Dr. Serge ZACHER VERLAG
Stuttgart
D-70188

Automation-Letter Nr. 1

Angefangen: 01.11.2015
Aktueller Stand 30.03.2023

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

FAQ Reglereinstellung

Die meistgestellten Fragen
von Studierenden der Regelungstechnik

„Ein optimal eingestellter Regelkreis soll mit möglichst geringer Regeldifferenz einerseits und möglichst großer Dämpfung andererseits arbeiten. Diese Forderungen widersprechen sich. Beispielsweise führt die Vergrößerung des P- bzw. des I-Anteils eines Reglers bei Regelkreisen mit P-Strecken zur Verringerung der bleibenden Regeldifferenz, gleichzeitig jedoch auch zur Verringerung der Dämpfung und somit zur Instabilität. Die optimale Reglereinstellung erfolgt durch eine Kompromisslösung, die wiederum von der speziellen Regelaufgabe abhängt.“

S. Zacher, M. Reuter: ***Regelungstechnik für Ingenieure*.**
Seite 221. Springer Vieweg Verlag, 14. Auflage, 2014

Abstract, Urheberrechts- und Haftungshinweis

Der Erfolg beim Entwurf eines Reglers ist im Wesentlichen von Kenntnissen der Regelungstechnik abhängig. Während des Unterrichts scheint alles klar zu sein und die Einstellung von Reglern sieht gar nicht problematisch aus. Bei Studien-, Praktikums- oder auch bei Abschlussarbeiten ändert sich plötzlich die Situation: der Regelkreis verhält sich ganz anders als erwartet. Die beim Unterricht fertig gestellten Formeln versagen. Es scheint unmöglich zu sein, ein wünschenswertes Regelkreisverhalten zu erstellen und Gütekriterien optimal oder in gegebenen Grenzen zu halten. Die Ursachen sind nicht nur die möglichen eigenen fehlerhaften Berechnungen, sondern auch die Annahmen der klassischen Regelungstechnik darüber, dass die Strecken linear, die Stellgrößen unbegrenzt, die Parameter von Strecken dimensionslos und konstant sind.

Früher hatte ich jede einzelne Frage per Mail geantwortet. Da einige Frage von Studierenden immer wieder auftauchten, kam die Serie „Automation-Letters" zustande, die sich später als eine Plattform für Express-Informationen auch zu neuen Verfahren entwickelte. Die Antworten beziehen sich auf sechs Lehrbücher:

1. S. Zacher: *Regelungstechnik mit Data Stream Management*, 2. Auflage, Verlag Springer-Vieweg, 2023.
2. S. Zacher: *Closed Loop Control and Management*. Verlag Springer-Vieweg, 2023.
3. S. Zacher: *Drei-Bode-Plots-Verfahren für Regelungstechnik,* 2. Auflage, Verlag Springer-Vieweg, 2022.
4. S. Zacher; M. Reuter: *Regelungstechnik für Ingenieure*, 16. Auflage. Verlag Springer-Vieweg, 2022.
5. S. Zacher: *Übungsbuch Regelungstechnik*, 7. Auflage, Verlag Springer-Vieweg, 2022.
6. S. Zacher: *Regelungstechnik Aufgaben*, 4. Auflage, Verlag Dr. Zacher, 2016, ISBN 978-3-658-03382-27-0

INHALT:

Frage 1: PI-Regler mit P-T1-Strecke

Ich schreibe aktuell an meiner Bachelorarbeit, in der ich unter anderem einen Regelkreis betrachte. Ich möchte die Parameter des Reglers bestimmen.

Ich möchte nun den Regler so auslegen, dass die Regeldifferenz kompensiert wird. Hierfür finde ich den PI-Regler als gut geeignet. Als Methode für die Parametrierung habe ich die Betragsoptimierung vom Grundtyp B gewählt, da meine Strecke keinen I-Anteil besitzt. Die Details entnehmen Sie bitte den angehängten Dokument.

Bei dem Regelkreis handelt es sich um eine Temperaturregelung. Der Regelkreis sieht wie unten gezeigt aus. Die Strecke habe ich durch Messungen als PT1-Strecke identifizieren können.
Die Parameter lauten K_{ps}= 80°C und T_n= 180 min.

Für den Regler habe ich einen PI-Regler gewählt, da ich keine bleibende Regeldifferenz möchte. Die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises lautet dadurch

$$G_{0_{(s)}} = \frac{K_{PR} \cdot (1 + sT_n)}{sT_n} \cdot \frac{K_{PS}}{(1 + sT_1)}$$

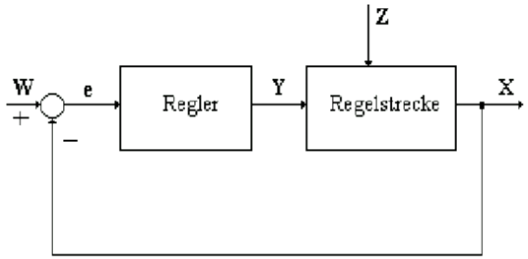
Nach der Kompensation durch $T_n = T_1$ ergibt sich

$$G_{0_{(s)}} = \frac{K_{PR} \cdot K_{PS}}{sT_n}$$

Jetzt möchte ich den Grundtyp *B* anwenden. Ich komme aber nicht auf die geforderte Form die für die Berechnung von K_{PR} benötigt wird.

Habe ich den richtigen Ansatz bei meiner Herangehensweise gewählt?
Vielen Dank für Ihre Unterstützung.

Antwort 1: PI-Regler mit P-T1-Strecke



1. Zunächst merken Sie bitte die Bezeichnung von Variablen nach dem dem Buch Zacher/Reuter „Regelungstechnik für Ingenieure“, nämlich:

   w – Führungsgröße, auch *Sollwert* genannt
   x – Regelgröße, auch *Istwert* genannt
   y – Stellgröße
   z - Störgröße

2. Die Dimension des Proportionalbeiwertes der Strecke

$$K_{PS} = \frac{dX}{dY} = \frac{\Delta X}{\Delta Y}$$

hängt von Dimensionen ΔY und Δ X ab.

