



Prof. em, Dr.-Ing. S. Zacher

Regelstrecken mit verteilten Parametren

Simulation mit optimalen Gewichtskoeffizienten

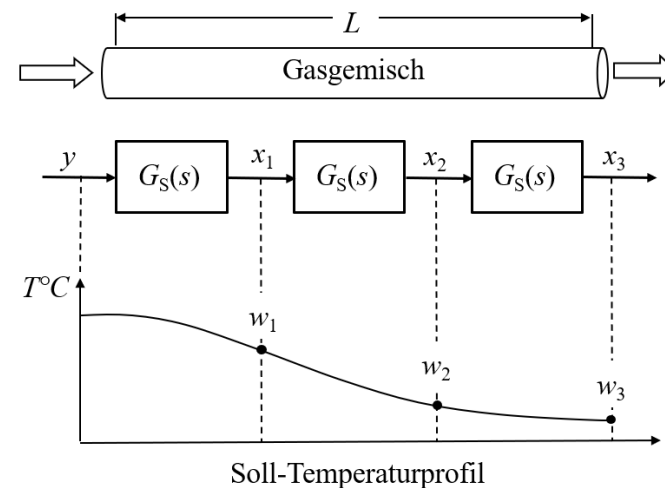
Die Parameter der typischen Industriestrecken wie Ofen, Reaktoren, Extruder, Rohrleitungen, sind durch die Länge oder durch den Raum verteilt. Solche Regelstrecken haben nur eine Stellgröße $y(t)$, z.B. die Temperatur am Anfang des Rohres), und mehrere Regelgrößen $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$...

„Jede Regelgröße wird jeweils auf den eigenen Sollwert w_1 , w_2 , w_3 eingeregelt, wobei die Sollwerte dem gewünschten Temperaturprofil des Rohres entsprechen.“

Zitat, Quelle:

Zacher; S: *Regelungstechnik mit Data Stream Management*. Springer-Vieweg Verlag, 2021, Seite 85

<https://www.springer.com/gp/book/9783658308599>



Abstract, Urheberrechts- und Haftungshinweis

Es werden Regelstrecken mit verteilten Parametern und mehreren Regelgrößen x_1, x_2, x_3 betrachtet, z.B. eine Gasleitung, die nur von einer Stellgröße $y(t)$ am Eingang der Regelstrecke und dadurch nur von einem Regler $G_R(s)$ ausgeregelt werden. Die Übertragungsfunktionen jeder Teilstrecke sind als P-T1-Glieder mit Totzeit gegeben:

$$G_1(s) = \frac{x_1(s)}{y(s)} = \frac{K_{PS}}{1+sT} \quad G_2(s) = \frac{x_2(s)}{y(s)} = \frac{K_{PS}}{1+sT} \cdot \frac{K_{PS}}{1+sT} \quad G_3(s) = \frac{x_3(s)}{y(s)} = \frac{K_{PS}}{1+sT} \cdot \frac{K_{PS}}{1+sT} \cdot \frac{K_{PS}}{1+sT}$$

Der Regler $G_R(s)$ erhält die gewichtete Summe von einzelnen Regeldifferenzen e_1, e_2, e_3 :

$$e(t) = g_1 e_1(t) + g_2 e_2(t) + g_3 e_3(t)$$

Die konstanten Gewichtskoeffizienten bzw. die Proportionalbeiwerte g_1, g_2, g_3 werden so gewählt, dass die gewünschten Regelgütekriterien (bleibende Regeldifferenz, Dämpfung, Überschwingweite, Ausregelzeit) erreicht werden.

Die Sollwerte w_1, w_2, w_3 des jeweiligen Regelkreises darf man nicht beliebig auswählen. Sie sind voneinander bzw. von Proportionalbeiwerten K_{PS} der Teilstrecken abhängig, da es nur eine Stellgröße $y(t)$ gibt. Bezeichnet man den ersten Sollwert als W , dann werden andere Sollwerte aus dem statischen Verhalten der Regelstrecke berechnet:

$$w_1 = W$$

$$w_2 = K \cdot W$$

$$w_3 = K^2 \cdot W$$

In der vorliegenden Publikation wird das Beispiel einer Regelstrecke mit verteilten Parametern behandelt, die mit dem PID-Regler geregelt wird. Abschließen werden die berechneten Kennwerte der Reglers und die Gewichtskoeffizienten mit MATLAB®-Simulink getestet.

