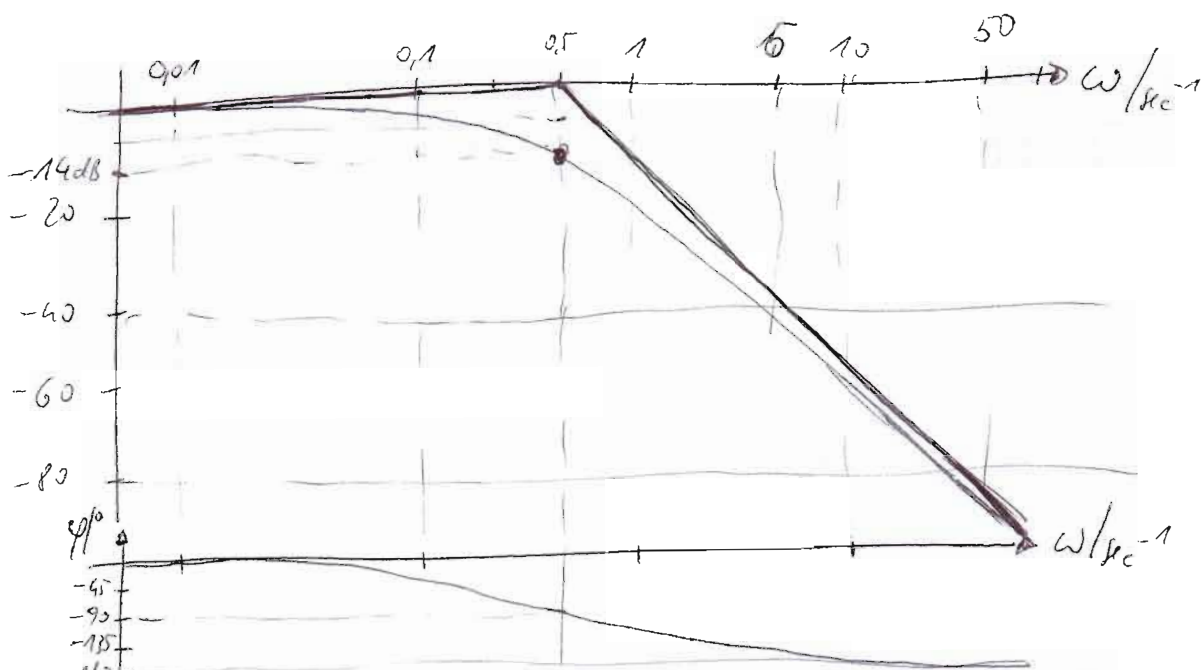
$$\underline{F} = \frac{1}{1-(\omega T_2)^2 + j\omega T_1} \Rightarrow \quad T_1 = 4 \quad T_2 = 2$$

$$|\underline{F}|_{\omega=\omega_E} = \frac{T_2}{T_1} = 0{,}5 \mathrel{\hat{=}} -13{,}8\,dB$$

$$\omega_E = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{2\,sec} = 0{,}5\,sec^{-1}$$

$$\varphi_{\omega=\omega_E} = -90^\circ$$

$$D = \frac{T_1}{2 \cdot T_2} = \frac{4}{2 \cdot 2} = 1$$



Name: Kubinger	Personenkennzahl:	Datum: 2.5.'0?
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
$w_E = \frac{1}{T_2} = 0{,}5\,sec^{-1}$ $D = \frac{T_1}{2T_2} = 1$	$\lvert F\rvert(w_E) = \frac{T_2}{T_1} = 0{,}5 \mathrel{\hat{=}} -13{,}8\,dB$	$\varphi(w_E) = -90^\circ$

Mess- und Regelungstechnik

Studieneinheit 6

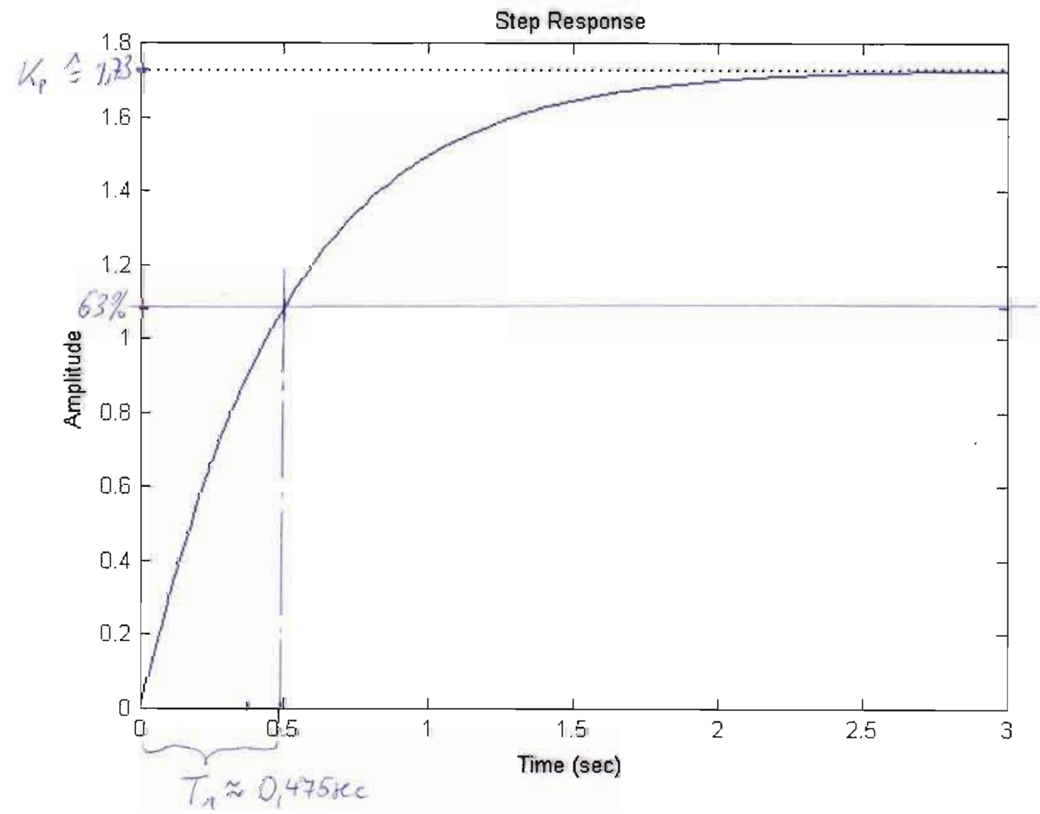
Rechenübungen zum Thema

Verbindungsmöglichkeiten von Regelkreisgliedern

Dr. Wilfried Kubinger
SS 2009

18.3.'09, WK

Beispiel 6-1: Gegeben ist die Antwort eines Regelgliedes auf den Sprung der Eingangsgröße von $x_e=0$ auf $x_e=1$ zum Zeitpunkt t=0sec. Bitte bestimmen Sie den Typus des Grundgliedes, geben Sie die komplexe Übertragungsfunktion an und bestimmen Sie die charakteristischen Parameter aus der Sprungantwort.



Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 18.3.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
$\underline{F}= \frac{1{,}73}{1+j\omega 0{,}475}$	Charakteristische Parameter: $K_p=1{,}73$; $T_1=0{,}475sec$	Typus = $P\text{-}T_1$

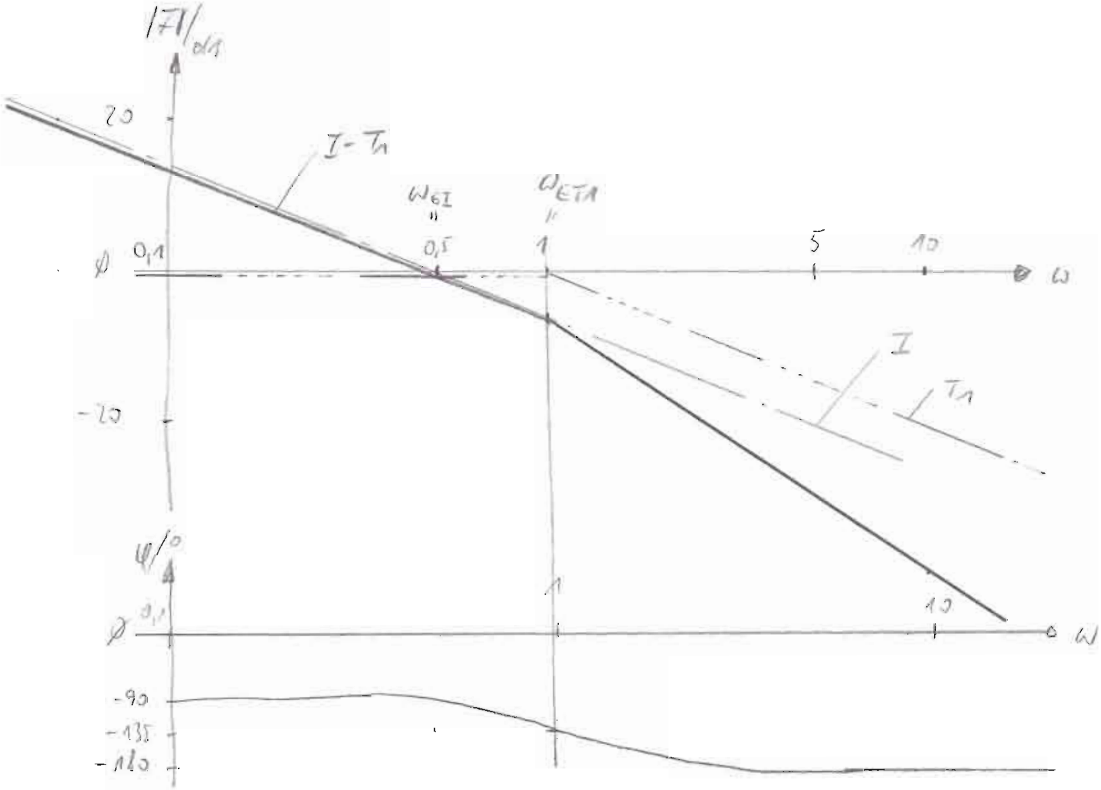
Beispiel 6-2: Bitte zeichnen Sie das Bode-Diagramm für das folgende System. Bestimmen Sie den Typus des Grundgliedes und geben Sie die charakteristischen Parameter an.

$$\underline{F} = \frac{1}{2j\omega(1+j\omega)}$$

$$I\text{-}T_1: \underline{F} = \frac{K_I}{j\omega(1+j\omega T_1)}$$

$$\Rightarrow K_I = \frac{1}{2} = 0{,}5\,sec^{-1} \qquad W_{ET1} = \frac{1}{T_1} = 1\,sec^{-1}$$

$$T_1 = 1\,sec \qquad W_{EI} = K_I = 0{,}5\,sec^{-1}$$



Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 18.5.09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
Charakteristische Parameter: $T_1 = 1\,sec;\ K_I = 0{,}5\,sec^{-1}$	Typus = $I\text{-}T_1$	

Beispiel 6-3: Bitte berechnen Sie die komplexe Übertragungsfunktion einer Reihenschaltung der folgenden drei Regelungsglieder.

$$\underline{F}_1 = 3 \qquad \underline{F}_2 = j5\omega \qquad \underline{F}_3 = \frac{1}{1+2j\omega}$$

$$\underline{F} = \underline{F}_1 \cdot \underline{F}_2 \cdot \underline{F}_3 = 3 \cdot j5\omega \cdot \frac{1}{1+2j\omega} =$$

$$= j15\omega \cdot \frac{1}{1+2j\omega} =$$

$$= \frac{j15\omega}{1+2j\omega}$$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 18.3.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
$\underline{F} = \frac{j15\omega}{1+2j\omega}$		

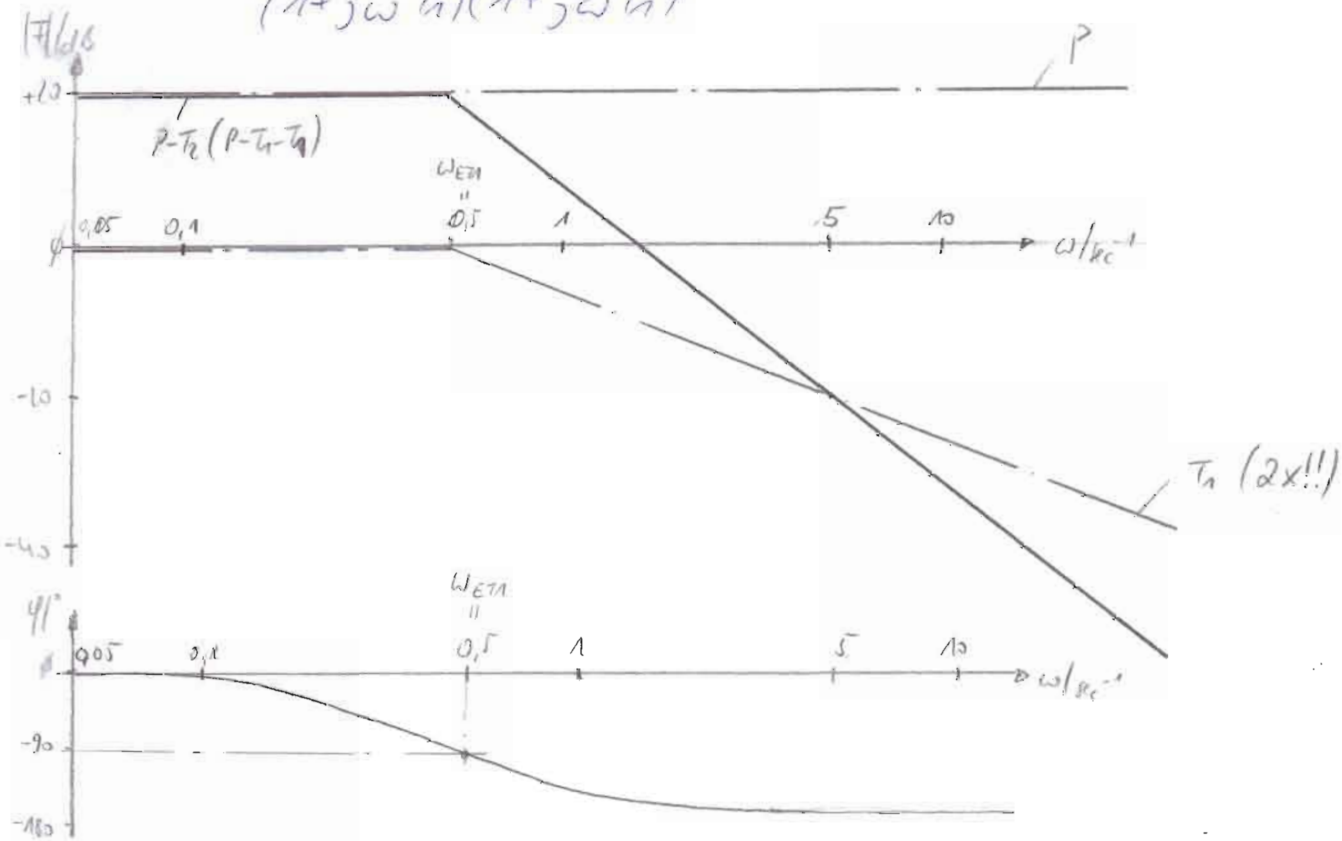
Beispiel 6-4: Bitte zeichnen Sie das Bode-Diagramm für das folgende System. Bestimmen Sie den Typus des Grundgliedes und geben Sie die charakteristischen Parameter an.