Somit stimmt die Dimension

$$K_{PS} = 80°\mathrm{C}$$

nicht. Sie soll entweder °C/V, °C/mA betragen. Oder wird der Proportionalbeiwert für den Fall V/V oder mA/mA dimensionslos.

3. Die Übertragungsfunktion

$$G_0(s) = \frac{K_{PR} K_{PS}}{sT_n}$$

ist weder Grundtyp A, noch Grundtyp B, d.h. das Betragsoptimum nach den vorgegeben Formeln ist nicht anwendbar. Das ist ein reines I-Verhalten. In diesem Fall soll die Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises bestimmt werden:

$$G_w(s) = \frac{K_{PR} K_{PS}}{K_{PR} K_{PS} + sT_n} = \frac{K_{PR} K_{PS}}{K_{PR} K_{PS}\left(1 + s\frac{T_n}{K_{PR} K_{PS}}\right)} = \frac{K_w}{1 + sT_w}$$ mit $K_{Pw} = 1$ und $T_w = \dfrac{T_n}{K_{PR} K_{PS}}$

Also, verhält sich der geschlossene Kreis mit dem kompensierten PI-Regler wie ein P-T1-Verhalten.
Theoretisch kann man K_{PR} beliebig groß wählen, um die T_w (und folglich die Ausregelzeit T_{aus}) beliebig klein machen.
Jedoch sind die Stellgrößen y nicht unbegrenzt, so dass nicht alle Fälle praktisch realisierbar sind.

Nehmen wir an, dass mit dem PI-Regler die Ausregelzeit

$$T_{aus} = 50\,\mathrm{s}$$

erreicht werden soll.
Bekanntlich gilt für P-T1-Verhalten

$$T_{aus} = 3{,}912\,T_w$$

bzw. gerundet:

$$T_{aus} = 4T_w\,,$$

woraus die Regler-Einstellung folgt:

$$T_w = \frac{T_n}{K_{PR}K_{PS}} = \frac{T_{aus}}{4} \quad \Longrightarrow \quad K_{PR} = \frac{4T_n}{K_{PS}T_{aus}}$$

Die Simulation soll zeigen, ob die praktische Realisierung der angenommenen Ausregelzeit möglich ist.

Soll z.B. laut Simulation die maximale Stellgröße y_{max} = 60000 für die Regelung erforderlich sein, werden reelle Aktoren nicht in der Lage solche Stellgröße zu liefern. Man soll die gewünschte Ausregelzeit soweit reduzieren, bis die realisierbare Stellgröße erreicht wird.

Frage 2: PID-Regler mit P-T2-Strecke

Aufgrund einer Praxisarbeit, die zum Teil aus einer Streckenidentifikation samt Einstellung eines PID-Reglers besteht, wende ich mich an Sie mit folgenden Fragen.

a) Wie ist eine Strecke einzuordnen/ identifizieren, deren Verlauf möglichst flach (nahezu eine horizontale Gerade) sein soll?

b) Besteht die Möglichkeit eine P-T2-Strecke mit einem Eingangssprung so zu regeln, dass die Sprungantwort flach verläuft (minimaler Anstieg / minimales Fallen der geregelten Strecke) ? Wenn ja, wie?

Für eine Antwort wäre ich Ihnen sehr dankbar.

Antwort:

a) Wenn die Sprungantwort der Regelgröße $x(t)$ einer Strecke nach einem Eingangssprung bzw. nach einem Sprung der Stellgröße $y(t)$ wie eine horizontale Gerade verläuft (was in der Praxis eher selten vorkommt), dann handelt es sich um einen P-Glied:

$$G_S(s) = K_{PS}$$

In der Realität ist die Strecke entweder ein P-T1-Glied

$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{1+sT_1}$$

oder ein P-Tt-Glied (Totzeit)

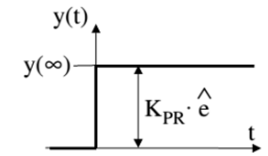
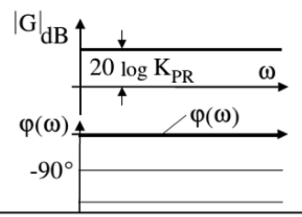
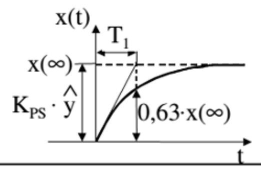
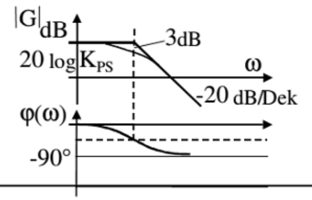
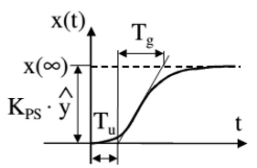
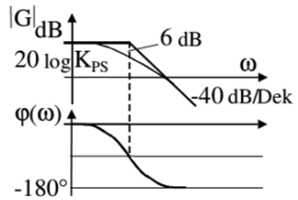
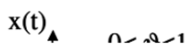
$$G_S(s) = K_{PS}e^{-sT_t}$$

oder auch ein P-T1-Glied mit Totzeit

$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{1+sT_1}e^{-sT_t}$$

Die Zeitkonstanten T_1 oder/und T_t scheinen in Ihrem Fall vernachlässigbar klein zu sein (siehe unten Ausschnitt aus dem Buch S. Zacher „Regelungstechnik Aufgaben“).