Für Fragen, Anmerkungen und Anregungen oder Hilfestellung gilt die Mail-Adresse des Autors info@szacher.de.

Die vorliegende Publikation unterliegt der Urheberrecht. Alle Rechte sind bei Dr. S. Zacher vorbehalten.

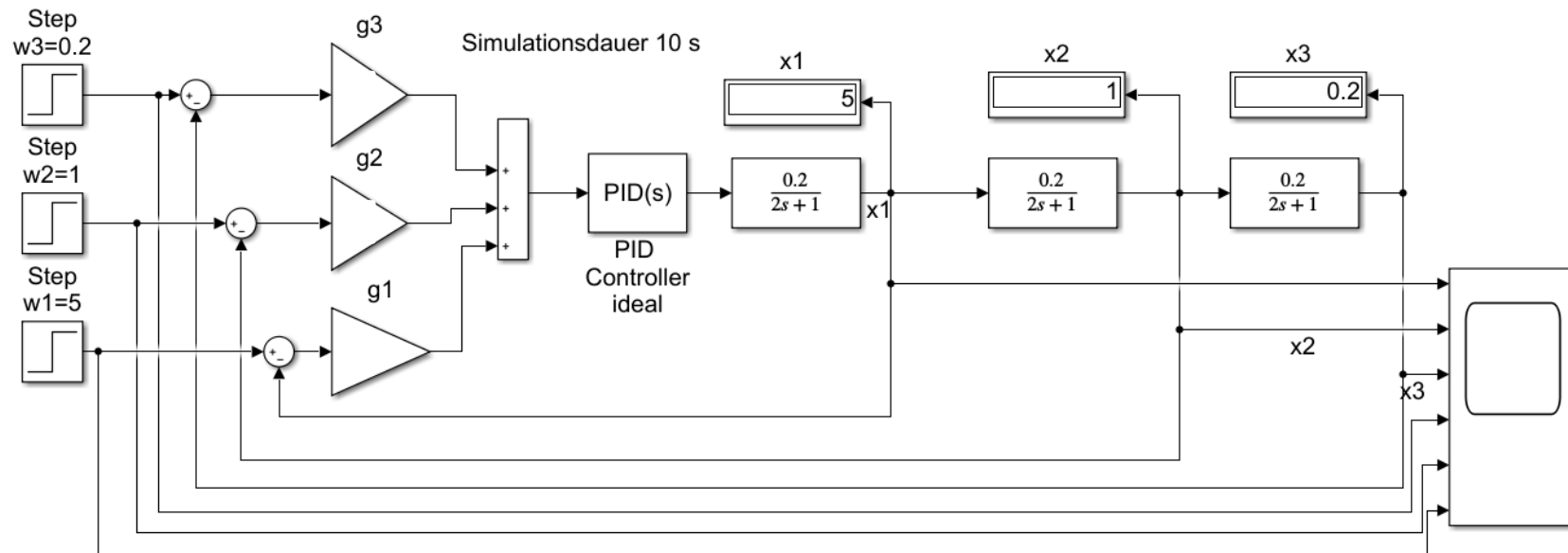
All rights are by the author, Dr. S. Zacher, reserved. Die Weiterentwicklung oder Nutzung der Publikation ohne Referenz auf Urheber ist nicht zugelassen. **No use of this publication without references on the author.**

Für die Anwendung der vorliegenden Publikation in der Industrie, im Laborbetrieb und in anderen praktischen Fällen sowie für eventuelle Schäden, die aus unvollständigen oder fehlerhaften Angaben über das dynamische Systeme ergeben können, übernimmt der Autor keine Haftung. **For the practical use of the results of this publication takes the author no responsibility.**

INHALT:

1. Einführung: Führungs- und Störverhalten	4
2. Anfahren: Regelkreis ohne Störungen	6
3. Halten: Regelkreis mit einer Störung	8
4. Konzept des Terminators	10
5. Simulation mit MATLAB ®-Simulink.....	11
3.1 Regelkreis mit einer Störung und einem Terminator	11
3.2 Regelkreis mit drei Störungen und einem Terminator.....	13
6. Simulation mit MATLAB ®-Skript	14
7. Anfahren/Halten-Regelung mit Terminator	15
7.1 Regelkreis mit LZI-Gliedern (lineare zeitinvariante)	16
7.2 Regelkreis mit LZV-Gliedern (linear zeitvariable)	17
8. Adaptive Regelung mit Terminator	19
8.1 Klassische adaptive Regelung	19
8.2 Regelung mit Terminator	20
9. Terminator stellt sich vor	21
10. Literaturverzeichnis	22

Gegeben ist ein Regelkreis mit der Regelstrecke mit verteilten Parametern und dem PID-Regler.