P-T_1-T_1-Typ / P-T_2

$$\underline{F} = \frac{10}{(1+2j\omega)(1+2j\omega)} = \frac{K_P}{(1+j\omega T_1)(1+j\omega T_1)}$$

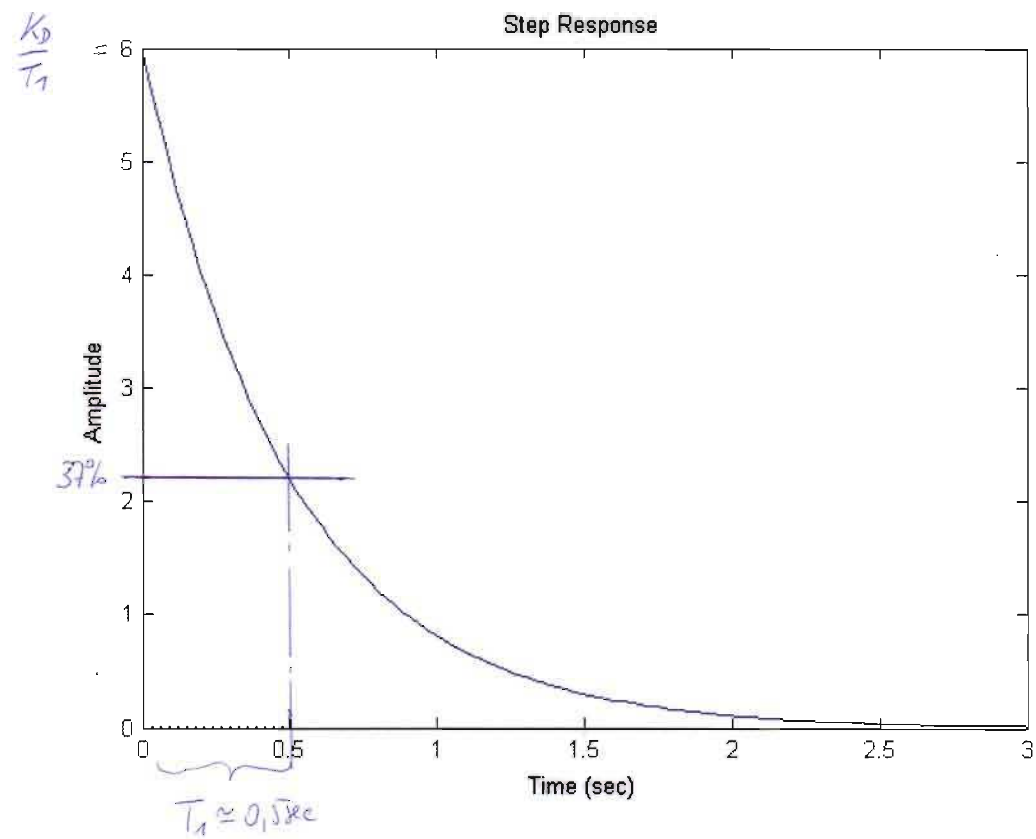
$K_P = 10$

$T_1 = 2 \quad = \omega_{ET1} = 0{,}5\,\text{sec}^{-1}$



Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 18.3.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
Charakteristische Parameter: $K_P = 10$; $T_1 = 2$ sec	Typus = P-T_2 bzw. P-T_1-T_1	

Beispiel 6-5: Gegeben ist die Antwort eines Regelgliedes auf den Sprung der Eingangsgröße von $x_e=0$ auf $x_e=1$ zum Zeitpunkt t=0sec. Bitte bestimmen Sie den Typus des Grundgliedes, geben Sie die komplexe Übertragungsfunktion an und bestimmen Sie die charakteristischen Parameter aus der Sprungantwort.



$$\frac{K_D}{T_1} = 6 \;, \text{ mit } T_1 = 0{,}5sec \Rightarrow K_D = 6 \cdot T_1 = 3sec$$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 18.3.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 0
$\underline{F}$= $\frac{j\omega 3}{1+j\omega 0{,}5}$	Charakteristische Parameter: $K_D = 3sec$; $T_1 = 0{,}5sec$	Typus = $D-T_1$

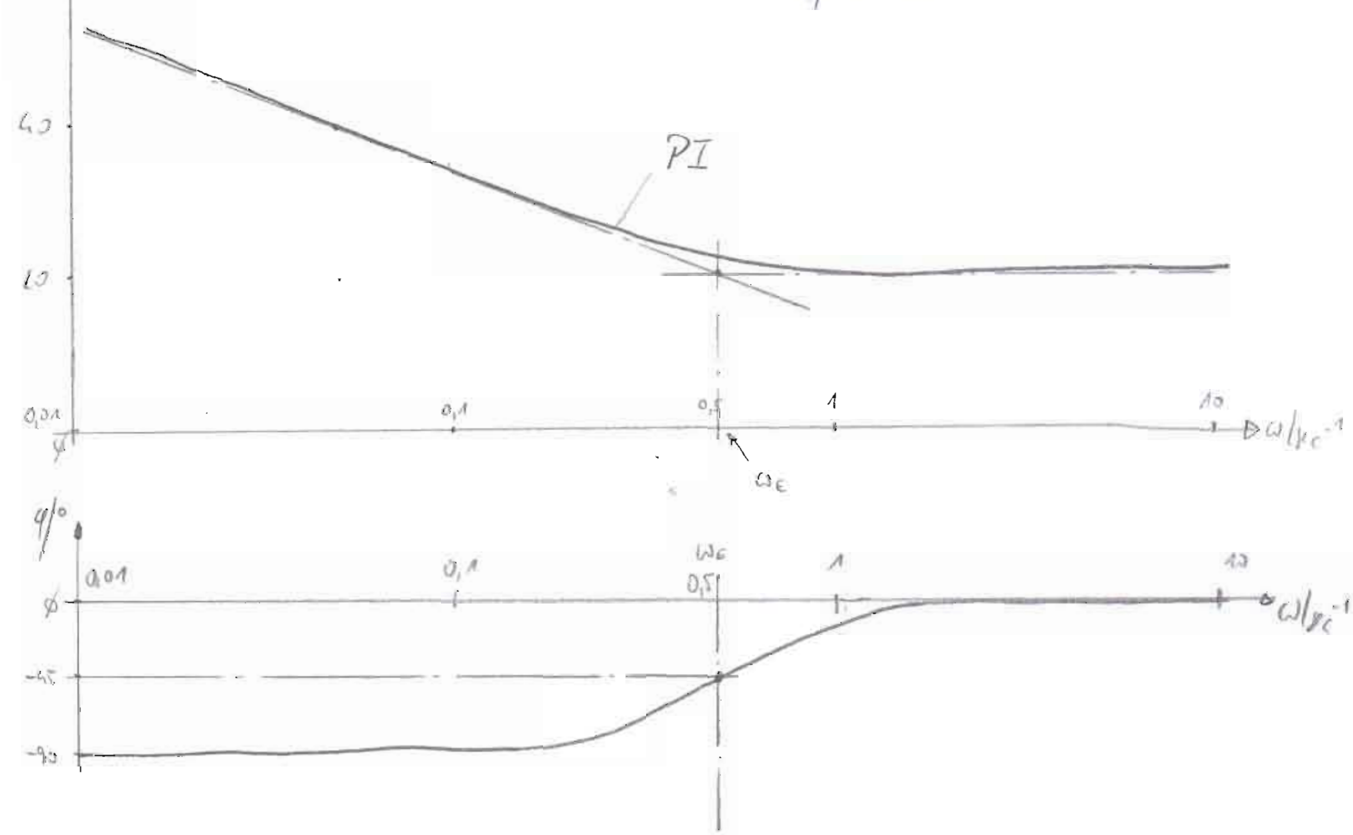
Beispiel 6-6: Bitte zeichnen Sie das Bode-Diagramm für das folgende System. Bestimmen Sie den Typus des Grundgliedes und geben Sie die charakteristischen Parameter an.

$$\underline{F} = 10 \cdot (1 - \frac{j}{2\omega})$$

PI- Glied

$$= K_p \cdot \left(1 - j\frac{1}{\omega T_N}\right) \quad \text{mit } \omega_E = \frac{1}{T_N} = 0{,}5\,sec^{-1}$$

$K_p = 10$



Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 18.3.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
Charakteristische Parameter: $K_p = 10$; $T_N = 2\,sec$; $\omega_E = 0{,}5\,sec^{-1}$	Typus = PI-Glied	

Beispiel 6-7: Bitte berechnen Sie die komplexe Übertragungsfunktion einer Parallelschaltung der folgenden drei Regelungsglieder.

$$\underline{F}_1 = 10 \qquad \underline{F}_2 = -j\frac{2}{\omega} \qquad \underline{F}_3 = j\omega$$

$$\underline{F} = \underline{F}_1 + \underline{F}_2 + \underline{F}_3 = 10 - j\frac{2}{\omega} + j\omega$$

$$= 10 + j\left(\omega - \frac{2}{\omega}\right) =$$

$$= 10 + j\left(\frac{\omega^2 - 2}{\omega}\right)$$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 12.5.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
$\underline{F}$= $10 - j\left(\frac{\omega^2-2}{\omega}\right)$		

Beispiel 6-8: Bitte zeichnen Sie das Bode-Diagramm für das folgende System. Bestimmen Sie den Typus des Grundgliedes und geben Sie die charakteristischen Parameter an.

$$\underline{F} = 10 + j(5\omega - \frac{5}{\omega})$$

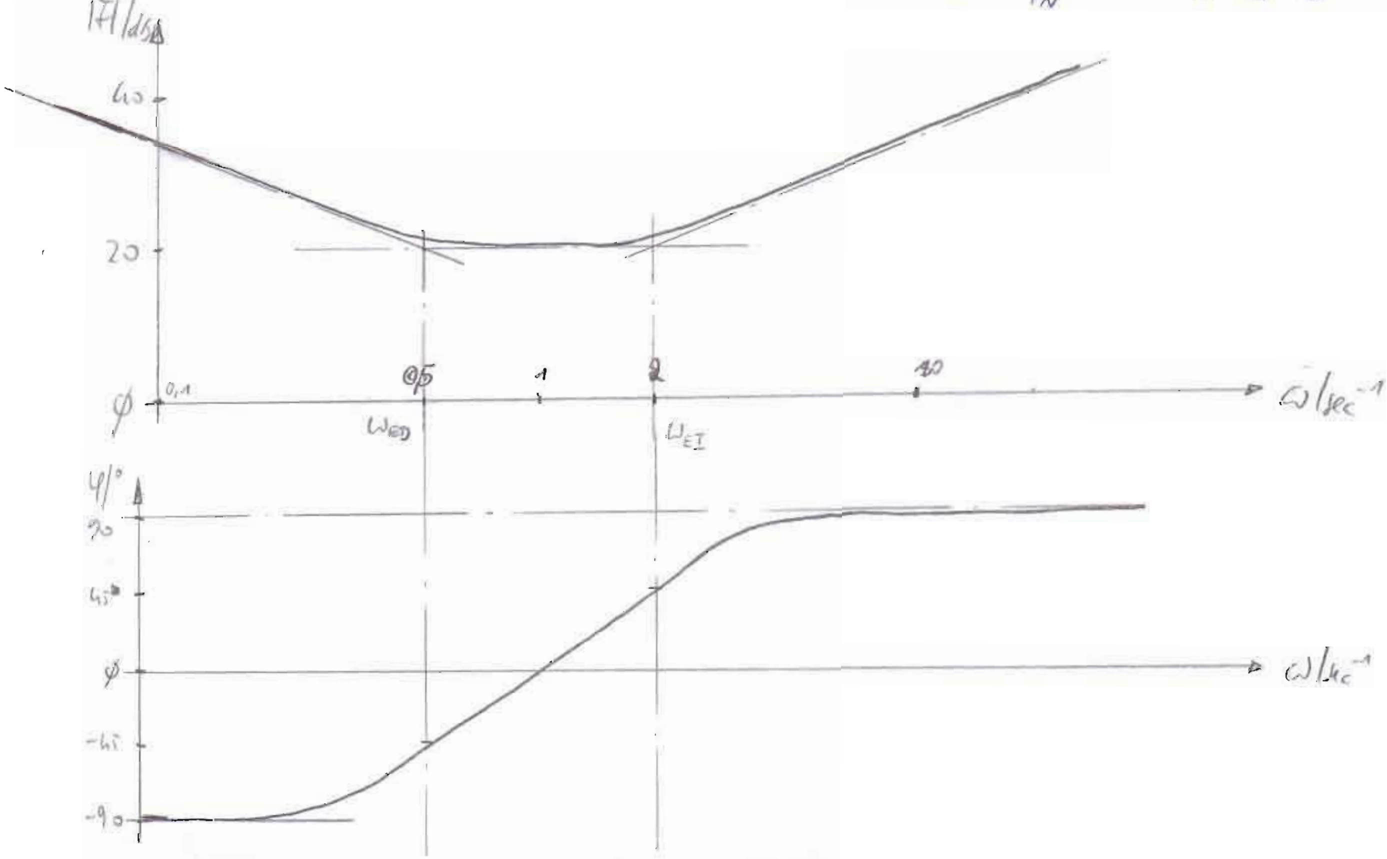
PID- Glied

$$\underline{F} = K_P \cdot \left(1 + j\left(\omega T_V - \frac{1}{\omega T_N}\right)\right) =$$

$$= 10 \cdot \left(1 + j\left(\frac{\omega}{2} - \frac{1}{2\omega}\right)\right) \Rightarrow$$

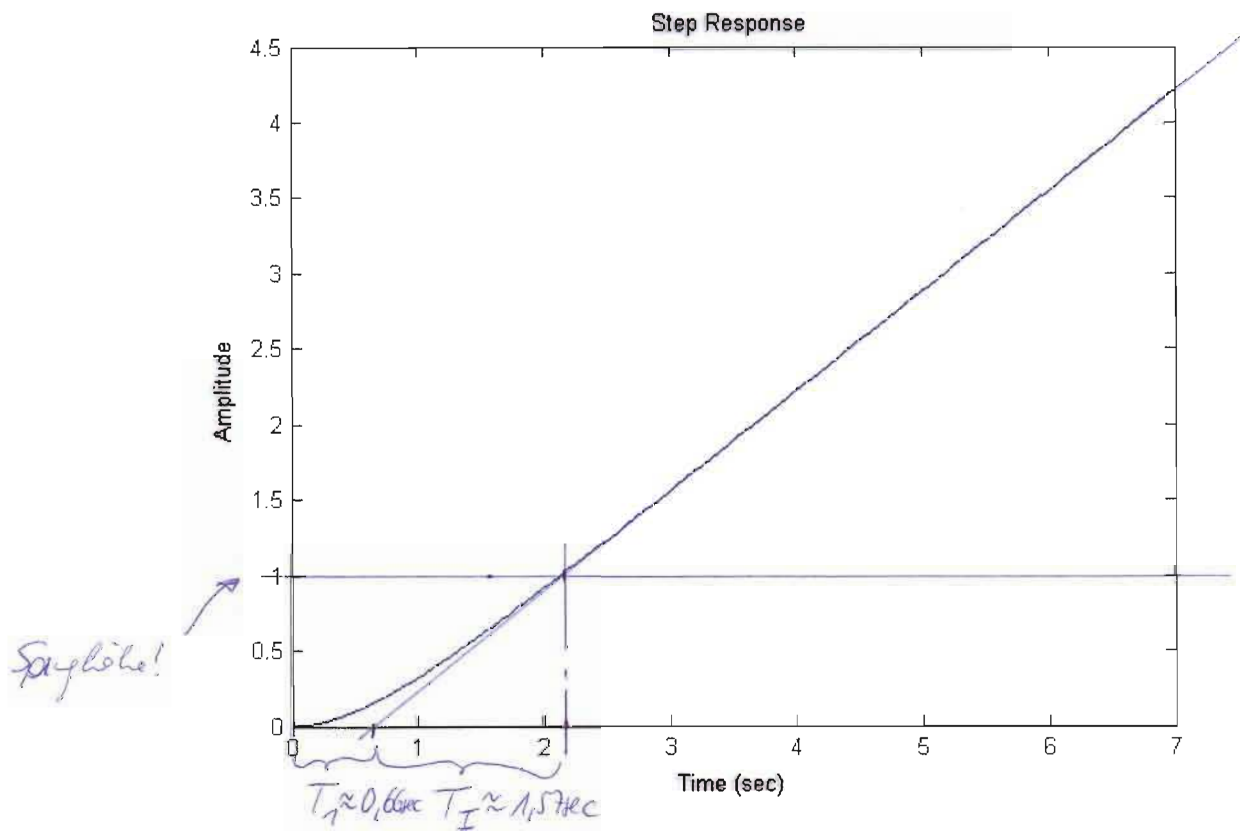
$K_P = 10$; $T_V = 0{,}5\,sec$; $T_N = 2\,sec$

$\omega_{EI} = \frac{1}{T_N} = 0{,}5\,sec^{-1}$; $\omega_{ED} = \frac{1}{T_V} = 2\,sec^{-1}$



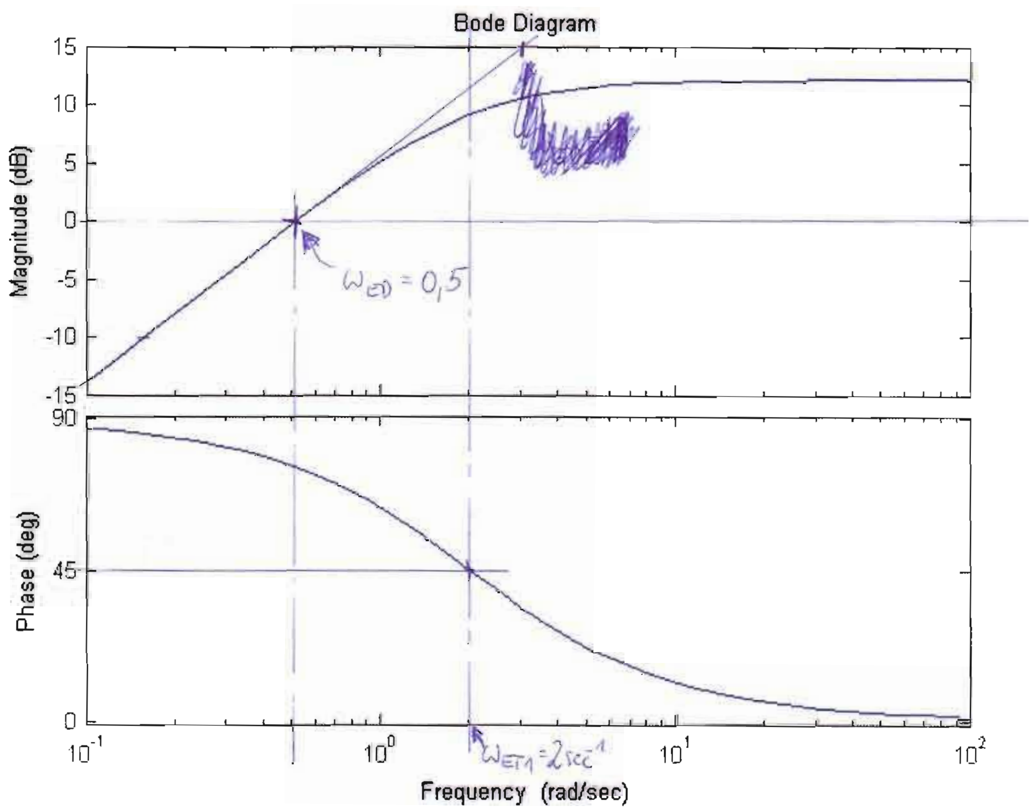
Name: KUSINGER	Personenkennzahl:	Datum: 18.3.09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
Charakteristische Parameter: $K_P = 10$; $T_V = 0{,}5\,sec$; $T_N = 2\,sec$; $\omega_{EI} = 0{,}5\,sec^{-1}$; $\omega_{ED} = 2\,sec^{-1}$	Typus = PID	

Beispiel 6-9: Gegeben ist die Antwort eines Regelgliedes auf den Sprung der Eingangsgröße von x_e=0 auf x_e=1 zum Zeitpunkt t=0sec. Bitte bestimmen Sie den Typus des Grundgliedes, geben Sie die komplexe Übertragungsfunktion an und bestimmen Sie die charakteristischen Parameter aus der Sprungantwort.



Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 18.5.09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
$\underline{F}= \frac{1}{j\omega T_I\cdot(1+j\omega T_1)} = \frac{1}{j\omega 1{,}57(1+j\omega 0{,}66)}$	Charakteristische Parameter: $T_1 \approx 0,66sec$; $T_I \approx 1,57sec$	Typus = I-T_1

Beispiel 6-10: Ein Übertragungsglied hat das folgende Bode-Diagramm. Um welchen Typus handelt es sich? Bitte geben Sie die zugehörige komplexe Übertragungsfunktion an und bestimmen Sie die charakteristischen Parameter aus dem Bode-Diagramm.



$$\omega_{ET1} = \frac{1}{T_1} = 2\,sec^{-1} \Rightarrow T_1 = 0{,}5\,sec$$

$$\omega_{ED} = \frac{1}{K_D} = 0{,}5\,sec^{-1} \rightarrow K_D = 2\,sec$$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 18.3.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
F= $\frac{j\omega K_D}{1+j\omega T_1} = \frac{j2\omega}{1+j\omega 0{,}5}$	Charakteristische Parameter: $T_1 = 0{,}5\,sec;\ K_D = 2\,sec$	Typus = D-T_1

Mess- und Regelungstechnik

Studieneinheit SE8

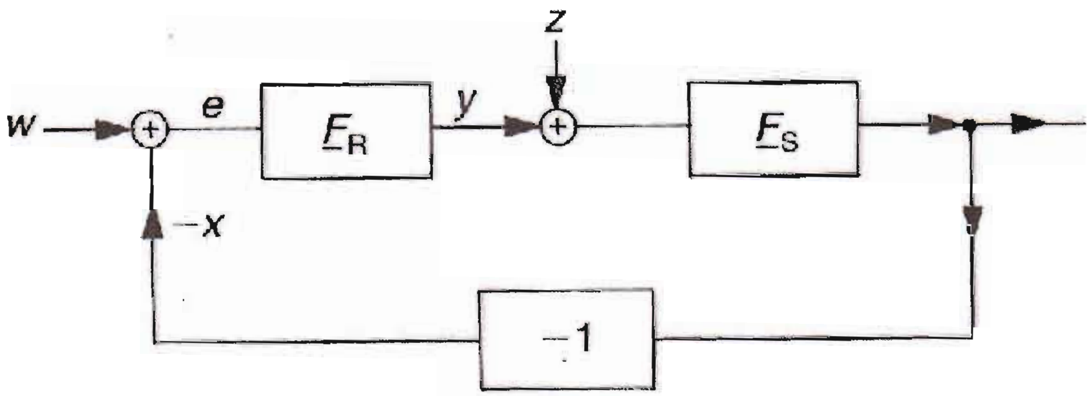
Rechenübungen zum Thema

Gruppenschaltungen
Der Regelkreis

Dr. Wilfried Kubinger
SS 2009

V3.4.'09, WK

Beispiel 8-1: Bitte berechnen Sie das Führungsverhalten des folgenden Regelkreises.



$$F_R = 10 + \frac{1}{2jw} \qquad F_S = \frac{5}{(1+jw)(1+jw)}$$

Wird eine sprungförmige Änderung der Führungsgröße vollständig ausgeregelt? Wie groß ist die bleibende Regeldifferenz e_b?

$$F_W = \frac{F_R \cdot F_S}{1 + F_R \cdot F_S} = \frac{\frac{(1+20j\omega)}{2j\omega} \cdot \frac{5}{(1+j\omega)^2}}{1 + \frac{(1+20j\omega)}{2j\omega} \cdot \frac{5}{(1+j\omega)^2}} =$$

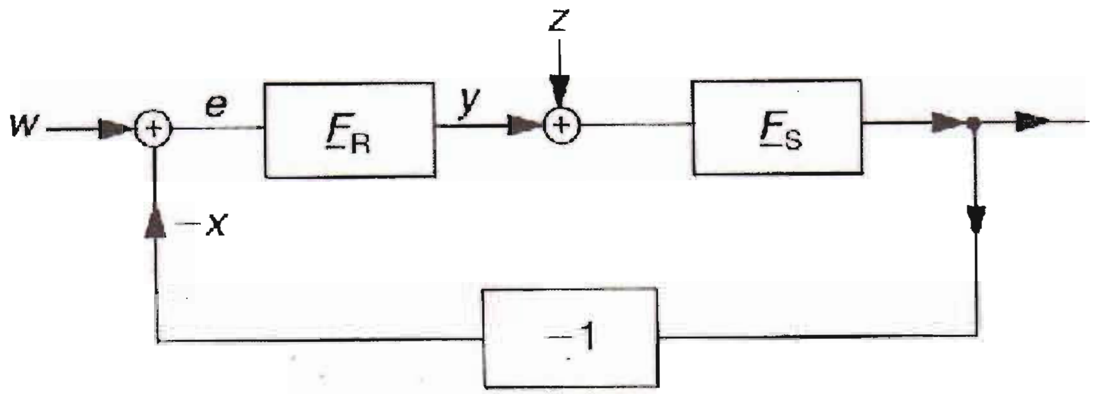
$$= \frac{5 \cdot (1+20j\omega)}{2j\omega \cdot (1+j\omega)^2 + 5 \cdot (1+20j\omega)} = \frac{5+100j\omega}{5+100j\omega + 2j\omega(1+2j\omega-\omega^2)} =$$

$$= \frac{5+100j\omega}{5+100j\omega + 2j\omega - 4\omega^2 - 2j\omega^3} = \frac{5+100j\omega}{5-4\omega^2 + j(102\omega - 2\omega^3)}$$

$$F_W\Big|_{\omega \to 0,\, t \to \infty} = \frac{5}{5} = 1$$ ✓ vollständig ausgeregelt, da nach dem Einschwingvorgang $\omega = x$ ist $\Rightarrow e_b = \omega - x = \varnothing$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 3.4.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: $\varnothing$
$F_w = \frac{5+100j\omega}{5-4\omega^2+j(102\omega-2\omega^3)}$	Änderung der Führungsgröße vollständig ausgeregelt (J/N)? JA	$e_b = \varnothing$

Beispiel 8-2: Bitte berechnen Sie das Störverhalten des folgenden Regelkreises.



$$F_R = 10 + \frac{1}{2jw} \qquad F_S = \frac{5}{(1+jw)(1+jw)}$$

Wird eine sprungförmige Änderung der Störgröße vollständig ausgeregelt? Wie groß ist die bleibende Regeldifferenz e_b?

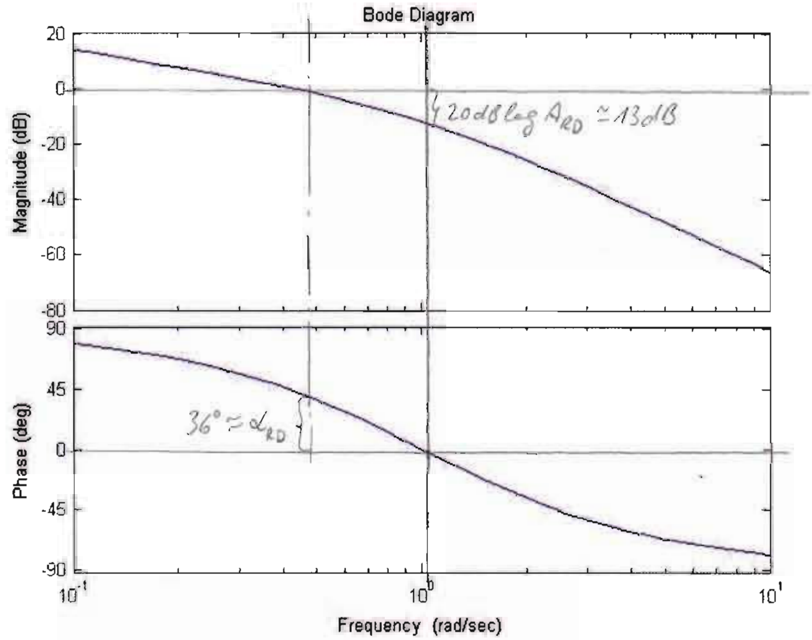
$$\underline{F}_z = \frac{\underline{F}_S}{1 + \underline{F}_R \cdot \underline{F}_S} = \frac{\frac{5}{(1+2j\omega-\omega^2)}}{1 + \frac{(1+20j\omega)}{2j\omega} \cdot \frac{5}{(1+2j\omega-\omega^2)}} = \frac{\frac{5 \cdot 2j\omega}{(1+2j\omega-\omega^2) \cdot 2j\omega}}{\frac{2j\omega(1+2j\omega-\omega^2) + (1+20j\omega) \cdot 5}{\cancel{\ }}} =$$

$$= \frac{5 \cdot 2j\omega}{5 + 100j\omega + 2j\omega - 4\omega^2 - 2j\omega^3} = \frac{10j\omega}{5 - 4\omega^2 + j(102\omega - 2\omega^3)}$$

$\underline{F}_z\big|_{\omega \to 0,\, t \to \infty} \to \emptyset$ d.h. nach Ende des Einschwingvorgangs wird jener Teil von x, der durch die Störung verursacht wurde, vollständig verschwinden!
$\Rightarrow e_b = w - x = \emptyset$ es gibt keine bleibende Regelabweichung!

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 3.4.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: $\emptyset$
$F_z = \frac{10j\omega}{5-4\omega^2+j(102\omega-2\omega^3)}$	Änderung der Störung vollständig ausgeregelt (J/N)? JA	$e_b = \emptyset$

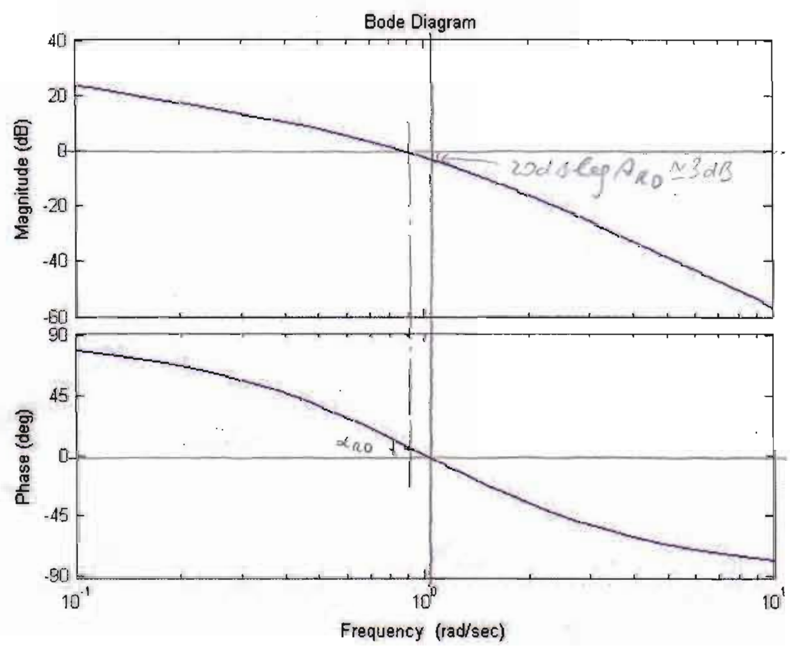
Beispiel 8-3: Bitte geben Sie bei den folgenden drei Systemen, bei denen die Übertragungsfunktion der offenen Schleife $F_O = -F_R{}^*F_S$ als Bode-Diagramm gegeben ist, an, ob sie stabil oder instabil sind. Wie groß ist bei den stabilen Systeme der Amplituden- und der Phasenrand?



STABIL

$A_{RD} \simeq 4{,}5$

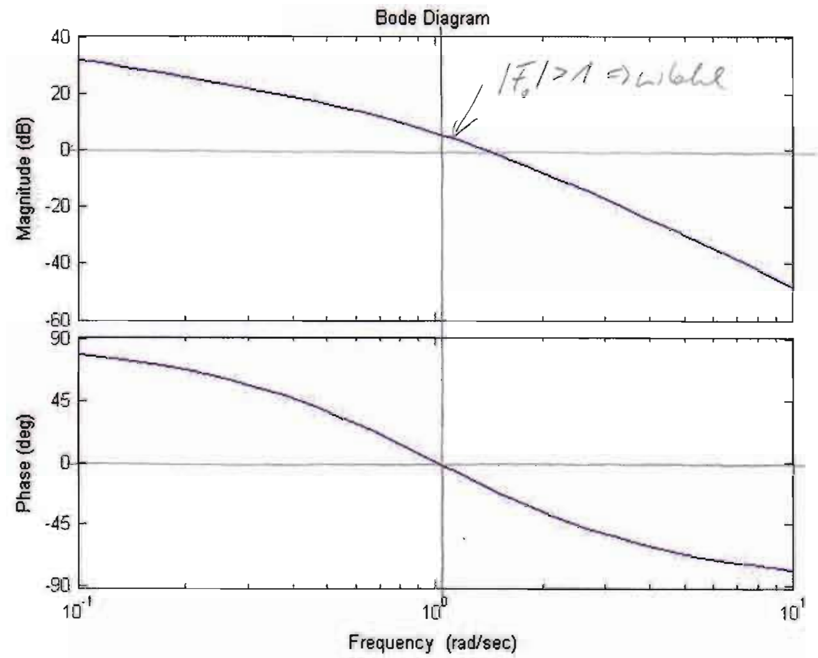
$\alpha_{RD} \simeq 36°$



STABIL

$A_{RD} \simeq 1{,}41$

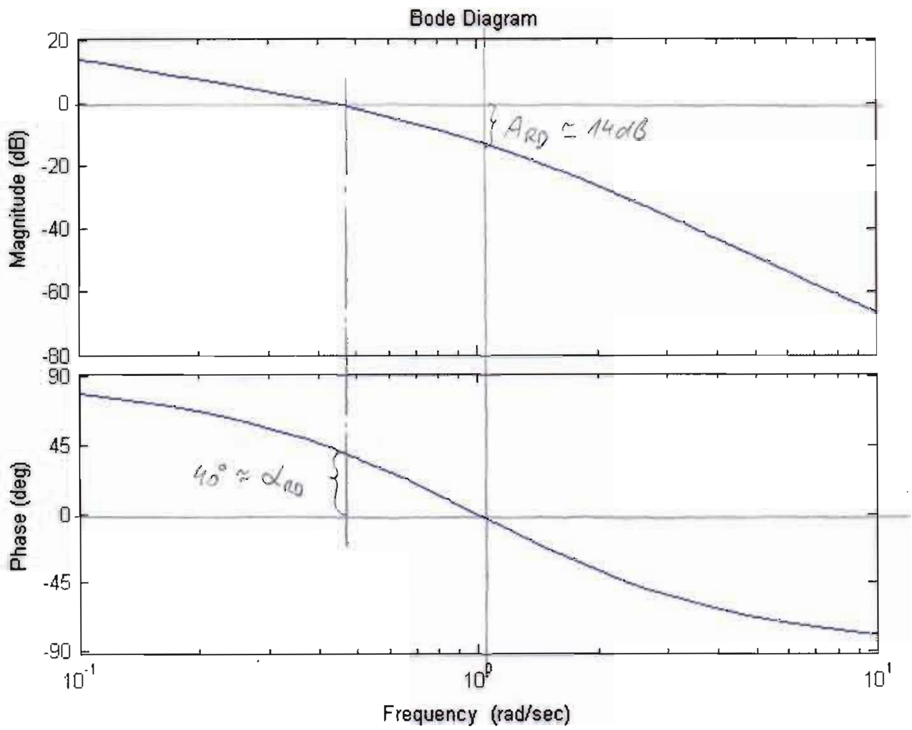
$\alpha_{RD} \simeq 6°$



INSTABIL

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 3.4.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: /
Der Regelkreis 1 ist stabil $A_{R0} \approx 4{,}5$ $\alpha_{R0} \approx 36°$	Der Regelkreis 2 ist stabil $A_{R0} \approx 1{,}41$ $\alpha_{R0} \approx 6$	Der Regelkreis 3 ist instabil

Beispiel 8-4: Bitte bestimmen Sie den Amplituden und den Phasenrand aus dem folgenden Bode-Diagramm.



$$A_{RD}/_{dB} = 20\,dB \log A_{RD} \Rightarrow A_{RD} = 10^{\frac{A_{RD}/dB}{20}} = 10^{\frac{13}{20}} \approx 4{,}5$$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 3.4.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
Amplitudenrand A_{RD}= 4,5	Phasenrand α_{RD}= 40°	