1.2.1 Proportionale Elemente mit und ohne Verzögerung

Regler, Strecke	Übertragungsfunktion, Differentialgleichung	Ausgang $x(t)$ oder $y(t)$ Eingang $\hat{y}$ oder $\hat{e}$	Bode-Diagramm
P- Regler	$G_R(s) = K_{PR}$ $y = K_{PR} \cdot e$		
P-T1- Strecke	$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{1+sT_1}$ $T_1\dot{x} + x = K_{PS} \cdot y$		
P-T2- Strecke (aperio-dische) mit T_2=T_1	$G_S = \frac{K_{PS}}{(1+sT_1)^2}$ aperiodisch ($\vartheta \geq 1$) $T_1^2\ddot{x} + 2T_1\dot{x} + x = K_{PS} \cdot y$		
P-T2- Strecke (schwin	$G(s) = \frac{K_{PS}}{\frac{1}{\omega_0^2}s^2 + \frac{2\vartheta}{\omega_0}s + 1}$		

b) Die Definition „die Sprungantwort flach verläuft (minimaler Anstieg / minimales Fallen der geregelten Strecke)“ gibt es in der Regelungstechnik nicht.

Wenn Sie Ihre gewünschte Sprungantwort genau definieren, z.B. als P- oder P-T1-Verhalten (wie im Skript zum Unterricht RT-1 oder im Begleitbuch „Regelungstechnik Aufgaben“, siehe unten), wird es auch möglich, einen entsprechenden Einstellverfahren zu finden.

Angenommen, dass die gewünschte Regelung der vorhandenen P-T2-Strecke

$$G_{\mathrm{S}}(s) = \frac{K_{\mathrm{PS}}}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$$

ein P-T1-Verhalten mit möglichst kleine Ausregelzeit T_{aus} sein soll, wird die Einstellung des reellen PID-Reglers bzw. des PID-T1-Reglers

$$G_{\mathrm{R}}(s) = \frac{K_{\mathrm{PR}}(1+sT_{\mathrm{n}})(1+sT_{\mathrm{v}})}{sT_{\mathrm{n}}(1+sT_{\mathrm{R}})}$$

mit vernachlässigbar kleiner eigener Zeitverzögerung T_{R} des Reglers

$$G_{\mathrm{R}}(s) = \frac{K_{\mathrm{PR}}(1+sT_{\mathrm{n}})(1+sT_{\mathrm{v}})}{sT_{\mathrm{n}}}$$

wie folgt verlaufen.

Die Übertragungsfunktion des aufgeschnittenen Kreises:

$$G_0(s) = \frac{K_{\mathrm{PR}}(1+sT_{\mathrm{n}})(1+sT_{\mathrm{v}})}{sT_{\mathrm{n}}} \frac{K_{\mathrm{PS}}}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$$

Die Nachstellzeit T_n und die Vorhaltzeit T_v werden nach der Kompensationsregel bestimmt:

$$T_\mathrm{n} = T_\text{größte} \quad \text{z.B. } T_\mathrm{n} = T_1$$

$$T_\mathrm{v} = T_\text{zweitgrößte} \quad \text{z.B. } T_\mathrm{v} = T_2$$

Für die somit gekürzte Übertragungsfunktion des aufgeschnittenen Kreises

$$G_0(s) = \frac{K_\mathrm{PR} K_\mathrm{PS}}{s T_\mathrm{n}}$$

bzw. für die Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises

$$G_\mathrm{w}(s) = \frac{K_\mathrm{w}}{1 + s T_\mathrm{w}} \quad \text{mit } K_\mathrm{Pw} = 1 \text{ und } T_\mathrm{w} = \frac{T_\mathrm{n}}{K_\mathrm{PR} K_\mathrm{PS}}$$

gilt gleiche Einstellregel, wie oben in Hinweisen zu Anfrage 1:

$$K_\mathrm{PR} = \frac{4 T_\mathrm{n}}{K_\mathrm{PS} T_\mathrm{aus}}$$

Bei der Realisierung oder Simulation sollen die Eigenschaften eines PID-Reglers beachtet werden:

http://www.zacher-international.com/Automation_Letters/09_PID_Gesichte.pdf

Soll die eigene Zeitverzögerung T_R des Reglers nicht vernachlässigbar sein oder soll der Regler relativ große Abtastzeit haben, wird die Regler-Einstellung nach anderen, etwas komplizierteren, Verfahren durchgeführt.

Frage 3: PD-Regler mit I-T1-Strecke

In meinen Praktikum soll ich einen PD-Regler an eine I-T1-Strecke so einstellen, damit die Regelung innerhalb 4 sec erfolgt.

I-T1-Strecke: $G_S = \frac{K_i}{s(1+T_1 s)}$ mit Ki=0,0328 und T1=0,4

PD-Regler: $G_R = K_{PR}\,(1 + sT_v)$

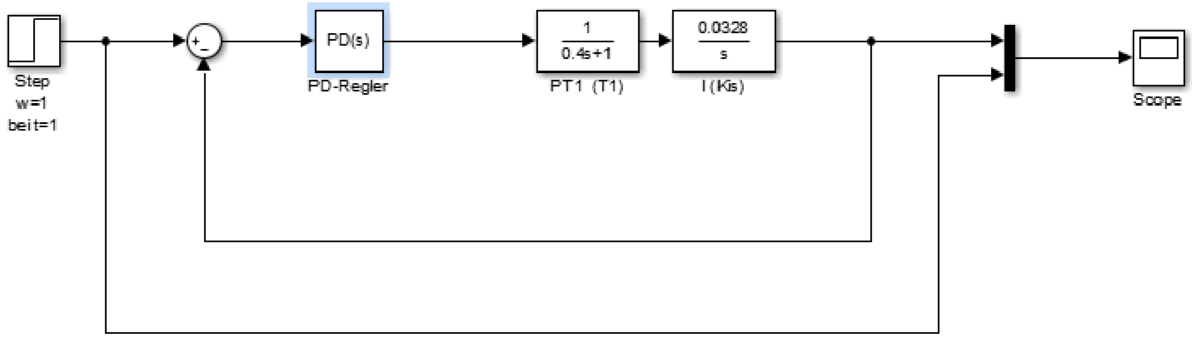
Meine Lösung nach der 1.Version des Praktikumsberichts ist unten gezeigt:

$\rightarrow G(s) = \frac{0{,}0328 * Kpr * (1+sTv)}{s(1+0{,}4)}$

Tv = T1 = 0,4

Kpr=1/Ki=1/0,0328=30,49

$\rightarrow G(s) = \frac{1}{s} \rightarrow G(t) = \sigma(t) = 1$



Dabei ging ich aus folgendem Lösungsansatz:

Reglerentwurf nach Kompensationsverfahren

Ansatz:

$$G_{Regler}(S) = (1+T_S S) * \frac{1}{K_I * T_{RK}}$$

denn:

$$\underbrace{(1+T_S S) * \frac{1}{K_I * T_{RK}}}_{\text{Regler}} * \underbrace{\frac{1}{1+T_S S}\,\frac{K_I}{S}}_{\text{Strecke}} = \underbrace{\frac{1}{T_{RK} S}}_{\text{I-Glied}}$$

$\Longrightarrow$

1.Version:

Standardregler PD für $G_{Regler}(S) = \frac{1+T_S S}{K_{PS}} * \frac{1}{T_{RK} S}$

$$G_R(s) = Kpr * (1 + T_V S)$$

Parameterwahl:

$T_V = T_S$

$K_{PR} = \frac{1}{T_{RK} K_I}$

Meine Lösung nach der 2.Version des Praktikumsberichts sieht etwas anders aus:

$$G_0 = G_R * G_S = \frac{0{,}0328 * K_{PR} * (1+sT_v)}{s(1+s0{,}4)}$$

$\underline{T_v} = T1 = 0{,}4$

$$G_0 = \frac{0{,}0328 * K_{PR} * \cancel{(1+sT_v)}}{s\cancel{(1+s0{,}4)}} = \frac{0{,}0328 * K_{PR}}{s}$$

$\Longrightarrow$

2.Version:

$$K_{PR} = \frac{3{,}9}{K_I * T_{AUS}} \qquad \text{mit Taus=4}$$

$$K_{PR} = \frac{3{,}9}{0{,}0328 * 4} = 29{,}72$$

$$G_0 = \frac{K_{PR} K_I}{s}$$

Ist der Ansatz der 1. Version richtig, bzw. was halten sie davon? Damit kommt man zumindest in etwa auf das gleiche K_{PR}.

Daraus würde bei $T_{RK} = 1$ folgendes resultieren:

$$K_{KP} = \frac{1}{K_I} = \frac{1}{0.0328} = 30{,}49 \quad \text{und } G_0 \text{ wird zu } G_0 = \frac{1}{s}$$

Antwort:

Der Unterschied ist aus dem letzten Ausdruck ersichtlich. Nach der 1.Version mit dem Ansatz $K_{PR} = \dfrac{1}{K_I}$ und der Kompensation T_v=T_1 hat der Regelkries eine feste Ausregelzeit, nämlich T_{aus}=3,9 sec:

1.Version: $G_0(s) = \dfrac{1}{s} \Longrightarrow G_w(s) = \dfrac{G_0(s)}{1+G_0(s)} = \dfrac{1}{1+s}$

2.Version: $G_0(s) = \dfrac{K_{PR} K_I}{s} \Longrightarrow G_w(s) = \dfrac{K_{PR} K_I}{s + K_{PR} K_I}$

P-T1-Verhalten

$$G_w(s) = \frac{K_{Pw}}{1+sT_w}$$

$$K_{Pw} = 1$$

$$T_{aus} = 3{,}9 \cdot T_w = 3{,}9$$

$$T_{aus} = 3{,}9 \cdot T_w = \textit{gewünschte Zeit}$$

Da in Ihrer Praktikumsaufgabe T_{aus} = 4 gefordert ist, der Unterschied gegenüber $Taus$ = 3,9 ist nicht groß.

Nun versuchen wir auch bei 1. Version die gewünschte Ausregelzeit T_{aus} genau zu erreichen. Dafür setzten wir die Zeitkonstante T_{RK} in der 1. Version nicht gleich Eins, sondern wählen wir T_{RK} nach der gewünschten Ausregelzeit T_{aus} aus:

1.Version: $T_{RK} = \dfrac{T_{aus}}{3{,}9} \Longrightarrow K_{PR} = \dfrac{1}{K_I} \Longrightarrow G_0(s) = \dfrac{K_{PR}(1+sT_v)K_I}{sT_{RK}(1+sT_v)} = \dfrac{1}{sT_{RK}} \Longrightarrow G_w(s) = \dfrac{1}{1+sT_{RK}}$

$$\Downarrow$$

$$T_{aus} = 3{,}9 \cdot T_{RK} = 3{,}9 \cdot \frac{T_{RK}}{3{,}9} = \textit{gewünschte Zeit}$$

Daraus folgt die korrekte Lösung nach der 1.Version für gegebene I-T1-Strecke mit T_1 =0,4 und K_I =0,0328, wenn z.B. die gewünschte Ausregelzeit T_{aus} = 8 ist. Zum Vergleich ist unten rechts auch die Lösung nach 2. Version gezeigt. In beiden Fällen gilt die Kompensation $T_v = T_1$.