Zeigen wir unten, wie die Kennwerte des Reglers und die Gewichtskoeffiziente g_1 , g_2 und g_3 bestimmt werden.

Nehmen wir an, dass der Sollwert $w_1 = 5$ ist. Daraus folgen die Sollwerte w_2 und w_3 : $w_2 = K \cdot W = 0,2 \cdot 5 = 1,5$

$$w_3 = K^2 \cdot W = 0,2^2 \cdot 5 = 0,2$$

Die Übertragungsfunktionen der aufgeschnittenen Regelkreise sind:

$$G_{01}(s) = \frac{x_1(s)}{e_1(s)} = g_1 G_R(s) G_S(s) = g_1 \cdot \frac{K_{PR} (1 + sT_n)(1 + sT_v)}{sT_n} \cdot \frac{K}{1 + sT}$$

$$G_{02}(s) = \frac{x_2(s)}{e_1(s)} = g_2 G_R(s) G_S(s) G_S(s) = g_2 \cdot \frac{K_{PR} (1 + sT_n)(1 + sT_v)}{sT_n} \cdot \frac{K}{1 + sT} \cdot \frac{K}{1 + sT}$$

$$G_{03}(s) = \frac{x_3(s)}{e_1(s)} = g_3 G_R(s) G_S(s) G_S(s) G_S(s) = g_3 \cdot \frac{K_{PR} (1 + sT_n)(1 + sT_v)}{sT_n} \cdot \frac{K}{1 + sT} \cdot \frac{K}{1 + sT} \cdot \frac{K}{1 + sT}$$

Nehmen wir an, dass der Gewichtskoeffizient $g_1 = 1$ ist.

Daraus sollte die Einstellung des Reglers nach folgende Kompensationsregel erfolgen:

$$T_n = T_{gr\ddot{o}\beta te} = T$$

$$T_v = T_{zweitgr\ddot{o}\beta te} = T$$

Ein PID-Regler funktioniert mit $T_n = T_v$ nicht optimal. Es wird die als optimal empfohlene Einstellung $4T_n = T_v$ bzw. $T_v = 0,25T_n$ vorgenommen:

$$T_n = T_{gr\ddot{o}\beta te} = T = 2$$

$$T_v = 0,25T_n = 0,5$$

Die Übertragungsfunktionen des aufgeschnittenen Regelkreises $G_{02}(s)$ ist:

$$G_{02}(s) = \frac{K_{PR} (1 + sT_v) \cdot K^2}{sT_n (1 + sT)}$$

Die Übertragungsfunktionen des geschlossenen Regelkreises $G_{w2}(s)$ ist:

$$G_{w2}(s) = \frac{G_{02}(s)}{1 + G_{02}(s)} = \frac{K_{PR} (1 + sT_v) \cdot K^2}{sT_n (1 + sT) + K_{PR} (1 + sT_v) \cdot K^2}$$

Die charakteristische Gleichung ist: $sT_n (1 + sT) + K_{PR} (1 + sT_v) \cdot K^2 = 0$

$$2s(1 + 2s) + K_{PR} (1 + 0,5s) \cdot 0,2^2 = 0$$

$$4s^2 + 2,02K_{PR}s + K_{PR} = 0$$

Das ist ein schwingungsfähiges P-T2-Verhalten, dessen allgemeine Form ist:

$$\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\vartheta}{\omega_0} s + 1 = 0$$

$$\frac{4}{K_{PR}} s^2 + 0,505s + 1 = 0$$

Durch Koeffizientenvergleich wird daraus K_{PR} bestimmt:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\omega_0^2} = \frac{4}{K_{PR}} &\Rightarrow \omega_0 = \frac{\sqrt{K_{PR}}}{2} \\ \frac{2\vartheta}{\omega_0} = 0,505 &\Rightarrow \frac{2\vartheta}{\frac{\sqrt{K_{PR}}}{2}} = 0,505 \Rightarrow K_{PR} = 62,74 \cdot \vartheta^2 \end{aligned}$$