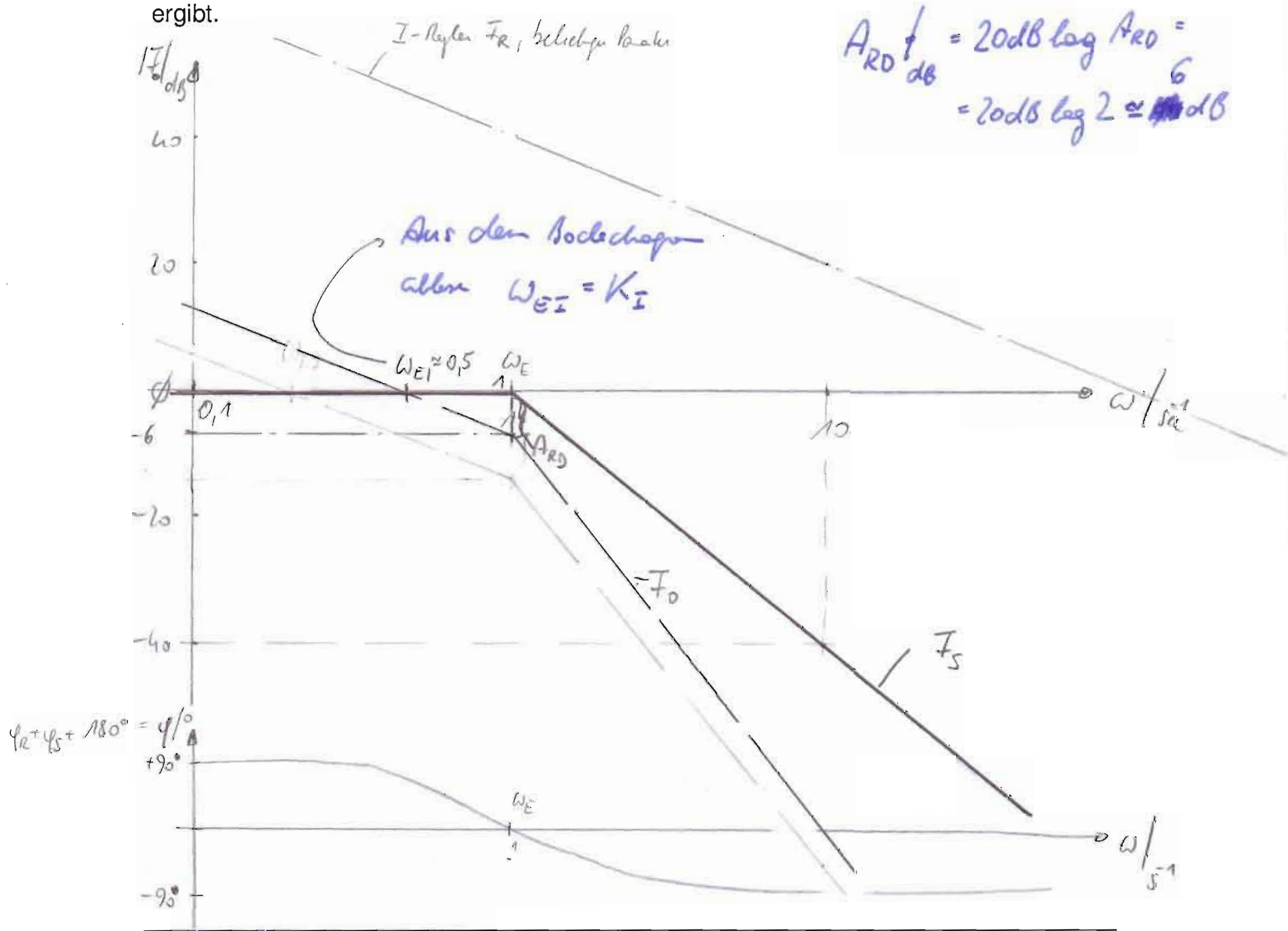
Beispiel 8-5: Bitte dimensionieren Sie den Parameter K_I des I-Reglers derart, dass sich ein Amplitudenrand von A_{RD}=2 für die Stabilitätsgüte des Standardregelkreises bestehend aus

$$F_R = \frac{K_I}{jw} \qquad F_S = \frac{1}{(1+jw)(1+jw)}$$

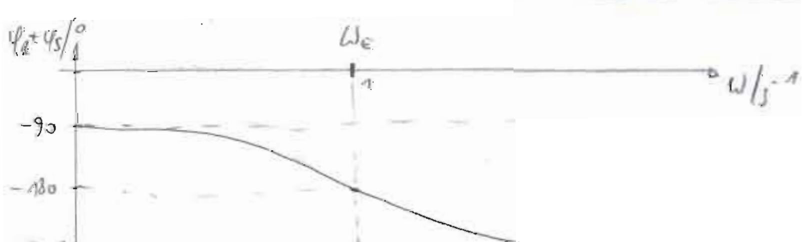
$\underline{F}_0 = -\underline{F}_R \cdot \underline{F}_S$

ergibt.

$A_{RD}|_{dB} = 20dB \log A_{RD} = 20dB \log 2 \approx 6 dB$



Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 3.4.2007
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
K_I= $\omega_{EI} \approx 0{,}5 sec^{-1}$		



Beispiel 8-6: Bitte bestimmen Sie für die im Folgenden angegebene Übertragungsfunktion G(s) die Pole und die Nullstellen in der komplexen s-Ebene, zeichnen Sie sie ein und geben Sie an, ob G(s) einen stabilen, instabilen oder grenzstabilen Regelkreis darstellt.

$$G(s) = \frac{s-2}{s(s+1)(s+2)(s-3)}$$

Nullstellen $s_{N1} = 2$

Polstellen: $s_{P1} = \emptyset$

$s_{P2} = -1$

$s_{P3} = -2$

$s_{P4} = +3$ rechte Halbebene $\Rightarrow$ instabil

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 3.4.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
Pole: Ø, -1, -2, +3	Nullstellen: 2	Stabilitätsart: instabil

Beispiel 8-7: Bitte bestimmen Sie für die im Folgenden angegebene Übertragungsfunktion G(s) die Pole und die Nullstellen in der komplexen s-Ebene, zeichnen Sie sie ein und geben Sie an, ob G(s) einen stabilen, instabilen oder grenzstabilen Regelkreis darstellt.

$$G(s) = \frac{s+1}{s^2 + 2s + 10}$$

Nullstellen:

$s_{N1} = -1$

Polstellen:

$s^2 + 2s + 10 = \emptyset$

$s_{1,2} = -1 \pm \sqrt{1^2 - 10} = -1 \pm j\sqrt{9} = -1 \pm j3$

$\Rightarrow s_{P1} = -1 + j3$

$s_{P2} = -1 - j3$

Alle Pole in der li. s-Halbebene $\Rightarrow$ stabil

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 3.5.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: $\emptyset$
Pole: $-1+j3,\ -1-j3$	Nullstellen: -1	Stabilitätsart: stabil

Beispiel 8-8: Bitte bestimmen Sie für die im Folgenden angegebene Übertragungsfunktion G(s) die Pole und die Nullstellen in der komplexen s-Ebene, zeichnen Sie sie ein und geben Sie an, ob G(s) einen stabilen, instabilen oder grenzstabilen Regelkreis darstellt.

$$G(s) = \frac{s+1}{(s+1)(s+2)(s+3)}$$

Nullstelle: $s_{n1} = -1$

Polstelle: $s_{p1} = -1$

$s_{p2} = -2$

$s_{p3} = -3$

Hinweis: 1 Pol- und eine Nullstelle kompensieren sich

$\Rightarrow$ $s_{p1} = -2$

$s_{p2} = -3$

Kein Pol in der rechten s-Halbebene $\Rightarrow$ stabil

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 3.5.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
Pole: -2, -3	Nullstellen: /	Stabilitätsart: stabil

Beispiel 8-9: Bitte zeichnen Sie das Bode-Diagramm für das folgende System. Bestimmen Sie den Typus des Grundgliedes und geben Sie die charakteristischen Parameter an.

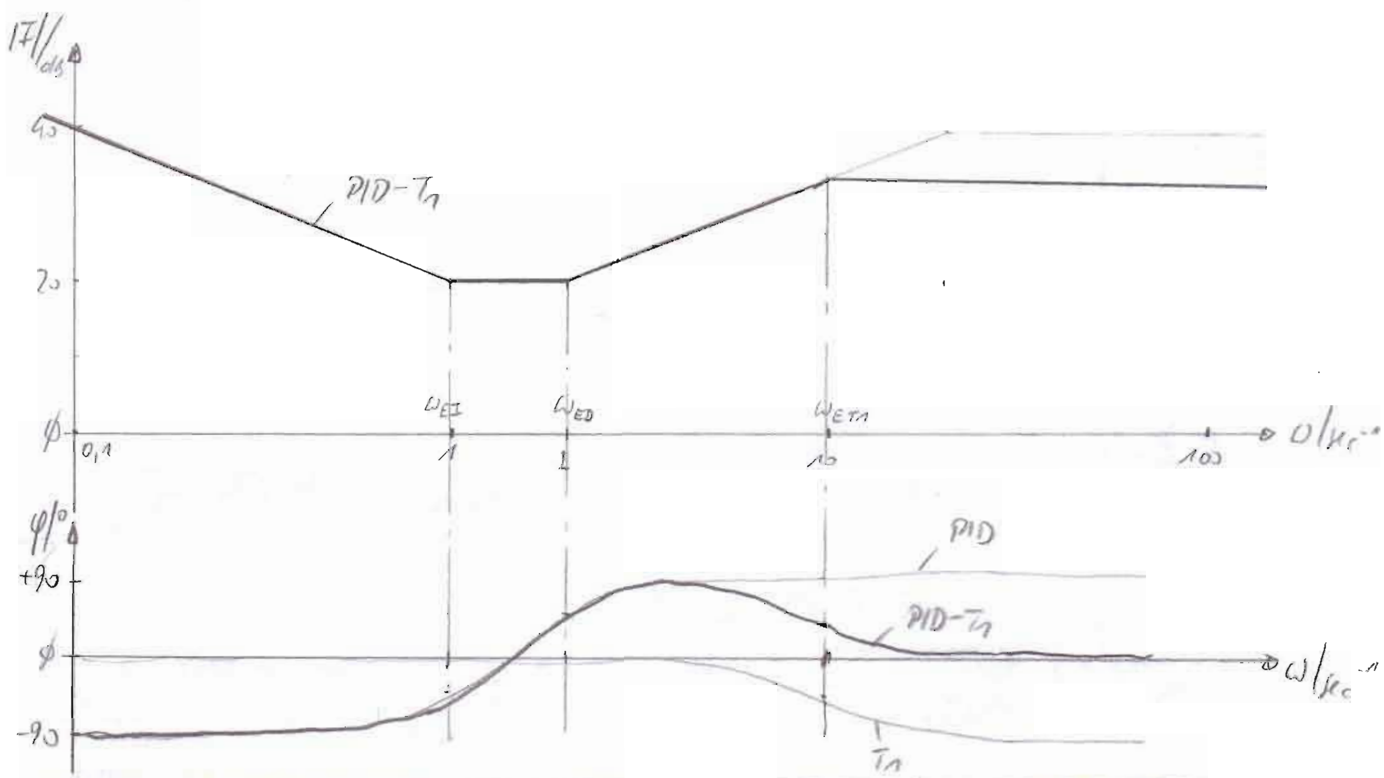
$$\underline{F} = 10 \frac{1 + jw0{,}5 + \frac{1}{jw}}{1 + jw0{,}1}$$

PID-T_1

$$\underline{F} = K_P \cdot \left(\frac{1 + \frac{1}{j\omega T_N} + j\omega T_V}{1 + j\omega T_1} \right)$$

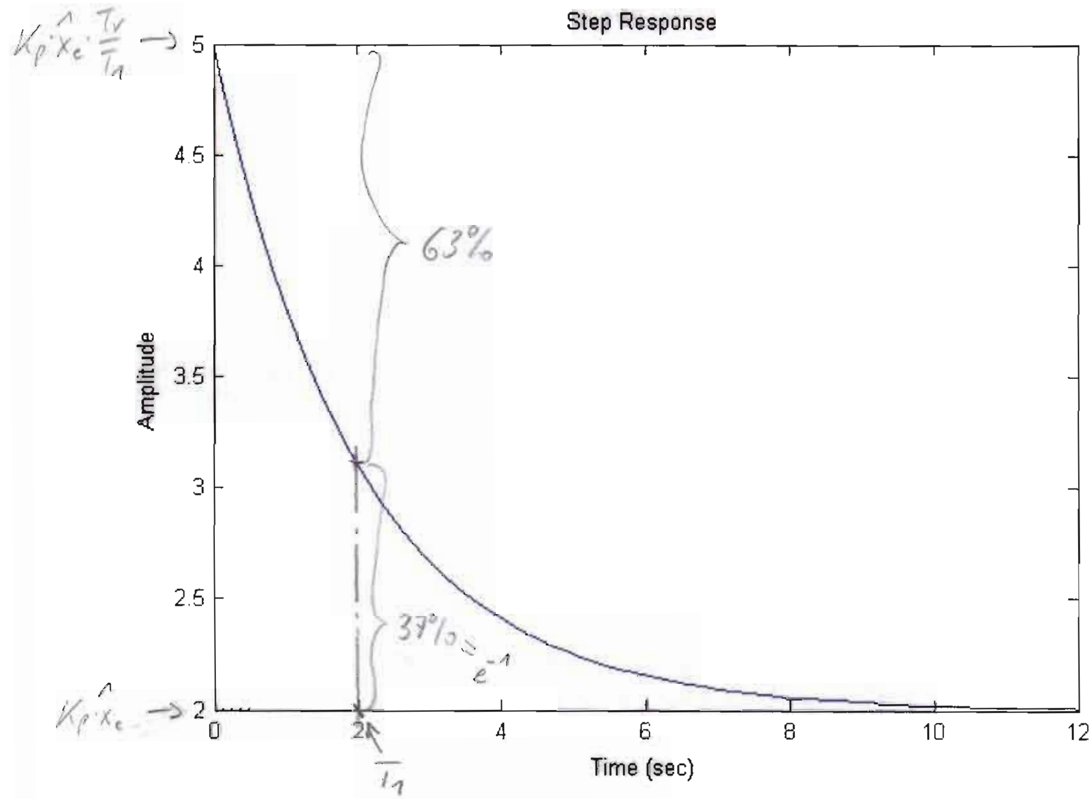
Parametervergleich $K_P = 10$; $T_N = 1sec$; $T_V = 0{,}5sec$; $T_1 = 0{,}1sec$

Eckfrequenzen: $\omega_{EI} = \frac{1}{T_N} = 1sec^{-1}$; $\omega_{ED} = \frac{1}{T_V} = 2sec^{-1}$; $\omega_{ET1} = \frac{1}{T_1} = 10sec^{-1}$



Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 3.4.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
Charakteristische Parameter: $K_P = 10$; $T_N = 1sec$; $T_V = 0{,}5sec$; $T_1 = 0{,}1sec$	Typus = PID-T_1	

Beispiel 8-10: Bitte bestimmen Sie die komplexe Übertragungsfunktion aus der folgenden Sprungantwort und geben Sie die zugehörigen charakteristischen Parameter bzw. Kenngrößen an. Um welches Grundglied handelt es sich?



$K_p = 2$

$T_1 = 2sec$

$K_p \cdot 1 \cdot \frac{T_V}{T_1} = 5$

$\Rightarrow T_V = \frac{5 \cdot T_1}{K_p} = \frac{5 \cdot 2}{2} sec =$

$= 5 sec$

PD-T_1- Glied, Sprungantwort ist $\hat{x}_a = K_p \cdot \hat{x}_e \cdot \left[1 + \left(\frac{T_V}{T_1} - 1\right) e^{-\frac{t}{T_1}}\right]$

$\hat{x}_a \Big|_{t=0} = K_p \cdot \hat{x}_e \cdot \frac{T_V}{T_1}$; $\hat{x}_a \Big|_{t \to \infty} = K_p \cdot \hat{x}_e$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 3.6.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
Charakteristische Parameter bzw. Kenngrößen: $K_p = 2$ $T_1 = 2sec$ $T_V = 5sec$	Typus = PD-T_1	

$F_W = K_p \cdot \frac{1 + j\omega T_V}{1 + j\omega T_1} = 2 \cdot \frac{1 + j\omega 5}{1 + j\omega}$

Mess- und Regelungstechnik

Studieneinheit 10

Rechenübungen zum Thema

Regelkreise mit stetigen Reglern

Dr. Wilfried Kubinger
SS 2009

√ 23.4.'09, WK

Beispiel 10-1: Gegeben sind die folgende Strecke F_S und der folgende Regler F_R

$$F_S = \frac{2}{1+3j\omega} \qquad F_R = 5$$

Bitte berechnen Sie die Führungs- und die Störübertragungsfunktion. Ist das System stabil?
Bitte bestimmen Sie weiters die bleibende Regeldifferenz e_b bei einer sprungförmigen Änderung der Führungsgröße von $\Delta w = 2$ sowie den Beharrungswert der Regelgröße bei einer sprungförmigen Änderung der Störgröße von $\Delta z = 3$.

$$F_W = \frac{F_R \cdot F_S}{1+F_R \cdot F_S} = \frac{\frac{10}{1+3j\omega}}{1+\frac{10}{1+3j\omega}} = \frac{10}{11+3j\omega} = \frac{x}{w}$$

$$F_W(\omega \to \emptyset) = \frac{10}{11} \Rightarrow \text{nicht stationär genau!!}$$

$$\varphi = \varphi_R + \varphi_S + 180° = \emptyset° + \emptyset \div 90° + 180° = \Rightarrow 180° \to 90° \text{ stabil } \checkmark$$

$$\Delta x = F_W \cdot \Delta w = \frac{10}{11} \cdot 2 = \frac{20}{11}$$

$$e_b = \Delta w - \Delta x = 2 - \frac{20}{11} = \frac{2}{11}$$

$$F_Z = \frac{F_S}{1+F_R \cdot F_S} = \frac{\frac{2}{1+3j\omega}}{1+\frac{10}{1+3j\omega}} = \frac{2}{10+1+3j\omega} = \frac{2}{11+3j\omega} = \frac{x}{z}$$

$$F_Z(\omega \to \emptyset) = \frac{2}{11} \Rightarrow \text{nicht stationär genau}$$

$$\Delta x = F_Z(\omega \to \emptyset) \cdot \Delta z = \frac{2}{11} \cdot 3 = \frac{6}{11}$$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 22.4.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: $\emptyset$
$F_w = \frac{10}{11+3j\omega}$	$F_z = \frac{2}{11+3j\omega}$	Stabil = J/N? JA
$e_b = 2/11$	$\Delta x = 6/11$	