1.Version: Kompensationsregler

$$G_R(s) = \frac{K_{PR}(1+sT_v)}{T_{RK}} = K_{pr}(1+sT_v)$$

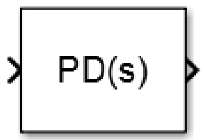
$$T_{RK} = \frac{T_{aus}}{3{,}9} = \frac{8}{3{,}9} = 2{,}05$$

$$K_{PR} = \frac{1}{K_I} = 30{,}49$$

$$K_{pr} = \frac{1}{T_{RK}K_I} = \frac{1}{2{,}05 \cdot 0{,}0328} = 14{,}87$$

Fehler

MATLAB / Simulink Baustein



PD Controller ideal
P=14.9
D=14.9*0.4

2.Version: PD-Standardregler

$$G_R(s) = K_{PR}(1+sT_v)$$

$$K_{PR} = \frac{3{,}9}{K_I T_{aus}} = 14{,}86$$

Frage 4: PI-Regler mit I-Strecke

Ich habe bereits eine Regelstrecke ermittelt. Es handelt sich um eine I-Strecke: $G_S(s) = \frac{K_{iS}}{s} = \frac{0{,}00819}{s}$

Wie kann ich für diese Strecke die Regelparameter für einen PI-Regler bestimmen?

Antwort:

Machen Sie zunächst so, wie wir beim Unterricht gemacht haben, nämlich:

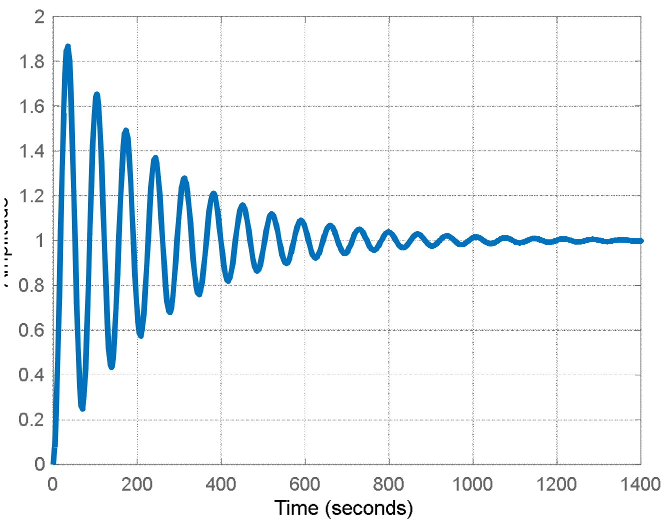
1. Bestimmen Sie die Übertragungsfunktionen des ausgeschnittenen und des geschlossenen Kreises mit dem PI-Regler unter Annahme, dass kein Glied in der Rückführung vorhanden ist:

$$G_0(s) = G_R(s) G_S(s) = \frac{K_{PR}(1+sT_n)K_{iS}}{s^2 T_n}$$

$$G_w(s) = \frac{G_0(s)}{1+G_0(s)} = \frac{K_{PR}K_{iS}(1+sT_n)}{s^2 T_n + K_{PR}K_{iS}(1+sT_n)} = \frac{K_{PR}K_{iS}(1+sT_n)}{s^2 T_n + sT_n K_{PR}K_{iS} + K_{PR}K_{iS}}$$

2. Simulieren Sie probeweise den Regelkreis mit beliebig gewählten Werten, z.B. T_n = 1 und K_{RR} =1.

```
%% Beliebig gewählte Tn und KpR
s=tf('s');
Kis=0.00819; KpR=1;Tn=1;
Gs=Kis/s;
GR=KpR+KpR/(s*Tn);
G0=GR*Gs;
Gw=G0/(1+G0);
step(Gw);grid
```



Der Kreis ist stabil, aber gefällt Ihnen die Regelung mit so kleiner Dämpfung und so großer Ausregelzeit?

Antwort 4: PI-Regler mit I-Strecke

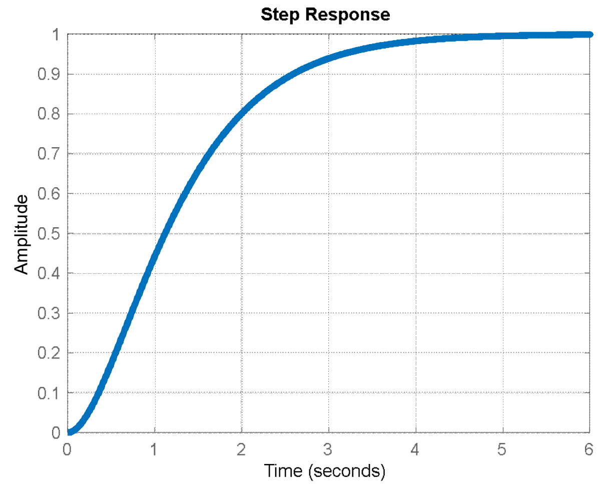
3. Formulieren Sie, welche Güterkriterien soll die Regelung haben.
   Beispielsweise soll die Regelung ohne Überschwingung innerhalb von 5 sec erfolgen, d.h.

$$\vartheta = 1$$

$$T_{aus} = 5$$

4. Nun bestimmen Sie dafür die gewünschten Polstellen. Das sind p1 = p2 = -1.5.
   Simulieren Sie den gewünschten Kreis:

```
%% Gewünschtes Verhalten
s=tf('s');
p1=-1.5; p2=p1;
GM=(p1*p2)/(s^2-(p1+p2)*s+p1*p2);
step(GM)
```



Das Ziel ist erreicht! Sollen Sie trotzdem mit der Regelung nicht zufrieden sein, dann variieren Sie die gewünschten Polstellen.