Je nach gewünschter Dämpfung wird daraus K_{PR} bestimmt. Nach Betragsoptimum gilt $\vartheta = 0,707$:

$$K_{PR} = 62,74 \cdot (0,707)^2 = 31,37$$

Die Gewichtskoeffiziente g_1 und g_3 wird nach dem Drei-Bode-Plots-Verfahren [4] bestimmt:

$$G_{01}(s) = \frac{x_1(s)}{e_1(s)} = g_1 G_R(s) G_S(s) = g_1 \cdot \frac{K_{PR} (1 + sT_n)(1 + sT_v)}{sT_n} \cdot \frac{K}{1 + sT}$$

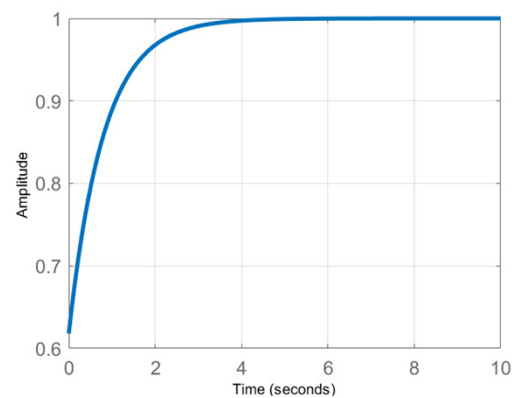
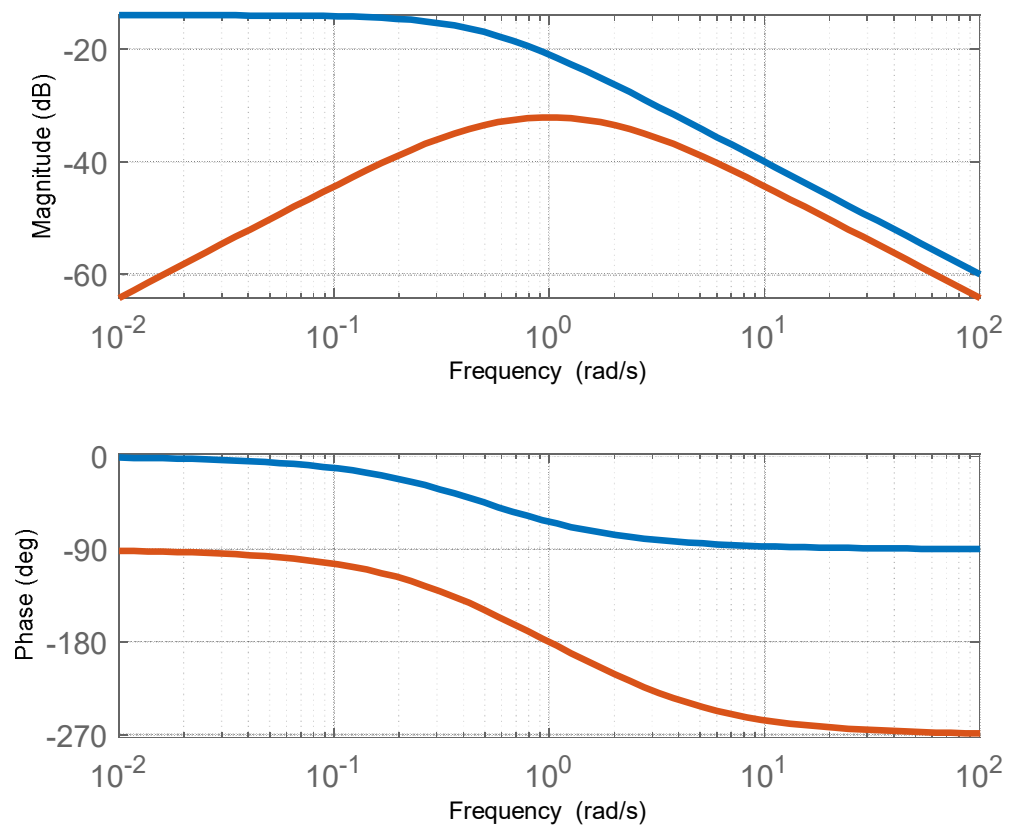
$$G_{03}(s) = \frac{x_2(s)}{e_1(s)} = g_3 G_R(s) G_S(s) G_S(s) G_S(s) = g_3 \cdot \frac{K_{PR} (1 + sT_n)(1 + sT_v)}{sT_n} \cdot \frac{K}{1 + sT} \cdot \frac{K}{1 + sT} \cdot \frac{K}{1 + sT}$$

```

1  %% Sektion 1: Eingabe
2  s=tf('s'); % Laplace-Operator
3  KpS=0.2; T=2; % Streckenparameter
4  Gs=KpS/(1+s*T); % ÜF(Übertragungsfunktion) der Strecke
5  KpR=32.37; Tn=T; Tv=0.25*T; % Reglerparameter
6  g1=1;
7  GR=g3*KpR*(1+s*Tn)*(1+s*Tv)/(s*Tn); % ÜF des PID-Reglers
8  w_n=1/Tn;% Knickpunkt: w ist omega
9  %% Sektion 2: Drei Bode-Plots
10 GR=g1*KpR*(1+s*Tn)*(1+s*Tv)/(s*Tn); % ÜF des PID-Reglers
11 GRsymm_mag=1/GR; % Symmetrischer Regler
12 GR_ph=1/(s^2*GR); %Phasen-symmetrischer Regler
13 wmin=0.01;wmax=100;% Fenster Frequenzbereich
14 bode(Gs,{wmin,wmax}); hold on;grid %Bode-Plot der Strecke
15 subplot(211); %Amplitudengang
16 bodemag(Gs,{wmin,wmax}); hold on %Fenster öffnen und halten
17 opts_mag=bodeoptions('cstprefs');
18 opts_mag.PhaseVisible='off';
19 h_mag=bodeplot(GRsymm_mag,{wmin,wmax},opts_mag); hold on;grid
20 subplot(212); %Phasengang
21 bode(Gs,{wmin,wmax}); hold on %Fenster öffnen und halten
22 opts_ph=bodeoptions('cstprefs');
23 opts_ph.MagVisible='off';
24 h_ph=bodeplot(GR_ph,{wmin,wmax}, opts_ph); hold on;grid
25 %% Sektion 3: horizontale Verschiebung nach links B in Bneu
26 delta_Dek=abs(log10(0.316)-log10(28.8)); % Abgelesen
27 delta_w=10^delta_Dek;
28 w_neu=w_n/delta_w;
29 Tn=Tn*delta_w;
30 %Tv=0.25*Tn;TR=0.1*Tv; % auch möglich
31 %% Sektion 4: Vertikale Verschiebung D in Dneu
32 delta_dB=9;
33 delta_g1=10^(delta_dB/20);
34 g1=g1*delta_g1;
35 %% Sektion 5: Sprungantwort
36 figure
37 GR=g1*KpR*(1+s*Tn)*(1+s*Tv)/(s*Tn); % ÜF des PID-Reglers
38 G0=Gs*GR;% offener Kreis
39 Gw=G0/(1+G0);% geschlossener Kreis
40 step(Gw,10); grid % Regelgröße
41 %step(Gs,100); % Strecke (wenn nötig)
42 hold on