Beispiel 10-2: Gegeben sind die folgende Strecke F_S und der folgende Regler F_R

$$F_S = \frac{10}{1+2j\omega} \qquad F_R = \frac{2}{j\omega}$$

Bitte berechnen Sie die Führungs- und die Störübertragungsfunktion. Wie groß ist die Dämpfung D und ist das System stabil?
Bitte bestimmen Sie weiters die bleibende Regeldifferenz e_b bei einer sprungförmigen Änderung der Führungsgröße von $\Delta w = 5$ sowie den Beharrungswert der Regelgröße bei einer sprungförmigen Änderung der Störgröße von $\Delta z = 2$.

$$\underline{F}_w = \frac{F_R \cdot F_S}{1+F_R \cdot F_S} = \frac{\frac{20}{j\omega(1+2j\omega)}}{1+\frac{20}{j\omega(1+2j\omega)}} = \frac{20}{20+j\omega(1+2j\omega)} = \frac{20}{20-2\omega^2+j\omega} = \frac{1}{1-\frac{1}{10}\omega^2+j\omega\frac{1}{20}}$$

$\underline{F}_w(\omega \to \emptyset) = 1 \Rightarrow$ stationär genau, d.h. $e_b = w - x = \emptyset$

$$\underline{F}_z = \frac{F_S}{1+F_R \cdot F_S} = \frac{\frac{10}{1+2j\omega}}{1+\frac{20}{j\omega(1+2j\omega)}} = \frac{10j\omega}{20+j\omega(1+2j\omega)} = \frac{10j\omega}{20-2\omega^2+j\omega\cdot 1}$$

$\underline{F}_z(\omega \to \emptyset) = \emptyset \Rightarrow$ stationär genau, d.h. $\Delta x = \emptyset$

$$D = \frac{T_1}{2T_2} = \frac{1/20}{2\cdot\sqrt{\frac{1}{10}}} = \frac{1}{40\cdot\sqrt{\frac{1}{10}}} =$$

$\varphi = \varphi_S + \varphi_R + 180° = (\emptyset \div -90°) + (-90°) + 180° = (+90° \to \emptyset°)$ ✓ stabil

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 22.4.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: $\emptyset$
$F_w = \frac{20}{20-2\omega^2+j\omega}$	$F_z = \frac{10j\omega}{20-2\omega^2+j\omega}$	Stabil = J/N? JA
$e_b = \emptyset$	$\Delta x = \emptyset$	D= $\frac{1}{40\cdot\sqrt{\frac{1}{10}}}$

Beispiel 10-3: Gegeben sind die folgende Strecke F_S und der folgende Regler F_R

$$F_S = \frac{10}{1+2j\omega} \qquad F_R = 10 + \frac{2}{j\omega} = \frac{2+10j\omega}{j\omega}$$

Bitte berechnen Sie die Führungs- und die Störübertragungsfunktion. Ist das System stabil?
Bitte bestimmen Sie weiters die bleibende Regeldifferenz e_b bei einer sprungförmigen Änderung der Führungsgröße von $\Delta w = 1{,}5$ sowie den Beharrungswert der Regelgröße bei einer sprungförmigen Änderung der Störgröße von $\Delta z = 0{,}25$.

$$\underline{F}_W = \frac{\underline{F}_R \cdot \underline{F}_S}{1+\underline{F}_R \cdot \underline{F}_S} = \frac{\frac{10}{1+2j\omega} \cdot \frac{2+10j\omega}{j\omega}}{1+\frac{10}{1+2j\omega} \cdot \frac{2+10j\omega}{j\omega}} = \frac{10 \cdot (2+10j\omega)}{10(2+10j\omega)+j\omega(1+2j\omega)} =$$

$$= \frac{20+100j\omega}{20-2\omega^2+j\omega 101}$$

$\underline{F}_W(\omega \to \emptyset) = 1 \Rightarrow$ stationärgenau, d.h. $e_b = \emptyset$

$$\underline{F}_Z = \frac{\underline{F}_S}{1+\underline{F}_R \cdot \underline{F}_S} = \frac{\frac{10}{1+2j\omega}}{1+\frac{10}{1+2j\omega} \cdot \frac{2+10j\omega}{j\omega}} = \frac{10j\omega}{j\omega(1+2j\omega)+10(2+10j\omega)} =$$

$$= \frac{10j\omega}{20-2\omega^2+j\omega 101}$$

$\underline{F}_Z(\omega \to \emptyset) = \emptyset \Rightarrow$ stationärgenau, d.h. $\Delta x = \emptyset$

$\varphi = \varphi_R + \varphi_S + 180° = (-90° \to \emptyset) + (\emptyset° \to -90°) + 180° \approx \geq 90°$ (siehe Zahlen)

✓ stabil

Name: KLEBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 27.4.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: $\emptyset$
$F_w = \frac{20+j\omega 100}{20-2\omega^2+j\omega 101}$	$F_z = \frac{10j\omega}{20-2\omega^2+j\omega 101}$	Stabil = J/N? J
$e_b = \emptyset$	$\Delta x = \emptyset$	

Beispiel 10-4: Gegeben sind die folgende Strecke F_S und der folgende Regler F_R

$$F_S = \frac{5}{1-4\omega^2+5j\omega} \qquad F_R = 2$$

Bitte berechnen Sie die Führungs- und die Störübertragungsfunktion. Wie groß ist die Dämpfung D beim Führungsverhalten und ist das System stabil?
Bitte bestimmen Sie weiters die bleibende Regeldifferenz e_b bei einer sprungförmigen Änderung der Führungsgröße von $\Delta w = 1$ sowie den Beharrungswert der Regelgröße bei einer sprungförmigen Änderung der Störgröße von $\Delta z = 1$.

$$F_W = \frac{F_R \cdot F_S}{1+F_R \cdot F_S} = \frac{\frac{10}{1-4\omega^2+5j\omega}}{1+\frac{10}{1-4\omega^2+5j\omega}} = \frac{10}{11-4\omega^2+5j\omega} = \frac{\frac{10}{11}}{1-\frac{4}{11}\omega^2+\frac{5}{11}j\omega}$$

T_2^2, T_1

$F_W(\omega \to 0) = \frac{10}{11} \Rightarrow$ nicht statisch genau, bleibende Regelabweichung!!

$\Delta x = F_W(\omega\to 0)\cdot \Delta w = \frac{10}{11}\cdot 1 = \frac{10}{11}$

$e_b = \Delta w - \Delta x = 1 - \frac{10}{11} = 1/11$

$D = \frac{T_1}{2T_2} = \frac{5/11}{2\cdot\sqrt{\frac{4}{11}}} = \frac{5}{22\cdot\sqrt{\frac{4}{11}}}$

$$F_Z = \frac{F_S}{1+F_R\cdot F_S} = \frac{\frac{5}{1-4\omega^2+5j\omega}}{1+\frac{10}{1-4\omega^2+5j\omega}} = \frac{5}{11-4\omega^2+5j\omega} = \frac{\frac{5}{11}}{1-\frac{4}{11}\omega^2+\frac{5}{11}j\omega}$$

$F_Z(\omega\to 0) = \frac{5}{11} \Rightarrow$ nicht statisch genau

$\Delta x = F_Z \cdot \Delta z = \frac{5}{11}\cdot 1 = 5/11$

$\varphi = \varphi_R + \varphi_S + 180° = 0° + (0 \to -180°) + 180° \Rightarrow (180° \to 0°)$ ✓ stabil

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 23.4.09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: $\emptyset$
$F_w = \frac{10/11}{1-\frac{4}{11}\omega^2+j\omega\frac{5}{11}}$	$F_z = \frac{5/11}{1-\frac{4}{11}\omega^2+\frac{5}{11}j\omega}$	Stabil = J/N? JA
$e_b = 1/11$	$\Delta x = 5/11$	$D = \frac{5}{22\cdot\sqrt{4/11}}$

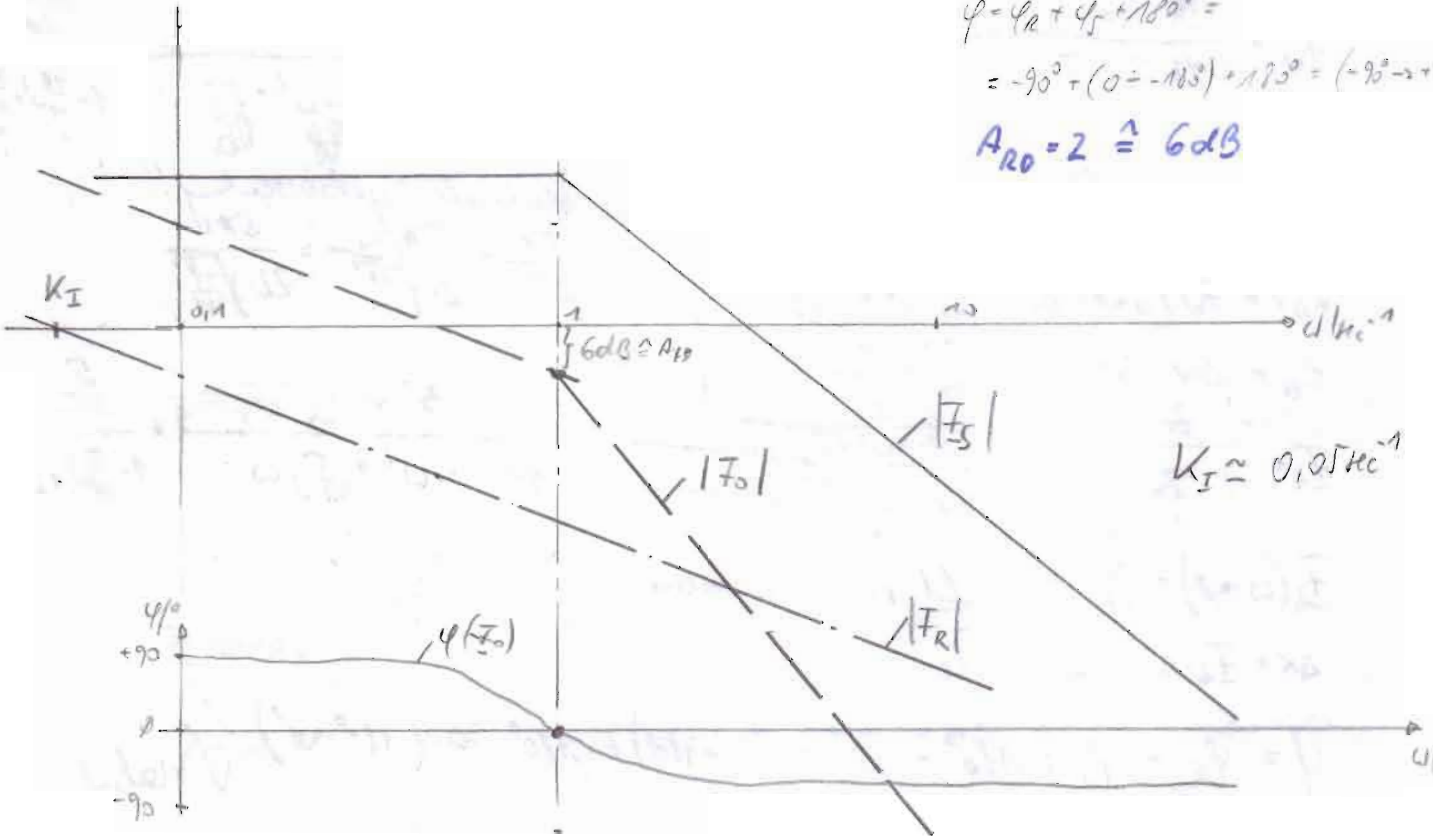
Beispiel 10-5: Gegeben sind die folgende Strecke F_S und der folgende Regler F_R

$$F_S = \frac{10}{1-\cancel{1}\omega^2 + 2j\omega} \qquad F_R = \frac{K_I}{j\omega} = \frac{0{,}05}{j\omega}$$

$\omega_E = \frac{1}{T_2} = 1\,sec^{-1}$ T_2 T_1

Bitte dimensionieren Sie das K_I des Reglers für einen Amplitudenrand von $A_{RD} = 2$ und berechnen Sie die Führungs- und die Störübertragungsfunktion.
Bitte bestimmen Sie weiters die bleibende Regeldifferenz e_b bei einer sprungförmigen Änderung der Führungsgröße von $\Delta w = 2$ sowie den Beharrungswert der Regelgröße bei einer sprungförmigen Änderung der Störgröße von $\Delta z = 2$.

$\varphi = \varphi_R + \varphi_S + 180° =$
$= -90° + (0 \div -180°) + 180° = (-90° \div +90°)$
$A_{RD} = 2 \mathrel{\hat=} 6\,dB$



$K_I \simeq 0{,}05\,sec^{-1}$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 23.4.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 1
$F_w = \dfrac{1}{1 + j\omega(2-2\omega^2) - 4\omega^2}$	$F_z = \dfrac{10 j\omega}{0{,}5 + j\omega(1-\omega^2) - 4\omega^2}$	Stabil = J/N? JA
$e_b = \varnothing$	$\Delta x = \varnothing$	D=

Zusatzblatt zu Beispiel 10-5: KUBINGER, Kl.-Nr. ——.

$$\underline{F}_W = \frac{\underline{F}_R \cdot \underline{F}_S}{1+\underline{F}_R \cdot \underline{F}_S} = \frac{\frac{0{,}05}{j\omega} \cdot \frac{10}{(1-\omega^2+2j\omega)}}{1+\frac{0{,}05}{j\omega} \cdot \frac{10}{(1-\omega^2+2j\omega)}} = \frac{0{,}5}{0{,}5 + j\omega(1-\omega^2+2j\omega)}$$

$$= \frac{1}{1+2j\omega(1-\omega^2+2j\omega)} = \frac{1}{1+j\omega(2-2\omega^2)-4\omega^2}$$

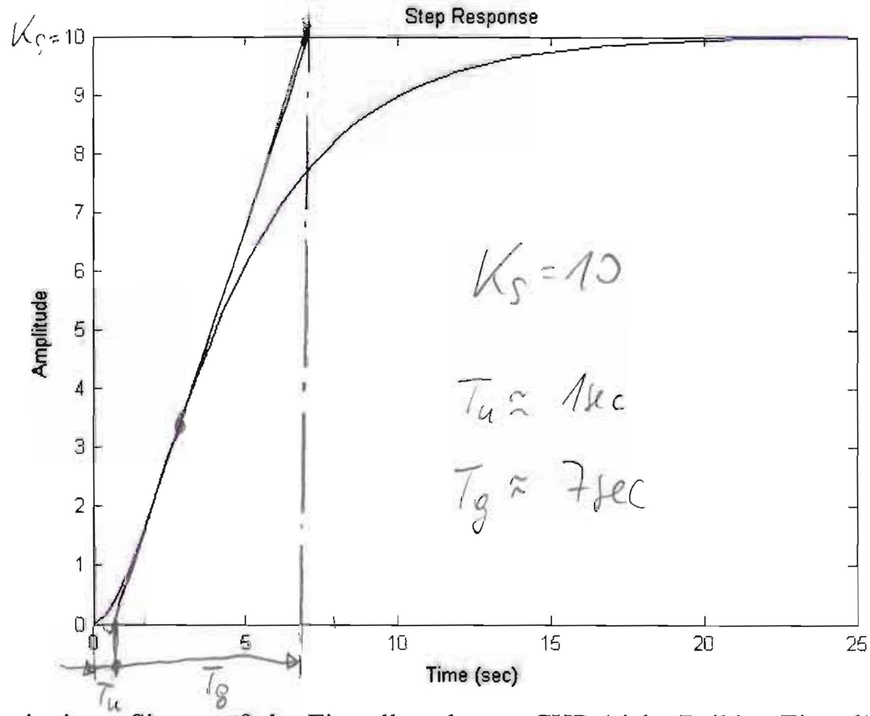
$\underline{F}_W(\omega \to \emptyset) = 1 \Rightarrow$ stationär genau, d.h. $e_b = \emptyset$

$$\underline{F}_Z = \frac{\underline{F}_S}{1+\underline{F}_R \cdot \underline{F}_S} = \frac{\frac{10}{(1-\omega^2+2j\omega)}}{1+\frac{0{,}05}{j\omega} \cdot \frac{10}{(1-\omega^2+2j\omega)}} =$$

$$= \frac{10j\omega}{j\omega(1-\omega^2+2j\omega)+0{,}5} = \frac{10j\omega}{0{,}5+j\omega(1-\omega^2)-4\omega^2}$$

$\underline{F}_Z(\omega \to \emptyset) = \emptyset \Rightarrow$ stationär genau, d.h. $\Delta x = \emptyset$

Beispiel 10-6: Sie kennen von einer Strecke die Sprungantwort gemäß der folgenden Abbildung



Bitte dimensionieren Sie gemäß der Einstellregeln von CHR (siehe Beiblatt Einstellregeln) einen PID-Regler, dessen Führungsverhalten einen aperiodischen Regelvorgang und kürzeste Dauer aufweist sowie einen PI-Regler, dessen Störverhalten ein 20% Überschwingen mit kleinster Schwingungsdauer aufweist.