5. Bestimmen Sie die Kennwerte T_n und K_{RR} so, damit die gewünschten Pole erreicht werden. Die aktuelle und die gewünschte charakteristische Gleichungen werden gegenüber gestellt:

$$s^2 + sK_{PR}K_{iS} + \frac{K_{PR}K_{iS}}{T_n} = s^2 + s(-p_1 - p_2) + p_1 p_2$$

$$K_{PR}K_{iS} = -p_1 - p_2$$

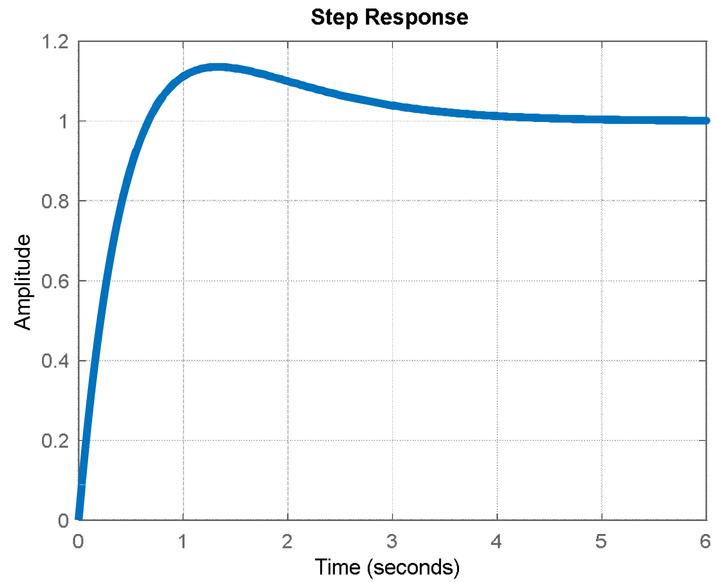
$$\frac{K_{PR}K_{iS}}{T_n} = p_1 p_2$$

Daraus folgt: $K_{PR} = \dfrac{-p_1 - p_2}{K_{iS}}$ $\qquad$ $T_n = \dfrac{K_{PR}K_{iS}}{p_1 p_2}$

6. Simulieren Sie den Regelkreis mit den im vorherigen Punkt berechneten Kennwerten

$$K_{PR} = \frac{-p_1 - p_2}{K_{iS}} = 366{,}3 \qquad T_n = \frac{-p_1 - p_2}{p_1 p_2} = 1{,}33$$

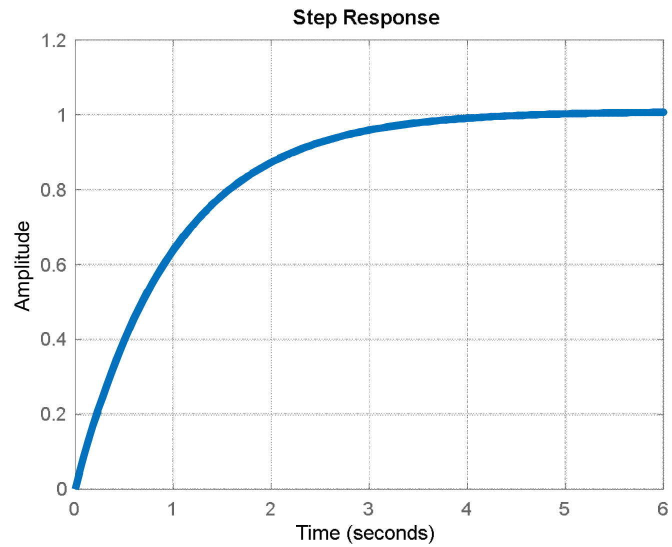
```
%% Reglereinstellung
KpR=(-p1-p2)/Kis;
Tn=p1*p2/(-p1-p2);
GR=KpR+KpR/(s*Tn);
G0=GR*Gs;
Gw=G0/(1+G0);
step(Gw);grid
```



Es erwartet uns eine Überraschung: Zwar ist die gewünschte *T*aus = 5 erreicht, aber die Regelung erfolgt nicht monoton bzw. nicht ohne Überschwingung. Warum? Weil der aktuelle Kreis eine Nullstelle im Nennen bei (-1/Tn) bzw. einen D-Anteil hat, was beim gewünschten Verhalten nicht der Fall war.

7. Kehren wir zum Schritt 4 zurück und ändern wir die gewählten Pole p1 und p2, um die Regelung monoton zu machen.

```
%% D-Anteil eliminieren
p1=-0.01;p2=-1;
KpR=(-p1-p2)/Kis;
Tn=(-p1-p2)/(p1*p2);
GR=KpR+KpR/(s*Tn);
G0=GR*Gs;
Gw=G0/(1+G0);
step(Gw);grid
```



Diskussion:

Frage: Bei Schritt 3 zur Polzuweisung legen Sie die Dämpfung des Systems sowie die Ausregelzeit fest. Wie kommen Sie im Schritt 4 von diesen Werten auf die gewünschten Polstellen, oder muss man diese durch Ausprobieren ermitteln?

Antwort: Man kann natürlich die gewünschten Polstellen durch Ausprobieren ermitteln, aber es wird ziemlich lange dauern.
Am besten soll man die Polstellen aus bekannten Zusammenhängen berechnen, siehe z.B. rechts im Kästchen einen Auszug aus der Seite 2 des Buches S. Zacher „Regelungstechnik Aufgaben", 2016, ISBN 978-3-937638-27-0 oder *Automation-Letter* Nr.2
https://www.zacher-international.com/Automation_Letters/02_Daempfung.pdf

P-T2-Glied: Übertragungsfunktion, Sprungantwort

$$G(s)=\frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2}s^2+\frac{2\vartheta}{\omega_0}s+1}$$