```

Es ergibt sich $g_1 = 1$




```

1  %% Sektion 1: Eingabe
2  s=tf('s'); % Laplace-Operator
3  KpS=0.2; T=2; % Streckenparameter
4  Gs=KpS^3/(1+s*T)^3; % ÜF(Übertragungsfunktion) der Strecke
5  KpR=32.37; Tn=T; Tv=0.25*T; % Reglerparameter
6  g3=1;
7  GR=g3*KpR*(1+s*Tn)*(1+s*Tv)/(s*Tn); % ÜF des PID-Reglers
8  w_n=1/Tn;% Knickpunkt: w ist omega
9  %% Sektion 2: Drei Bode-Plots
10 GR=g3*KpR*(1+s*Tn)*(1+s*Tv)/(s*Tn); % ÜF des PID-Reglers
11 GRsymm_mag=1/GR; % Symmetrischer Regler
12 GR_phs=1/(s^2*GR); %Phasen-symmetischer Regler
13 wmin=0.01;wmax=10;% Fenster Frequenzbereich
14 bode(Gs,{wmin,wmax}); hold on;grid %Bode-Plot der Strecke
15 subplot(211); %Amplitudengang
16 bodemag(Gs,{wmin,wmax}); hold on %Fenster öffnen und halten
17 opts_mag=bodeoptions('cstprefs');
18 opts_mag.PhaseVisible='off';
19 h_mag=bodeplot(GRsymm_mag,{wmin,wmax},opts_mag); hold on;grid
20 subplot(212); %Phasengang
21 bode(Gs,{wmin,wmax}); hold on %Fenster öffnen und halten
22 opts_ph=bodeoptions('cstprefs');
21 bode(Gs,{wmin,wmax}); hold on %Fenster öffnen und halten
22 opts_ph=bodeoptions('cstprefs');
23 opts_ph.MagVisible='off';
24 h_ph=bodeplot(GR_phs,{wmin,wmax}, opts_ph); hold on;grid