PID-Regler

$K_p = 0{,}6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s} = 0{,}6 \cdot \frac{7sec}{1sec \cdot 10} = \frac{4{,}2}{10} = 0{,}42$

$T_n = T_g = 7sec$

$T_v = 0{,}5 \cdot T_u = 0{,}5sec$

PI-Regler:

$K_p = 0{,}7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s} = 0{,}7 \frac{7sec}{1sec \cdot 10} = 0{,}49$

$T_n = 2{,}3 \cdot T_u =$

$= \cancel{1{,}15sec}\ 2{,}3sec$

→ +1P_W

Name: V. KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 22. 4. '09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
PID-Regler: Kp= 0,42 Tn= 7sec Tv= 0,5sec	PI-Regler: Kp= 0,49 Tn= ~~1,15sec~~ 2,3sec	

+1

Beispiel 10-7: Die Parameter eines PID-Reglers sind auf die folgenden Werte eingestellt.

$$K_P = 5 \qquad T_n = \infty \qquad T_v = 0$$

Der Regelkreis führt damit Dauerschwingungen mit einer Periodendauer von 2 Sekunden aus. Nach welchem Einstellkriterium lassen sich geeignete Parameter berechnen? Bitte berechnen Sie (siehe Beiblatt Einstellregeln) die Parameter für einen P-, einen PI- und einen PID-Regler.

Einstellregel nach Ziegler & Nichols

$K_{PKr} = 5$

$T_{Kr} = 2sec$

siehe Tabelle für PID-Regler:

$K_R = 0{,}6 \cdot K_{RKr} = 0{,}6 \cdot 5 = 3$

$T_n = 0{,}5 \cdot T_{Kr} = 1sec$

$T_V = 0{,}125 \cdot T_{Kr} = 0{,}25sec$

– " – PI-Regler:

$K_R = 0{,}45 \cdot K_{RKr} = 2{,}25$

$T_n = 0{,}83 \cdot T_{Kr} = 1{,}66 sec$

– " – P-Regler:

$K_R = 0{,}5 \cdot K_{RKr} = 2{,}5$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 23.4.'07
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
PID-Regler: Kp= 3 Tn= 1sec Tv= 0,25sec	PI-Regler: Kp= 2,25 Tn= 1,66sec	P-Regler: Kp= 2,5

Beispiel 10-8: Gegeben sind die folgende Strecke F_S und der folgende Regler F_R

$$F_S = \frac{1}{2j\omega} \qquad F_R = 10 + \frac{1}{5j\omega} = \frac{1+50j\omega}{5j\omega}$$

Bitte berechnen Sie die Führungs- und die Störübertragungsfunktion. Wie groß ist die Dämpfung D beim Führungsverhalten und ist das System stabil?
Bitte bestimmen Sie weiters die bleibende Regeldifferenz e_b bei einer sprungförmigen Änderung der Führungsgröße von $\Delta w = 3$ sowie den Beharrungswert der Regelgröße bei einer sprungförmigen Änderung der Störgröße von $\Delta z = 2$.

$$F_W = \frac{F_R \cdot F_S}{1+F_R \cdot F_S} = \frac{\frac{1+50j\omega}{5j\omega}\cdot\frac{1}{2j\omega}}{1+\frac{1+50j\omega}{5j\omega}\cdot\frac{1}{2j\omega}} = \frac{1+50j\omega}{1+50j\omega-10\omega^2} = \frac{1+50j\omega}{\underbrace{1-10\omega^2}_{T_2^2} + \underbrace{50j\omega}_{T_1}}$$

$$D = \frac{T_1}{2T_2} = \frac{50}{2\sqrt{10}}$$

$F_W(\omega \to 0) = 1 \Rightarrow$ stationär genau, d.h. $e_b = 0$

$$F_Z = \frac{F_S}{1+F_R \cdot F_S} = \frac{\frac{1}{2j\omega}}{1+\frac{(1+50j\omega)}{5j\omega \cdot 2j\omega}} = \frac{5j\omega}{1+50j\omega-10\omega^2} = \frac{5j\omega}{1-10\omega^2+50j\omega}$$

$F_Z(\omega \to 0) = 0 \Rightarrow$ d.h., stationär genau, $\Delta x = 0$

$\varphi = \varphi_R + \varphi_S + 180° = (-90° \to 0°) - 90° + 180° = (0° \to 90°)$ ✓ stabil

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 23.4.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 0
$F_w = \frac{1+50j\omega}{1-10\omega^2+50j\omega}$	$F_z = \frac{5j\omega}{1-10\omega^2+50j\omega}$	Stabil = J/N? Ja
$e_b = 0$	$\Delta x = 0$	$D = \frac{50}{2\sqrt{10}}$

Beispiel 10-9: Gegeben sind die folgende Strecke F_S und der folgende Regler F_R

$$F_S = \frac{1}{2j\omega \cdot (1 + j\omega)} \qquad F_R = 10 \cdot (1 + j\omega)$$

Bitte berechnen Sie die Führungs- und die Störübertragungsfunktion. Ist das System stabil? Bitte bestimmen Sie weiters die bleibende Regeldifferenz e_b bei einer sprungförmigen Änderung der Führungsgröße von $\Delta w = -1$ sowie den Beharrungswert der Regelgröße bei einer sprungförmigen Änderung der Störgröße von $\Delta z = -0{,}5$.

$$\underline{F}_W = \frac{\underline{F}_R \cdot \underline{F}_S}{1 + \underline{F}_R \cdot \underline{F}_S} = \frac{\frac{10 \cdot (1+j\omega)}{2j\omega(1+j\omega)}}{1 + \frac{10\cdot(1+j\omega)}{2j\omega(1+j\omega)}} = \frac{10}{10 + 2j\omega} = \frac{1}{1 + \frac{2}{10} j\omega}$$

$\underline{F}_W(\omega \to 0) = 1 \Rightarrow$ stationär genau, d.h. $e_b = \emptyset$

$$\underline{F}_Z = \frac{\underline{F}_S}{1 + \underline{F}_R \cdot \underline{F}_S} = \frac{\frac{1}{2j\omega(1+j\omega)}}{1 + \frac{10\cdot(1+j\omega)}{2j\omega(1+j\omega)}} = \frac{2j\omega}{2j\omega(1+j\omega)(10+2j\omega)} =$$

$$= \frac{1}{10 + j10\omega + 2j\omega - 2\omega^2} = \frac{1}{10 - 2\omega^2 + 12j\omega} = \frac{1/10}{1 - \frac{2}{10}\omega^2 + \frac{12}{10} j\omega}$$

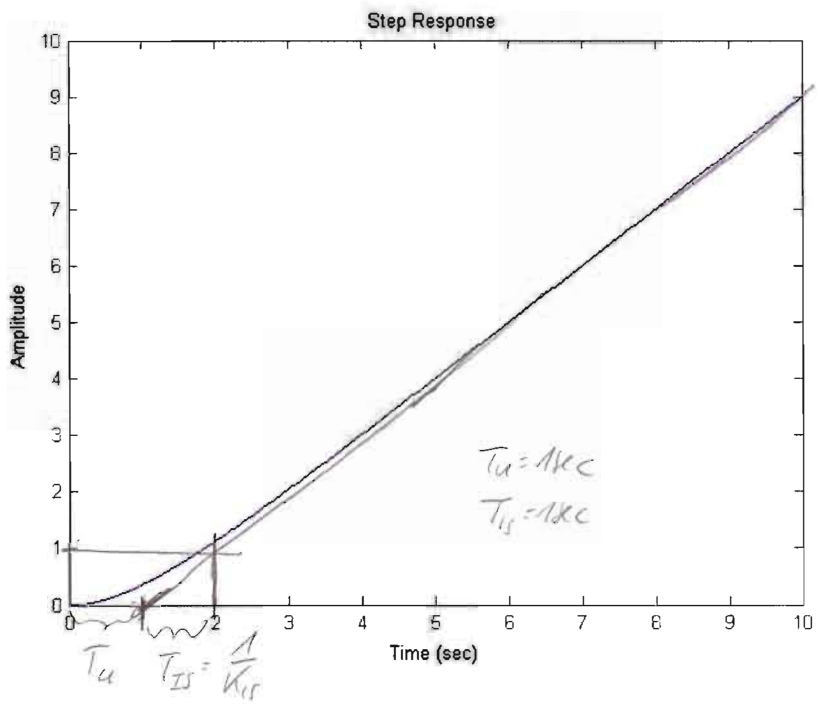
$\underline{F}_Z(\omega \to 0) = 1/10 \Rightarrow \Delta x = \underline{F}_Z(\omega \to 0) \cdot \Delta w = \frac{1}{10} \cdot (-0{,}5) = -0{,}05$

$\varphi = \varphi_R + \varphi_S + 180° = (0 \to 90°) + (-90° \to -180°) + 180° = +90°$

$\Rightarrow \checkmark$ stabil

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 28.4.09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: $\emptyset$
$F_w = \frac{1}{1 + \frac{2}{10} j\omega}$	$F_z = \frac{1/10}{1 - \frac{2}{10}\omega^2 + \frac{12}{10} j\omega}$	Stabil = J/N? JA
$e_b = \emptyset$	$\Delta x = -0{,}05$	

Beispiel 10-10: Sie kennen von einer I-T_1-Strecke die Sprungantwort gemäß der folgenden Abbildung



$T_S = T_u = 1sec$

$K_{IS} = \frac{1}{T_{IS}} = 1\,sec^{-1}$

Bitte dimensionieren Sie gemäß der Einstellregeln von CHR (siehe Beiblatt Einstellregeln) einen PID-Regler, dessen Führungsverhalten einen aperiodischen Regelvorgang aufweist sowie einen PI-Regler, dessen Störverhalten ein Überschwingen aufweist.

PID-Regler:

$K_R = 1{,}67 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_{us}} = 1{,}67$

$T_n = 4{,}2 \cdot T_S = 4{,}2sec$

$T_v = 0{,}85 \cdot T_S = 0{,}85sec$

PI-Regler:

$K_R = \cancel{0{,}24}\ 1{,}3 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S} = 1{,}3$

$T_n = \cancel{0{,}6}\ 2{,}6 \cdot T_S = 2{,}6sec$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 23.4.'09
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 0
PID-Regler: Kp= 1,67 Tn= 4,2sec Tv= 0,85sec	PI-Regler: Kp= ~~0,24~~ 1,3 Tn= ~~1sec~~ 2,6	

+1

Beiblatt: Einstellregeln

Reglertyp		Aperiodischer Regelvorgang mit kürzester Dauer: Führung	Störung	20 % Überschwingen mit kleinster Schwingungsdauer: Führung	Störung
P-Regler	K_P	$0{,}3 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$		$0{,}7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	
PI-Regler	K_P	$0{,}35 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	$0{,}6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	$0{,}6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	$0{,}7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$
	T_n	$1{,}2 \cdot T_g$	$4 \cdot T_u$	$1 \cdot T_g$	$2{,}3 \cdot T_u$
PID-Regler	K_P	$0{,}6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	$0{,}95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	$0{,}95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	$1{,}2 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$
	T_n	$1 \cdot T_g$	$2{,}4 \cdot T_u$	$1{,}35 \cdot T_g$	$2 \cdot T_u$
	T_v	$0{,}5 \cdot T_u$	$0{,}42 \cdot T_u$	$0{,}47 \cdot T_u$	$0{,}42 \cdot T_u$

Tabelle 1: Einstellregeln nach CHR für die Regelung einer P-T_n-Strecke

P-Regler: $K_R = 0{,}5 \cdot K_{RKr}$

PD-Regler: $K_R = 0{,}8 \cdot K_{RKr}$

$T_v = 0{,}12 \cdot T_{Kr}$

PI-Regler: $K_R = 0{,}45 \cdot K_{RKr}$

$T_n = 0{,}83 \cdot T_{Kr}$

PID-Regler: $K_R = 0{,}6 \cdot K_{RKr}$

$T_n = 0{,}5 \cdot T_{Kr}$

$T_v = 0{,}125 \cdot T_{Kr}$

Tabelle 2: Einstellregeln nach Ziegler und Nichols

Reglertyp		mit Schwingungen: Führung	Störung	ohne Schwingungen: Führung	Störung
P	K_R	$1{,}5 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$1{,}5 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$ *	$0{,}48 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$1{,}05 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$ *
PI	K_R	$1{,}8 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$1{,}3 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$0{,}5 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$0{,}85 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$
	T_n	$4{,}5 \cdot T_S$	$2{,}6 \cdot T_S$	$16 \cdot T_S$	$4{,}1 \cdot T_S$
PID	K_R	$8 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$11{,}5 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$1{,}67 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$8{,}1 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$
	T_n	$4{,}2 \cdot T_S$	$0{,}72 \cdot T_S$	$4{,}2 \cdot T_S$	$1{,}1 \cdot T_S$
	T_v	$0{,}85 \cdot T_S$	$0{,}18 \cdot T_S$	$0{,}85 \cdot T_S$	$0{,}28 \cdot T_S$

* Ein P-Regler regelt Störungen nicht aus, er erzeugt eine bleibende Regeldifferenz!

Tabelle 3: Einstellregeln nach CHR für die Regelung einer I-T_1-Strecke

Mess- und Regelungstechnik

Studieneinheit 12

Rechenübungen zum Thema

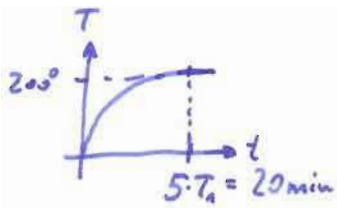
Sonderregler

Dr. Wilfried Kubinger
SS 2009

√ 8.5. 2009, WK

Beispiel 12-1: Ein Heizwiderstand erreicht bei einer ständig anstehenden konstanten Spannung 20 Minuten nach dem Einschalten die Endtemperatur von 200° Celsius. Er zeigt als Sprungantwort ein T_1-Verhalten.
Dieser Heizwiderstand soll mit einem Bimetall-Temperaturregler mit einem Leistungsüberschuss von 100% geregelt werden. Der Regler hat eine Schalthysterese von 20°C.
Bitte berechnen und skizzieren Sie den Verlauf der Temperatur.

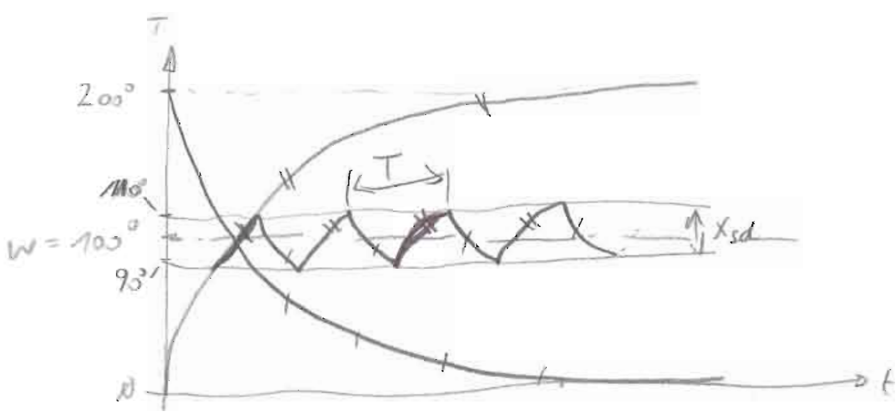
Hinweis: Sie können bei einem T_1-Glied davon ausgehen, dass nach einer Zeit von fünf Zeitkonstanten der stationäre Endwert erreicht ist.



$$\Rightarrow T_1 = \frac{20\,min}{5} = 4\,min$$

$$U_L = \left(\frac{X_{max}}{W} - 1 \right) \cdot 100\% = 100\%$$

$$\Rightarrow \frac{X_{max}}{W} - 1 = 1 \qquad \Rightarrow W = \frac{X_{max}}{2} = \frac{200°}{2} = 100°$$



$$X_{sd} = 20°C$$

$$\Rightarrow X_{ob} = W + \frac{X_{sd}}{2} = 110°$$

$$X_{un} = W - \frac{X_{sd}}{2} = 90°$$

$$T = 2 \cdot T_1 \cdot \frac{X_{sd}}{W} = 2 \cdot T_1 \cdot \frac{20°}{100°} = 0{,}4\,T_1 = \frac{4}{10} = 1{,}6\,min$$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 6.5.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
Schwingungsdauer T = 1,6 min	w = 100°	
x_{ob} = 110°	x_{un} = 90°	

Beispiel 12-2: Die Auswertung der Sprungantwort einer Temperatur-Regelstrecke ergibt die folgenden Werte:

$T_u = 30s \qquad T_g = 15min \qquad x_{max} = 1500°C$

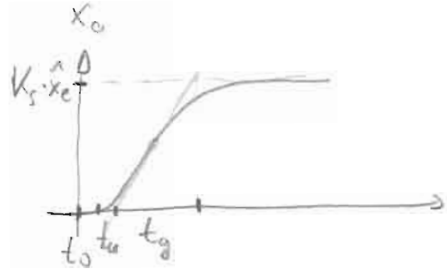
Ein Zweipunktregler mit einer Schaltdifferenz von 10°C soll die Temperatur auf 750°C halten. Bitte berechnen Sie die Schwankungsbreite Δx und die Schwingungsdauer T.

$$\Delta x = X_{sd} + X_{max} \cdot \frac{T_u}{T_g} = 10° + 1500°C \cdot \frac{0{,}5\,min}{15\,min} = 10° + \frac{1500°}{30} = 60°$$

$$T = \frac{T_u + \frac{X_{sd}}{X_{max}} \cdot (T_g - T_u)}{\left(\frac{1}{2} - \frac{X_{sd}}{2X_{max}}\right)^2} = \frac{30s + \frac{10°}{1500°} \cdot \overbrace{(15\,min - 0{,}5\,min)}^{870s}}{\left(\frac{1}{2} - \frac{10°}{2 \cdot 1500°}\right)^2} =$$

$$= \frac{(30s + 5{,}8s)}{0{,}247} \approx 145{,}13s$$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 6 I. 2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
Δx = 60°	T = 145,13s	



Beispiel 12-3: Die Temperatur eines Heizwiderstandes soll mit einem digitalen PID-Regler geregelt werden. Die Auswertung der Sprungantwort der Strecke bei einer Anregung mit der maximalen Heizleistung ergibt als Zeitkonstanten:

$T_u = 20s \qquad T_g = 6min$

Die maximal erreichte Temperatur beträgt 130°C, gemessen wurde bei einer Raumtemperatur von 20°C.
Der Regler hat als Ausgangssignal eine Stromschnittstelle, die einen stetigen Strom von 0 bis 20mA ausgeben kann. Dieser Strom wird in der Strecke in eine Spannung umgewandelt, diese wird verstärkt und bestimmt die Heizleistung.
Der Messbereich des Reglers ist auf 100°C eingestellt. In dem Regler sind die folgenden Werte für den P-, den I- und den D-Anteil gespeichert.