Periodendauer: $T_d=\frac{2\pi}{\omega_d}$

Eigenkreisfrequenz:

$$\omega_d=\omega_0\sqrt{1-\vartheta^2}$$

Durchtrittsfrequenz:

$$\omega_D\approx\omega_d$$

Max. Überschwingweite:

$$\ddot{u}_{max}\,\%=e^{-\vartheta\cdot\omega_0\cdot\frac{T_d}{2}}$$

Ausregelzeit:

$$T_{Aus}=\frac{\ln 25}{\vartheta\omega_0}=\frac{3{,}22}{\vartheta\omega_0}$$

Anzahl der Halbwellen:

$$N=\sqrt{\frac{1}{\vartheta^2}-1}\approx\frac{1}{\vartheta}$$

Im Schritt 3 wurde gewünscht, den Kreis ohne Überschwingung bzw. mit $\vartheta=1$ zu regeln. Dafür sind zwei reelle negative Pole *p1* und *p2* nötig. Anstelle Formel im Kästchen rechts für Schwingungen mit Eigenkreisfrequenz $\omega 0$ und Periodendauer *Td*

$$T_{aus}=\frac{\ln 25}{\vartheta\omega_0}=\frac{3{,}22}{\vartheta\omega_0}$$

kommt folgende Formel für P-T1-Verhalten der Seite 6 des *Automation-Letters* Nr. 16 zum Einsatz:
https://www.zacher-international.com/Automation_Letters/16_gewuenschtes_Verhalten.pdf

$$T_{aus}=3{,}9T_M$$

Bei dieser Ausregelzeit wird 98% des Endwertes der Regelgröße x(∞) erreicht. In praktischen Fällen wird oft $T_{aus}=4T_M$ oder sogar $T_{aus}=5*T_M$ angenommen.

Angepasst für P-T2-Verhalten mit zwei gleichen Polstellen folgt daraus für die gewünschte Ausregelzeit *Taus*= 5:

$$p_1=p_2=-\frac{1}{0{,}5T_M}=-\frac{3{,}9}{0{,}5\cdot 5}=-1{,}5$$

Frage: Woher kommt die Formel p1 = p2 = – 1/(0,5*TM) auf vorheriger Seite?

Antwort: In der *Automation-Letter* Nr.16
https://www.zacher-international.com/Automation_Letters/16_gewuenschtes_Verhalten.pdf

ist auf der Seite 6 gezeigt, dass die Dauer T_{aus} der Sprungantwort eines P-T1-Gliedes T_{aus} = 3,9T_M beträgt, wobei T_M die Zeitverzögerung des P-T1-Gliedes ist. Falls z.B. K_{PR} =100 und T_{M1} =10 s sind, dann wird T_{aus} = 39 s. Dabei erreicht die Regelgröße 98% des Endwertes.

Nun sollen zwei nacheinander verschaltete P-T1-Glieder mit gleicher Ausregelzeit T_{aus} geregelt werden. Der Zusammenhang zwischen T_{aus} und T_M ist in diesem Fall ziemlich kompliziert und wird oft nicht genau, sondern angenähert ermittelt. Um dieselbe Dauer wie im vorherigen Beispiel T_{aus} = 39 s eines P-T2-Gliedes mit zwei gleichen Zeitkonstanten T_M zu erreichen, soll T_M nicht mehr T_{M1} =10 s, sondern angenähert die Hälfte davon betragen, d.h. T_{M2} = 0,5*T_{M1}= 5 s.

Die Polstellen sind dabei p1 = p2 = –1/ T_{M2} = –1/ 5 = – 0,2.

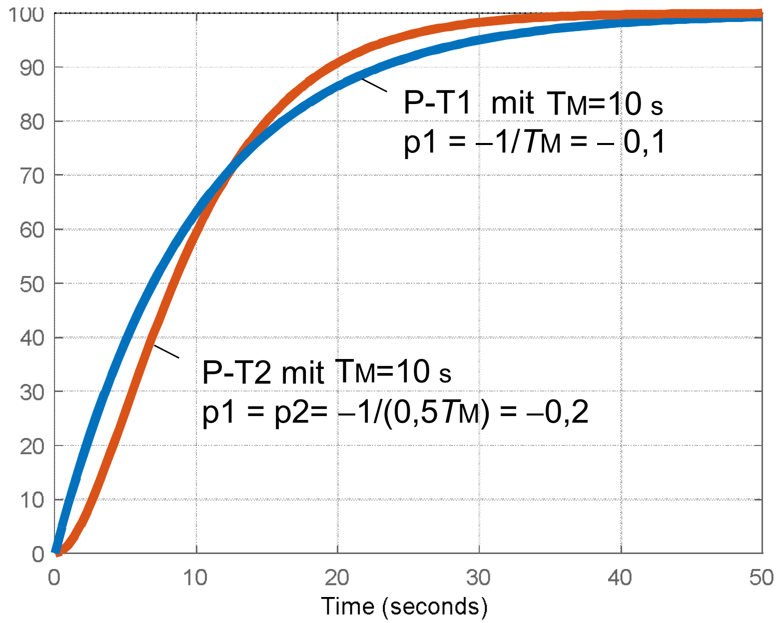
In Bezug auf die Zeitkonstante T_{M1} =10 s gilt p1 = p2 = –1/ (0,5*T_{M1})= –1/ (0,5*10) =– 0,2.

```
s=tf('s'); Taus=50;
KpM=100; TM=Taus/5;
p1 = - 1/TM;
G=KpM/(1+s*TM);
step(G, 50); grid
```

$$G_M(s) = \frac{K_{PM}}{1 + sT_M}$$

```
s=tf('s'); Taus=50;
KpM=100; TM=Taus/5;
p1= -1/(0.5*TM); p2=p1;
G=KpM/(1+s*0.5*TM)^2;
step(G, 50); grid
```

$$G_M(s) = \frac{K_{PM}}{(1 + 0,5sT_M)^2}$$



Frage: Warum enthält das gewünschte Verhalten GM in Schritt 4 im Zähler (p1*p2)?

Antwort: Eigentlich ist der Zähler der Übertragungsfunktion *G*M(*s*) des geschlossenen Kreises für das dynamische Verhalten bzw. für die gewünschte Dämpfung und Ausregelzeit ohne Bedeutung.