```

```

1  %% Sektion 1: Eingabe
2  s=tf('s'); % Laplace-Operator
3  KpS=0.2; T=2; % Streckenparameter
4  Gs=KpS^3/(1+s*T)^3; % ÜF(Übertragungsfunktion) der Strecke
5  KpR=32.37; Tn=T; Tv=0.25*T; % Reglerparameter
6  g3=1;
7  GR=g3*KpR*(1+s*Tn)*(1+s*Tv)/(s*Tn); % ÜF des PID-Reglers
8  w_n=1/Tn;% Knickpunkt: w ist omega
9  %% Sektion 2: Drei Bode-Plots
10 GR=g3*KpR*(1+s*Tn)*(1+s*Tv)/(s*Tn); % ÜF des PID-Reglers
11 GRsymm_mag=1/GR; % Symmetrischer Regler
12 GR_phs=1/(s^2*GR); %Phasen-symmetischer Regler
13 wmin=0.01;wmax=10;% Fenster Frequenzbereich
14 bode(Gs,{wmin,wmax}); hold on;grid %Bode-Plot der Strecke
15 subplot(211); %Amplitudengang
16 bodemag(Gs,{wmin,wmax}); hold on %Fenster öffnen und halten
17 opts_mag=bodeoptions('cstprefs');
18 opts_mag.PhaseVisible='off';
19 h_mag=bodeplot(GRsymm_mag,{wmin,wmax},opts_mag); hold on;grid
20 subplot(212); %Phasengang
21 bode(Gs,{wmin,wmax}); hold on %Fenster öffnen und halten
22 opts_ph=bodeoptions('cstprefs');
21 bode(Gs,{wmin,wmax}); hold on %Fenster öffnen und halten
22 opts_ph=bodeoptions('cstprefs');
23 opts_ph.MagVisible='off';
24 h_ph=bodeplot(GR_phs,{wmin,wmax}, opts_ph); hold on;grid