X_p / % = 0,5; 1; 2; 2,5; 3; 5; 10; 20 (in % vom Messbereich)
T_n / s = 25; 100; 200; 350; 600; 1000
T_v / s = 5; 10; 25; 50; 100; 200

Bitte bestimmen Sie nach dem Verfahren von CHR (Tabellen siehe Anhang) die für Störung optimalen Regelparameter für einen aperiodischen Verlauf der Regelgröße.

• K_s aus der Sprungantwort

$$K_s = \frac{\Delta X}{y_{max}} = \frac{130°C - 20°C}{20mA} = \frac{110}{20} \cdot \frac{°C}{mA} = 5{,}5\, °C/mA$$

• Dimensionierung des PID-Reglers nach CHR

$$1)\; K_p = 0{,}95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s} = 0{,}95 \cdot \frac{6min}{20sec \cdot 5{,}5\,°C/mA} \approx 3{,}11\, mA/°C$$

$$X_p = \frac{1}{K_p} \cdot y_{max} = \frac{1}{3{,}11} \cdot \frac{°C}{mA} \cdot 20mA \approx 6{,}43°C$$

$$X_p/\% = \frac{X_p}{X_{pmax}} \cdot 100\% = \frac{6{,}43°C}{100°C} \cdot 100\% \approx 6{,}43\%$$

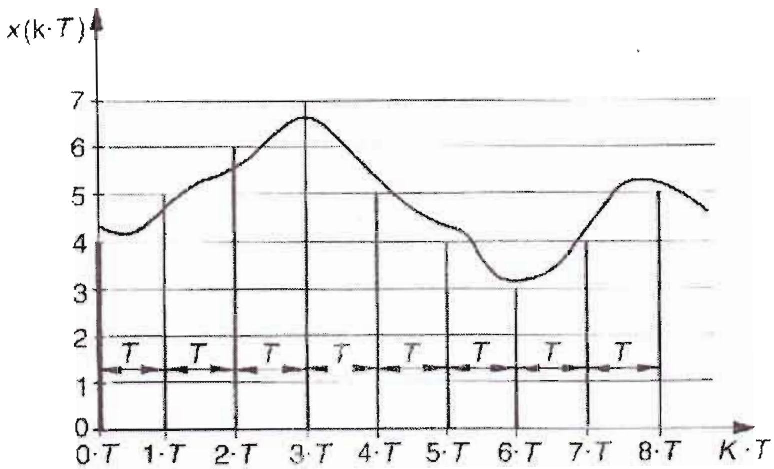
$X_p = 5\%$ (nächstgelegener Wert)

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 6.5.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 1
K_s = 5,5°C/mA	K_p = 3,11mA/°C	
X_p = 5 %	T_n = 25 sec	T_v = 10 sec

2) $T_n = 2{,}4 \cdot T_u = 2{,}4 \cdot 20\,\text{sec} = 48\,\text{sec}$ $\Rightarrow T_n = 25\,\text{sec}$

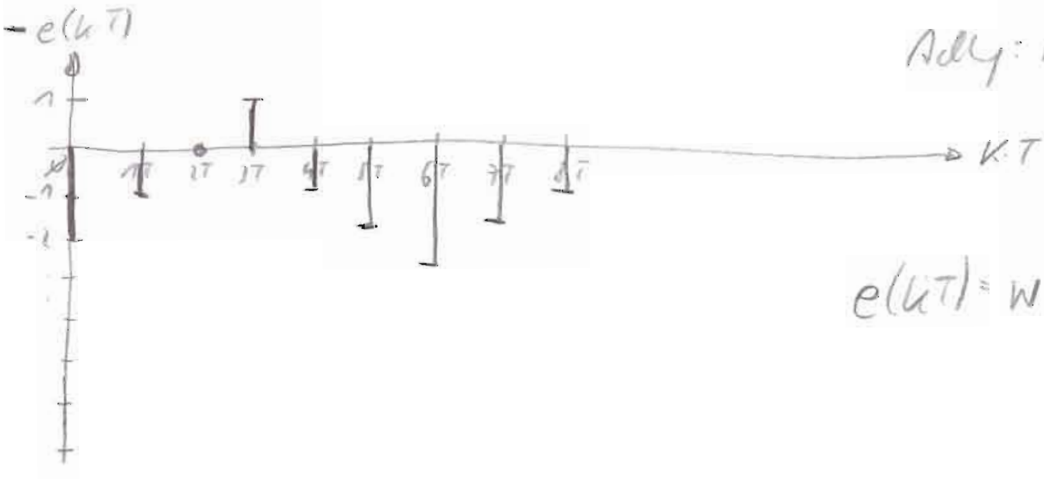
3) $T_v = 0{,}42 \cdot T_u = 0{,}42 \cdot 20\,\text{sec} = 8{,}4\,\text{sec}$ $\Rightarrow T_v = 10\,\text{sec}$

Beispiel 12-4: Gegeben sei die folgende digitalisierte Regelgröße x.



Bitte schreiben Sie die Werte der diskreten Folge x(kT) an. Zeichnen Sie weiters die Regeldifferenenz e(kT), wenn als Führungsgröße $w_0=6$ eingestellt wird.

$x(kT) = [4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 5 \ 4 \ 3 \ 4 \ 5 \ldots]$

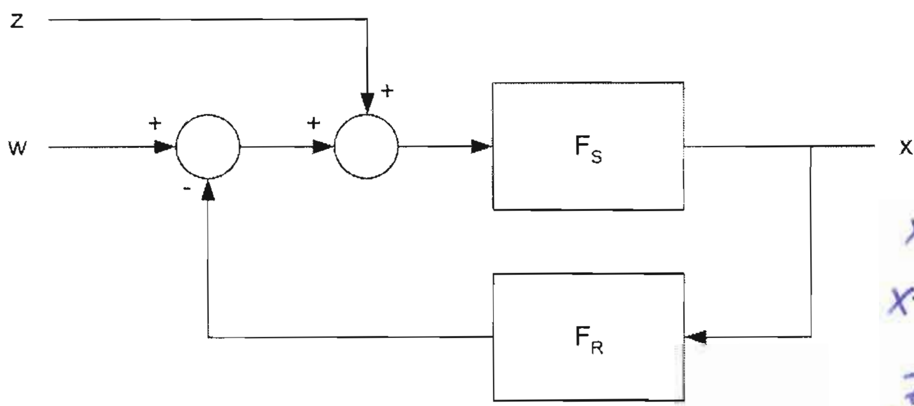


Achtung: Hier ist −e aufgetragen!

$e(kT) = w - x(k\cdot T)$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 6.5.2019
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: ∅
x(kT) = [4 5 6 7 5 4 3 4 5..]		

Beispiel 12-5: Bitte berechnen Sie von dem folgenden Regelkreis die Führungsübertragungsfunktion F_w und die Störübertragungsfunktion F_z. Ist das System stabil? Wird eine bleibende Regelabweichung e_b bei einem Sprung der Führungsgröße auftreten und werden Störungen von diesem System vollständig ausgeregelt?



$X = F_S \cdot w - X \cdot F_R \cdot F_S$

$X \cdot (1 + F_R \cdot F_S) = F_S \cdot w$

$F_w = \frac{X}{w} = \frac{F_S}{1 + F_R \cdot F_S}$

Übertragungsfunktionen: $F_S = \frac{1}{1+3j\omega}$ $F_R = 3 + \frac{2}{j\omega} = \frac{2+3j\omega}{j\omega}$

$$F_w = \frac{F_S}{1 + F_R \cdot F_S} = \frac{\frac{1}{1+3j\omega}}{1 + \frac{2+3j\omega}{j\omega} \cdot \frac{1}{1+3j\omega}} = \frac{j\omega}{j\omega \cdot (1+3j\omega) + 2 + 3j\omega} = \frac{j\omega}{2 + 4j\omega - 3\omega^2}$$

$F_w(\omega = 0) = 0 \Rightarrow e_b = w - x = w$

$\Rightarrow$ nicht stationär genau!

$$F_z = \frac{F_S}{1 + F_R F_S} = F_w = \frac{j\omega}{2 + 4j\omega - 3\omega^2}$$

$F_z(\omega = 0) = 0 \Rightarrow$ Stör. wird ausgeregelt!!

Stabilität: Pole von $3s^2 + 4s + 2 = 0$

$\Rightarrow s^2 + \frac{4}{3}s + \frac{2}{3} = 0$

$s_{1,2} = -\frac{4}{6} \pm \sqrt{\left(\frac{4}{6}\right)^2 - \frac{2}{3}} = -\frac{4}{6} \pm \sqrt{\frac{16}{36} - \frac{24}{36}}$

$j\sqrt{\frac{8}{36}}$

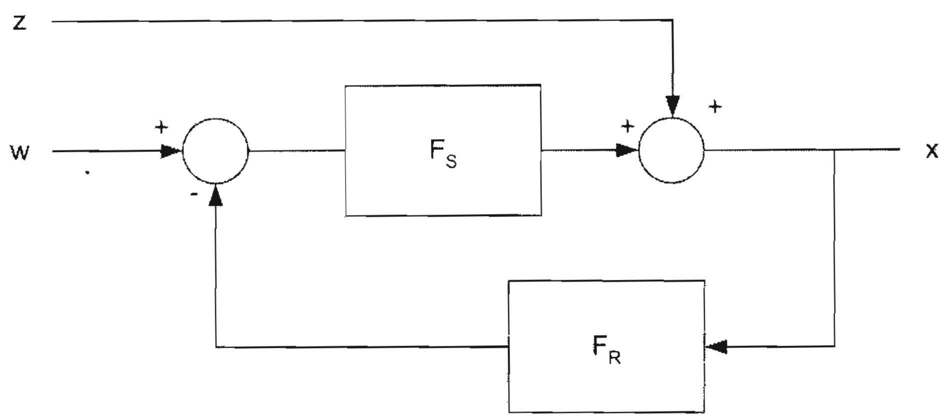
$Re(s_1) < 0$

$Re(s_2) < 0$

$\Rightarrow$ stabil

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 6.5.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 0
$F_w = \frac{j\omega}{2+4j\omega-3\omega^2}$	$F_z = \frac{j\omega}{2+4j\omega-3\omega^2}$	
Stabil J/N? JA	$e_b =$ W	Störungen vollständig ausgeregelt? JA

Beispiel 12-6: Bitte berechnen Sie von dem folgenden Regelkreis die Führungsübertragungsfunktion F_w und die Störübertragungsfunktion F_z. Ist das System stabil? Wird eine bleibende Regelabweichung e_b bei einem Sprung der Führungsgröße auftreten und werden Störungen von diesem System vollständig ausgeregelt?



Übertragungsfunktionen: $F_S = \dfrac{1}{1+3j\omega}$ $F_R = 3 + \dfrac{2}{j\omega}$

$$F_w = \frac{F_S}{1 + F_R \cdot F_S} = \frac{j\omega}{2 + 4j\omega - 3\omega^2}$$

$F_w(\omega = 0) = 0 \Rightarrow$ nicht [illegible], $e_b = w$

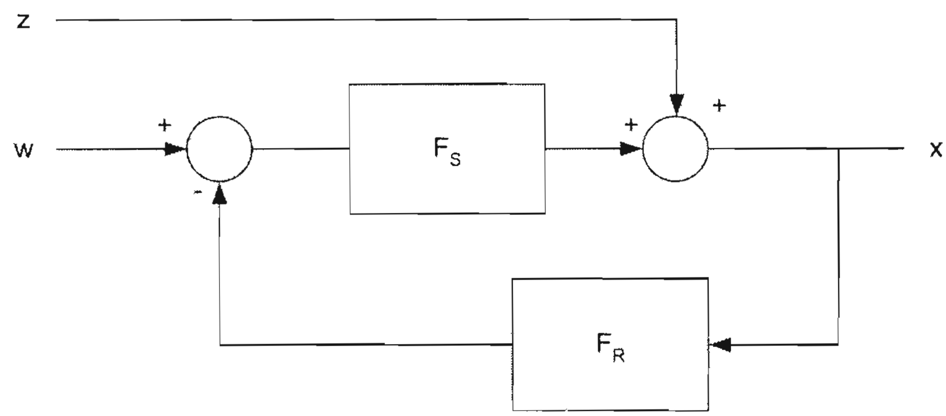
$$F_z = \frac{1}{1 + F_R \cdot F_S} = \frac{1}{1 + \frac{1}{(1+3j\omega)} \cdot \frac{2+3j\omega}{j\omega}} = \frac{j\omega(1+3j\omega)}{2 + 3j\omega + j\omega(1+3j\omega)} = \frac{j\omega - 3\omega^2}{2 + 4j\omega - 3\omega^2}$$

$F_z(\omega = 0) = 0 \Rightarrow$ Störungen werden ausgeregelt

Stabilität: siehe Beispiel 12-5

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 6.5.200[illegible]
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 0
$F_w = \dfrac{j\omega}{2+4j\omega-3\omega^2}$	$F_z = \dfrac{j\omega - 3\omega^2}{2+4j\omega-3\omega^2}$	
Stabil J/N? JA	$e_b =$ ω	Störungen vollständig ausgeregelt? JA

Beispiel 12-7: Bitte berechnen Sie von dem folgenden Regelkreis die Führungsübertragungsfunktion F_w und die Störübertragungsfunktion F_z. Ist das System stabil? Wird eine bleibende Regelabweichung e_b bei einem Sprung der Führungsgröße auftreten und werden Störungen von diesem System vollständig ausgeregelt?



Übertragungsfunktionen: $F_S = \dfrac{1}{1-2j\omega}$ $\qquad F_R = \dfrac{1}{j\omega}$

$$F_w = \frac{F_S}{1+F_S\cdot F_R} = \frac{\frac{1}{1-2j\omega}}{1+\frac{1}{1-2j\omega}\cdot\frac{1}{j\omega}} = \frac{j\omega}{(1-2j\omega)j\omega + 1} = \frac{j\omega}{1+j\omega+2\omega^2}$$

$$F_z = \frac{1}{1+F_S\cdot F_R} = \frac{1}{1+j\omega+2\omega^2}$$

Stabilität: Nenner $1+j\omega+2\omega^2 \Big|_{\text{mit } s=j\omega} \Rightarrow 1+s-2s^2$

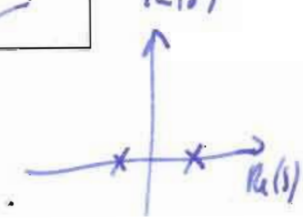
$$\Rightarrow 1+s-2s^2=0$$

$$s^2-\tfrac{1}{2}s-\tfrac{1}{2}=0 \qquad s_{1,2} = +\tfrac{1}{4}\pm\sqrt{\left(\tfrac{1}{4}\right)^2+\tfrac{1}{2}} = +\tfrac{1}{4}\pm\sqrt{\tfrac{1}{16}+\tfrac{1}{2}} \qquad \sqrt{\tfrac{9}{16}}=\tfrac{3}{4}$$

$$s_{1,2} = +\tfrac{1}{4}\pm\tfrac{3}{4} \Rightarrow s_1 = 1,\quad s_2 = -\tfrac{1}{2}$$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 8.5.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: Ø
$F_w = \dfrac{j\omega}{1+j\omega+2\omega^2}$	$F_z = \dfrac{1}{1+j\omega+2\omega^2}$	
Stabil J/N? NEIN	$e_b =$ —	Störungen vollständig ausgeregelt? —

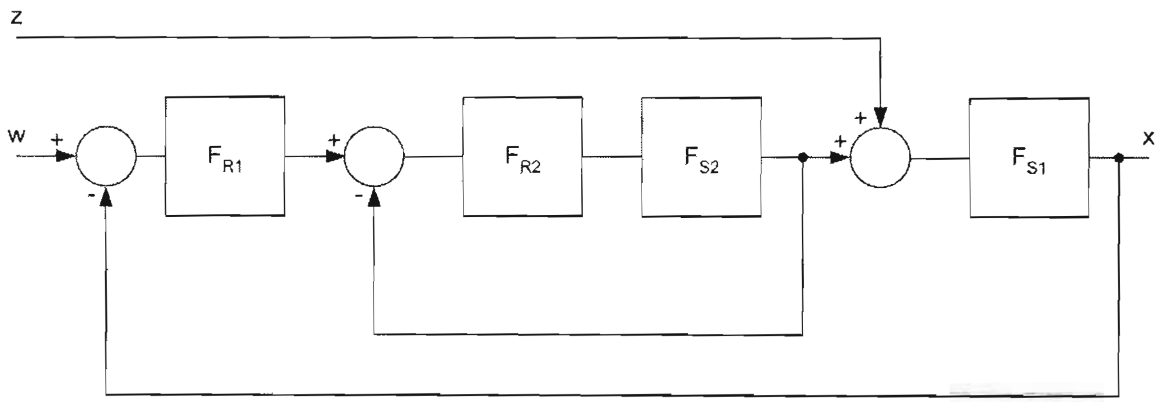
INSTABIL



Sowohl die Führungs- als auch die Störübertragungsfunktion sind instabil, d.h. sowohl bei Anlegen eines Impuls- als auch eines

$$(s-1)(s+\tfrac{1}{2}) = s^2 - s + \frac{1}{2}s - \frac{1}{2} = s^2 - \frac{1}{2}s - \frac{1}{2}$$

Beispiel 12-8: Bitte berechnen Sie von dem folgenden Regelkreis die Führungsübertragungsfunktion F_w und die Störübertragungsfunktion F_z. Ist das System stabil? Wird eine bleibende Regelabweichung e_b bei einem Sprung der Führungsgröße auftreten und werden Störungen von diesem System vollständig ausgeregelt?