```

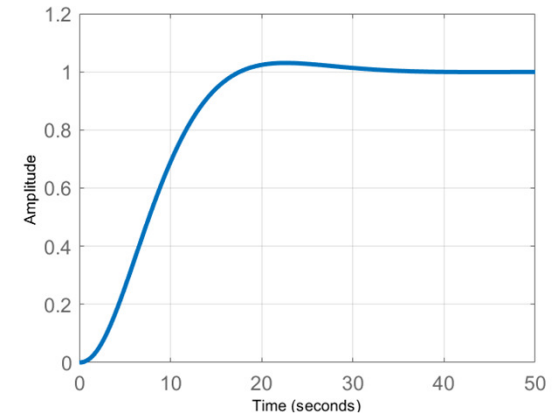
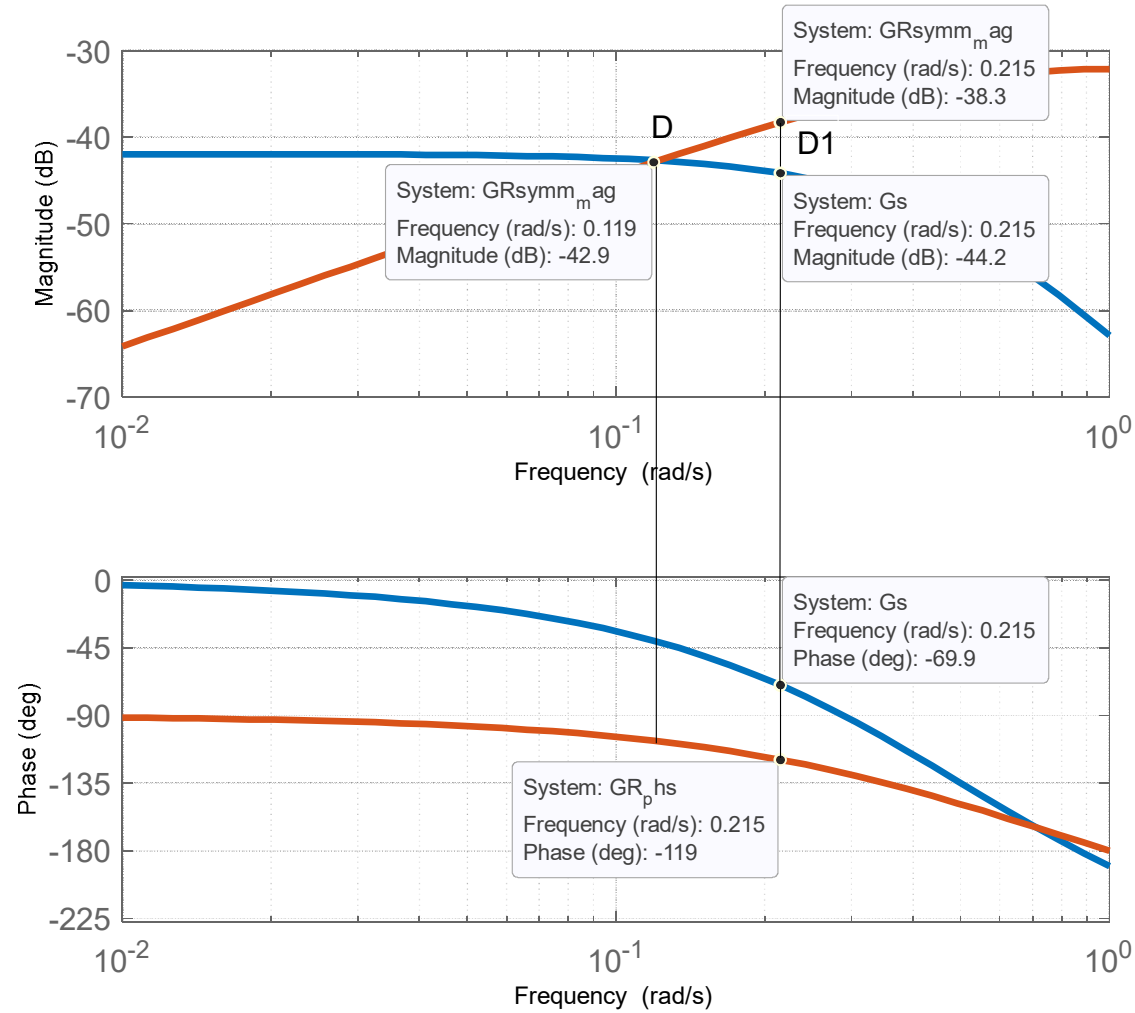
```

31 %% Sektion 4: Vertikale Verschiebung D in Dneu
32 delta_dB=9;
33 delta_g3=10^(delta_dB/20);
34 g3=g3*delta_g3;
35 %% Sektion 5: Sprungantwort
36 figure
37 GR=g3*KpR*(1+s*Tn)*(1+s*Tv)/(s*Tn); % ÜF des PID-Reglers
38 G0=G0*GR;% offener Kreis
39 Gw=G0/(1+G0);% geschlossener Kreis
40 step(Gw,50); grid % Regelgröße
41 %step(Gs,100); % Strecke (wenn nötig)
42 hold on

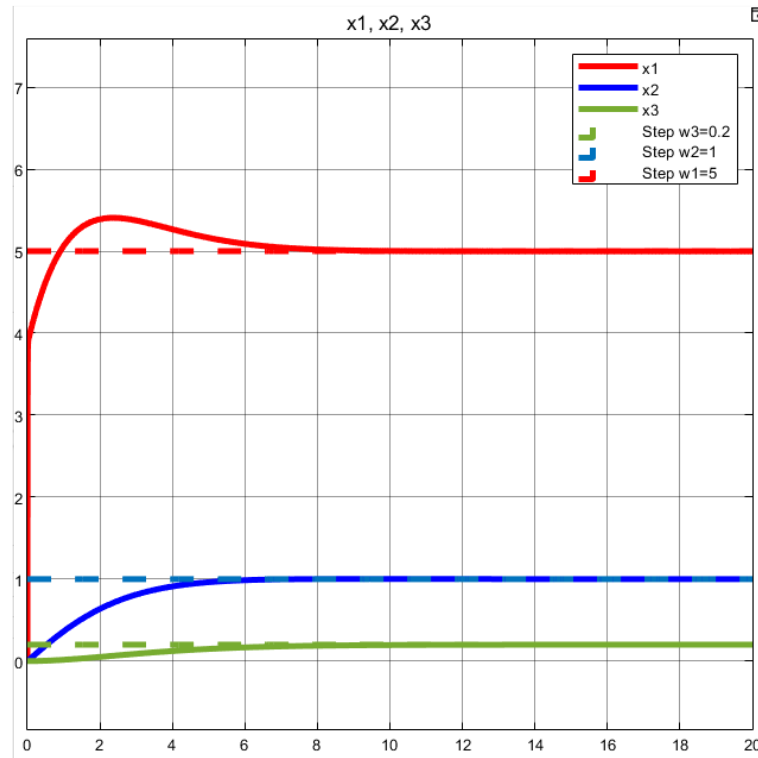
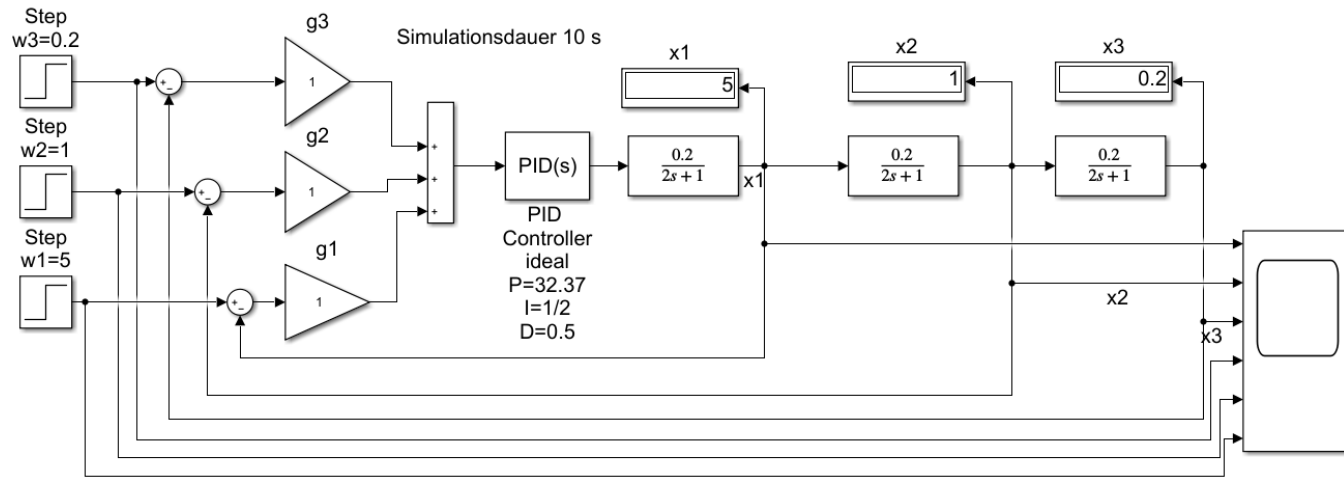
```