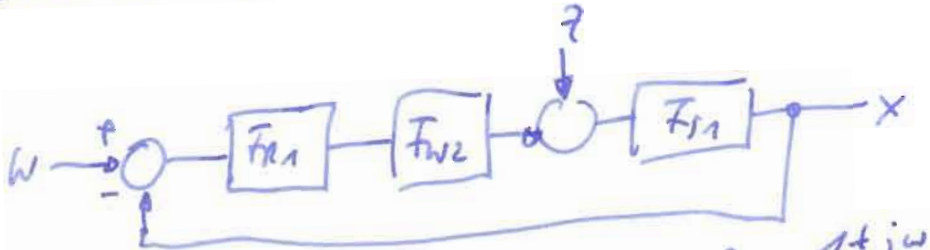
Übertragungsfunktionen: $F_{S1} = \frac{1}{1+3j\omega}$, $F_{R1} = \frac{2}{j\omega}$, $F_{S2} = \frac{1}{1+2j\omega}$, $F_{R2} = 1 + \frac{1}{j\omega} = \frac{1+j\omega}{j\omega}$

$$F_{w2} = \frac{F_{R2} \cdot F_{S2}}{1 + F_{R2} \cdot F_{S2}} = \frac{\frac{1}{j\omega} \cdot \frac{1+j\omega}{j\omega}}{1 + \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{1+j\omega}{j\omega}} = \frac{1+j\omega}{1+j\omega-\omega^2}$$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 8.5.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 1
$F_w = \frac{2+2j\omega}{2+3j\omega-4\omega^2-4j\omega^3+3j\omega^4}$	$F_z = \frac{j\omega-\omega^2-j\omega^3}{2+3j\omega-4\omega^2-4j\omega^3+3j\omega^4}$	
Stabil J/N? INSTABIL	$e_b =$ /	Störungen vollständig ausgeregelt?

Beiblatt zu 12-8

W. Kubinger, 8.5.2009



$$\underline{F}_{w1} = \frac{\underline{F}_{R1}\cdot\underline{F}_{W2}\cdot\underline{F}_{S1}}{1+\underline{F}_{R1}\cdot\underline{F}_{W2}\cdot\underline{F}_{S1}} = \frac{\frac{2}{j\omega}\cdot\frac{1+j\omega}{1+j\omega-\omega^2}\cdot\frac{1}{1+3j\omega}}{1+ \quad \text{—''—}} =$$

$$= \frac{2+2j\omega}{2+2j\omega+j\omega(1+j\omega-\omega^2)(1+3j\omega)} =$$

$$= \frac{2+2j\omega}{2+2j\omega+j\omega(1+j\omega-\omega^2+3j\omega-3\omega^2-3j\omega^3)} =$$

$$= \frac{2+2j\omega}{2+2j\omega+j\omega-\omega^2-j\omega^3-3\omega^2-3j\omega^3+3j\omega^4} =$$

$$= \frac{2+2j\omega}{2+3j\omega-4\omega^2-4j\omega^3+3j\omega^4}$$

$$\underline{F}_z = \frac{\underline{F}_{S1}}{1+\underline{F}_{R1}\cdot\underline{F}_{W2}\cdot\underline{F}_{S1}} = \frac{\frac{1}{1+3j\omega}\cdot\frac{j\omega(1+j\omega-\omega^2)}{j\omega(1+j\omega-\omega^2)}}{1+\frac{2}{j\omega}\cdot\frac{1+j\omega}{1+j\omega-\omega^2}\cdot\frac{1}{1+3j\omega}} =$$

$$= \frac{j\omega\cdot(1+j\omega-\omega^2)}{2+3j\omega-4\omega^2-4j\omega^3+3j\omega^4} = \frac{j\omega-\omega^2-j\omega^3}{2+3j\omega-4\omega^2-4j\omega^3+3j\omega^4}$$

Stabilität: $j\omega \to s$

$$2+3s+4s^2+4s^3+3s^4 = \emptyset \qquad \Rightarrow \text{INSTABIL}$$

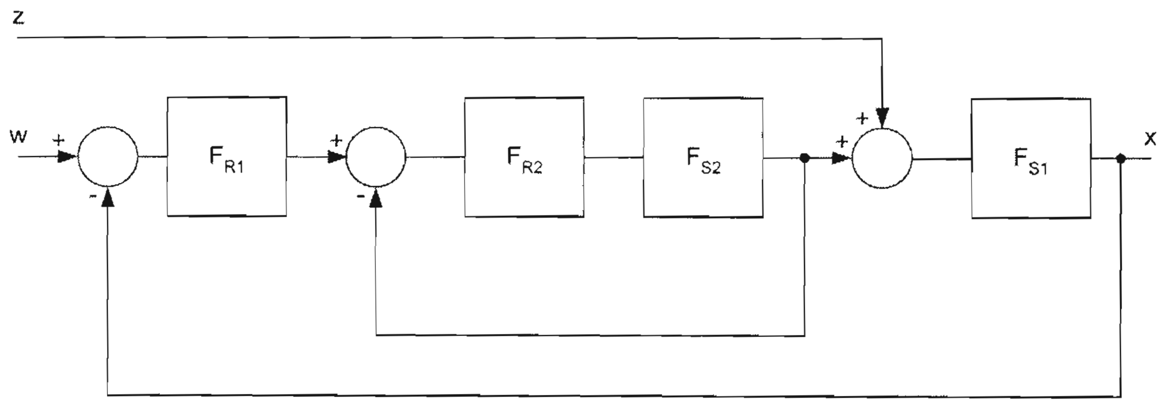
Mit Rechner z.B. MATLAB $\Rightarrow$

$s_1 = -0{,}7656 + j0{,}5315$

$s_2 = -0{,}7656 - j0{,}5315$

$s_3 = +0{,}0990 + j0{,}8694$

Beispiel 12-9: Bitte berechnen Sie von dem folgenden Regelkreis die Führungsübertragungsfunktion F_w und die Störübertragungsfunktion F_z. Ist das System stabil? Wird eine bleibende Regelabweichung e_b bei einem Sprung der Führungsgröße auftreten und werden Störungen von diesem System vollständig ausgeregelt?



Übertragungsfunktionen: $F_{S1} = \frac{1}{2j\omega}$, $F_{R1} = 3 + \frac{2}{j\omega}$, $F_{S2} = \frac{1}{1+j\omega}$, $F_{R2} = 0{,}25$

$$F_{w2} = \frac{F_{R2}\cdot F_{S2}}{1+F_{R2}\cdot F_{S2}} = \frac{\frac{0{,}25}{1+j\omega}}{1+\frac{0{,}25}{1+j\omega}} = \frac{0{,}25}{0{,}25+1+j\omega} = \frac{0{,}25}{1{,}25+j\omega}$$

$F_w = F_{w1}(\omega=0) = 1 \Rightarrow e_b = w - x = \emptyset$

$\Rightarrow$ Stationärgenau! ✓

$F_z = F_{z1}(\omega=0) = \emptyset \Rightarrow$ Störungen werden vollständig ausgeregelt ✓

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 8.5.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 1
$F_w = \frac{0{,}5+0{,}75j\omega}{0{,}5+0{,}75j\omega-1{,}5\omega^2-2j\omega^3}$	$F_z = \frac{1{,}25j\omega-\omega^2}{0{,}5+0{,}75j\omega-1{,}5\omega^2-2j\omega^3}$	
Stabil J/N? Stabil	$e_b = \emptyset$	Störungen vollständig ausgeregelt? JA

Beiblatt zu 12-9: W. Kuberger, 8.5.2007

$$\underline{F}_{W1} = \frac{\underline{F}_{R1} \cdot \underline{F}_{W2} \cdot \underline{F}_{S1}}{1 + \underline{F}_{R1} \cdot \underline{F}_{W2} \cdot \underline{F}_{S1}} =$$

Skizze siehe 12-8

$$= \frac{\frac{2+3j\omega}{j\omega} \cdot \frac{0{,}25}{1{,}25+j\omega} \cdot \frac{1}{2j\omega}}{1 + \text{—} \cdot \text{—}} = \frac{0{,}25 \cdot (2+3j\omega)}{0{,}25 \cdot (2+3j\omega) + j\omega \cdot 2j\omega(1{,}25+j\omega)} =$$

$$= \frac{0{,}5+0{,}75j\omega}{0{,}5+0{,}75j\omega - 2\omega^2(1{,}25+j\omega)} = \frac{0{,}5+0{,}75j\omega}{0{,}5+0{,}75j\omega - 2{,}5\omega^2 - 2j\omega^3}$$

$$\underline{F}_{Z1} = \frac{\underline{F}_{S1}}{1 + \underline{F}_{R1} \cdot \underline{F}_{W2} \cdot \underline{F}_{S1}} = \frac{\frac{1}{2j\omega} \cdot \frac{j\omega(1{,}25+j\omega)}{j\omega(1{,}25+j\omega)}}{1 + \frac{2+3j\omega}{j\omega} \cdot \frac{0{,}25}{1{,}25+j\omega} \cdot \frac{1}{2j\omega}} =$$

$$= \frac{1{,}25j\omega - \omega^2}{0{,}5+0{,}75j\omega - 2{,}5\omega^2 - 2j\omega^3}$$

Stabilität (mit $j\omega \to s$)

$$0{,}5 + 0{,}75s + 2{,}5s^2 + 2s^3 = \varnothing$$

Mit Rechner

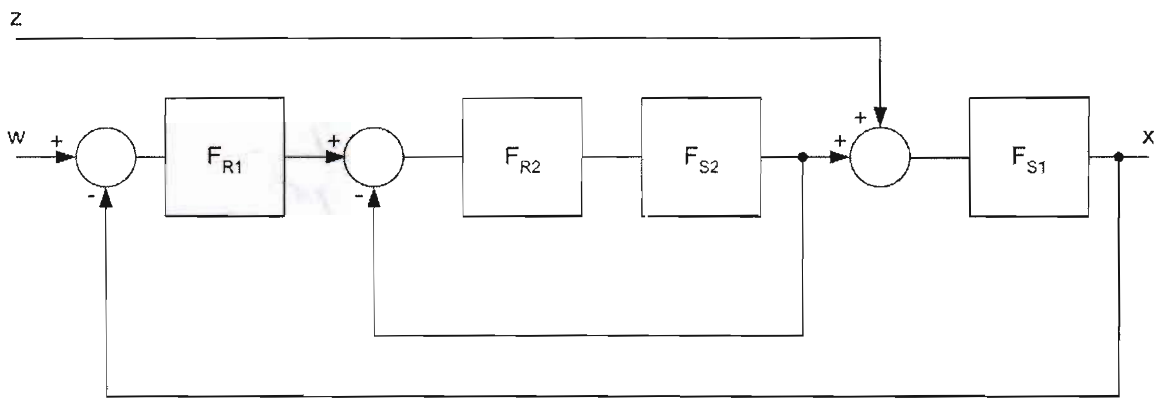
$\Rightarrow s_1 = -1.1148$

$s_2 = -0{,}0676 + j0{,}4687$

$s_3 = -0{,}0676 - j0{,}4687$

√ Stabil

Beispiel 12-10: Bitte berechnen Sie von dem folgenden Regelkreis die Führungsübertragungsfunktion F_w und die Störübertragungsfunktion F_z. Ist das System stabil? Wird eine bleibende Regelabweichung e_b bei einem Sprung der Führungsgröße auftreten und werden Störungen von diesem System vollständig ausgeregelt?



Übertragungsfunktionen: $F_{S1} = \frac{1}{j\omega}$, $F_{R1} = 3$, $F_{S2} = \frac{1}{1+3j\omega}$, $F_{R2} = \frac{1}{j\omega}$

$$F_{w2} = \frac{F_{R2}\cdot F_{S2}}{1+F_{R2}\cdot F_{S2}} = \frac{\frac{1}{j\omega}\cdot\frac{1}{1+3j\omega}}{1+\frac{1}{j\omega}\cdot\frac{1}{1+3j\omega}} =$$

$$= \frac{1}{1+j\omega(1+3j\omega)} = \frac{1}{1+j\omega-3\omega^2}$$

Name: KUBINGER	Personenkennzahl:	Datum: 8.5.2009
Berechnung siehe Vor- und Rückseite bzw. Zusatzblätter		Zusatzblätter: 1
$F_w = \frac{3}{3+j\omega-\omega^2-3j\omega^3}$	$F_z = \frac{1+j\omega-3\omega^2}{3+j\omega-\omega^2-3j\omega^3}$	
Stabil J/N? INSTABIL !	$e_b =$	Störungen vollständig ausgeregelt?

Beiblatt zu Beispiel 12-10: W. Kubinger, 8.5. 20

$$\underline{F}_{W1} = \frac{\underline{F}_{R1}\cdot\underline{F}_{W2}\cdot\underline{F}_{S1}}{1+\underline{F}_{R1}\cdot\underline{F}_{W2}\cdot\underline{F}_{S1}} = \frac{3\cdot\frac{1}{1+j\omega-3\cancel{j}\omega^2}\cdot\frac{1}{j\omega}}{1+3\cdot\frac{1}{1+j\omega-3\cancel{j}\omega^2}\cdot\frac{1}{j\omega}} =$$

$$= \frac{3}{3+j\omega(1+j\omega-3\cancel{j}\omega^2)} = \frac{3}{3+j\omega-\omega^2-3j\omega^3}$$

$$\underline{F}_{Z*} = \frac{\underline{F}_{S1}}{1+\underline{F}_{R1}\cdot\underline{F}_{W2}\cdot\underline{F}_{S1}} = \frac{\frac{1}{j\omega}\cdot\frac{1+j\omega-3\cancel{j}\omega^2}{1+j\omega-3\cancel{j}\omega^2}}{1+3\cdot\frac{1}{1+j\omega-3\omega^2}\cdot\frac{1}{j\omega}} =$$

$$= \frac{1+j\omega-\omega^2}{3+j\omega(1+j\omega-3\omega^2)} = \frac{1+j\omega-3\omega^2}{3+j\omega-\omega^2-3j\omega^3}$$

Stabilität: $j\omega \to s$

$$3+s+s^2+3s^3 = 0$$

Nullstellen mit Rechner bestimmt (z.B. roots(3 1 1 3) in Matlab)

$s_1 = -1$

$s_2 = +0{,}3333+j0{,}9428$

$s_3 = +0{,}3333-j0{,}9428$

$\Rightarrow$ INSTABIL!

Beiblatt: Einstellregeln

Reglertyp		Aperiodischer Regelvorgang mit kürzester Dauer: Führung	Aperiodischer Regelvorgang mit kürzester Dauer: Störung	20 % Überschwingen mit kleinster Schwingungsdauer: Führung	20 % Überschwingen mit kleinster Schwingungsdauer: Störung
P-Regler	K_P	$0{,}3 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$		$0{,}7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	
PI-Regler	K_P	$0{,}35 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	$0{,}6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	$0{,}6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	$0{,}7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$
	T_n	$1{,}2 \cdot T_g$	$4 \cdot T_u$	$1 \cdot T_g$	$2{,}3 \cdot T_u$
PID-Regler	K_P	$0{,}6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	$0{,}95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	$0{,}95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$	$1{,}2 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_S}$
	T_n	$1 \cdot T_g$	$2{,}4 \cdot T_u$	$1{,}35 \cdot T_g$	$2 \cdot T_u$
	T_v	$0{,}5 \cdot T_u$	$0{,}42 \cdot T_u$	$0{,}47 \cdot T_u$	$0{,}42 \cdot T_u$

Tabelle 1: Einstellregeln nach CHR für die Regelung einer P-T_n-Strecke

P-Regler: $K_R = 0{,}5 \cdot K_{RKr}$

PD-Regler: $K_R = 0{,}8 \cdot K_{RKr}$

$T_v = 0{,}12 \cdot T_{Kr}$

PI-Regler: $K_R = 0{,}45 \cdot K_{RKr}$

$T_n = 0{,}83 \cdot T_{Kr}$

PID-Regler: $K_R = 0{,}6 \cdot K_{RKr}$

$T_n = 0{,}5 \cdot T_{Kr}$

$T_v = 0{,}125 \cdot T_{Kr}$

Tabelle 2: Einstellregeln nach Ziegler und Nichols

Reglertyp		mit Schwingungen: Führung	mit Schwingungen: Störung	ohne Schwingungen: Führung	ohne Schwingungen: Störung
P	K_R	$1{,}5 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$1{,}5 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$ *	$0{,}48 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$1{,}05 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$ *
PI	K_R	$1{,}8 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$1{,}3 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$0{,}5 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$0{,}85 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$
	T_n	$4{,}5 \cdot T_S$	$2{,}6 \cdot T_S$	$16 \cdot T_S$	$4{,}1 \cdot T_S$
PID	K_R	$8 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$11{,}5 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$1{,}67 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$	$8{,}1 \cdot \frac{1}{K_{IS} \cdot T_S}$
	T_n	$4{,}2 \cdot T_S$	$0{,}72 \cdot T_S$	$4{,}2 \cdot T_S$	$1{,}1 \cdot T_S$
	T_v	$0{,}85 \cdot T_S$	$0{,}18 \cdot T_S$	$0{,}85 \cdot T_S$	$0{,}28 \cdot T_S$

* Ein P-Regler regelt Störungen nicht aus, er erzeugt eine bleibende Regeldifferenz!

Tabelle 3: Einstellregeln nach CHR für die Regelung einer I-T_1-Strecke