Workspace	
Name ^	Value
G0	1x1 tf
g3	1
GR	1x1 tf
GR_phs	1x1 tf
GRsymm_...	1x1 tf
Gs	1x1 tf
Gw	1x1 tf
h_mag	1x1 handle
h_ph	1x1 handle
KpR	32.3700
KpS	0.2000
opts_mag	1x1 BodePlo...
opts_ph	1x1 BodePlo...
s	1x1 tf
T	2
Tn	2
Tv	0.5000
w_n	0.5000
wmax	10
wmin	0.0100

Es ergibt sich $g_3 = 1$



Die Simulation für
 $g_1 = 1$
 $g_2 = 1$
 $g_3 = 1$
 $K_{PR} = 32,37$
 $T_n = 2$
 $T_v = 0.5$
 ist unten gezeigt.



10 Literaturverzeichnis (Zugegriffen 16.04.2021)

- [1] Zacher; S: *Regelungstechnik mit Data Stream Management*. Springer-Vieweg Verlag, Erscheinungsdatum 24.05.2021
<https://www.springer.com/gp/book/9783658308599>
- [2] Zacher, S. Reuter, M: *Regelungstechnik für Ingenieure*. 15. Auflage, Springer-Vieweg Verlag, 2017
<https://www.springer.com/gp/book/9783658176310>
- [3] Zacher, S.: *Bus-Approach for Feedback MIMO-Control*, 2014, Verlag Dr. Zacher, Stuttgart, ISBN 978-3-937638-24-9. <https://www.szacher.de/New-Concepts-of-Control/>
- [4] Zacher; S: *Drei-Bode-Plots-Verfahren für Regelungstechnik*. Springer-Vieweg Verlag, 2020
<https://www.springer.com/gp/book/9783658292195>