Jedoch davon ist das statische Verhalten des Kreises im geregelten Zustand abhängig (siehe *Grenzwertsatz* unten).

Grenzwertsatz:

$$x(\infty) = \lim_{t\to\infty} x(t) = \lim_{s\to 0} G_{\mathrm{w}}(s)\cdot \hat{w}$$

Bleibende Regeldifferenz:

$$e(\infty) = \hat{w} - x(\infty)$$

Quelle: S. Zacher. „Regelungstechnik Aufgaben“, 2016, Seite 1, ISBN 978-3-937638-27-0

Um ohne bleibende Regeldifferenz e(∞) zu regeln, muss gelten:

$$\lim_{s\to 0} G_{\mathrm{M}}(s) = 1$$

Diese Bedingung wird erfüllt, wenn im Zähler der gewünschten Übertragungsfunktion *G*M(*s*) eben p1*p2 steht:

$$G_{\mathrm{M}}(s) = \frac{p_1 p_2}{s^2 + s(-p_1 - p_2) + p_1 p_2}$$

Übrigens die diskutierte Regelung der I-Strecke mit dem PI-Regler erfolgt auch ohne bleibende Regeldifferenz:

$$\lim_{s\to 0} G_{\mathrm{w}}(s) = \lim_{s\to 0} \frac{K_{\mathrm{PR}} K_{\mathrm{iS}} (1 + sT_{\mathrm{n}})}{s^2 T_{\mathrm{n}} + sT_{\mathrm{n}} K_{\mathrm{PR}} K_{\mathrm{iS}} + K_{\mathrm{PR}} K_{\mathrm{iS}}} = 1$$

Frage: Bei Schritt 6 wird erklärt, dass die Überschwingung durch den D-Anteil bewirkt wird. Dieser D-Anteil ist nach Änderung der Pole doch immer noch vorhanden, warum gibt es dann keine Überschwingung mehr?

Antwort:

Mit Polstellen $p_1 = p_2 = -1,5$ erfolgt die Regelung mit gewünschter Ausregelzeit *T*aus=5 , es gibt aber einen D-Anteil bzw. eine Nullstelle

$$s_{\mathrm{N1}} = -\frac{1}{T_\mathrm{n}} = -\frac{1}{1,33} = -0.75$$

Mit neuen Polstellen

$$p_1 = -0,01 \qquad p_2 = -1$$

gilt:

$$T_\mathrm{n} = \frac{-p_1 - p_2}{p_1 p_2} = 101 \quad \Rightarrow \quad s_{\mathrm{N1}} = -\frac{1}{T_\mathrm{n}} = -\frac{1}{101} = -0.0099 \approx -0.01$$

$$K_{\mathrm{PR}} = \frac{-p_1 - p_2}{K_{\mathrm{iS}}} = \frac{0,01+1}{0,0082} = 123,3$$

Dabei wird die Nullstelle s_{N1} von der Polstelle $p1$ kompensiert:

$$p_1 = s_{\mathrm{N1}} = -0,01$$

Somit verschwindet der D-Anteil und die Regelung ohne Überschwingung erfolgt:

$$G_\mathrm{w}(s) = \frac{K_{\mathrm{PR}} K_{\mathrm{iS}} (1 + sT_\mathrm{n})}{s^2 T_\mathrm{n} + sT_\mathrm{n} K_{\mathrm{PR}} K_{\mathrm{iS}} + K_{\mathrm{PR}} K_{\mathrm{iS}}} = \frac{K_{\mathrm{PR}} K_{\mathrm{iS}} \cancel{(s - s_{\mathrm{N1}})}}{\cancel{(s - p_1)}(s - p_2)} = \frac{K_{\mathrm{PR}} K_{\mathrm{iS}}}{s + 1}$$

Frage: Trotzdem ist es unklar, wie man die gewünschten Polstellen *p1*= – 0,01 und *p2*= –1 ermittelt.

Antwort:

Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises, bestehend aus der gegebenen I-Strecke mit dem PI-Regler, wurde bereits ermittelt.

$$G_{\mathrm{w}}(s)=\frac{K_{\mathrm{PR}}K_{\mathrm{iS}}(1+sT_{\mathrm{n}})}{s^2T_{\mathrm{n}}+sT_{\mathrm{n}}K_{\mathrm{PR}}K_{\mathrm{iS}}+K_{\mathrm{PR}}K_{\mathrm{iS}}}=\frac{K_{\mathrm{PR}}K_{\mathrm{iS}}\left(s+\dfrac{1}{T_{\mathrm{n}}}\right)}{s^2+sK_{\mathrm{PR}}K_{\mathrm{iS}}+\dfrac{K_{\mathrm{PR}}K_{\mathrm{iS}}}{T_{\mathrm{n}}}}=\frac{K_{\mathrm{PR}}K_{\mathrm{iS}}\left(s-s_{\mathrm{N1}}\right)}{(s-p_1)(s-p_2)}$$

Es ist gewünscht, die Nullstelle s_{N1} mit einer Polstelle *p1* zu kompensieren, d.h.:

$$p_1=s_{\mathrm{N1}}=-\frac{1}{T_{\mathrm{n}}}\quad\Rightarrow\quad G_{\mathrm{w}}(s)=\frac{K_{\mathrm{PR}}K_{\mathrm{iS}}}{(s-p_2)}$$

Die zweite Polstelle *p2* soll die Regelung mit der gewünschten Ausregelzeit $T_{\mathrm{aus}}\cong 3{,}9T_{\mathrm{M}}$ oder angenähert $T_{\mathrm{aus}}\cong 5T_{\mathrm{M}}$ gewährleisten, siehe Seite 6 des Automation-Letter Nr. 16:
https://www.zacher-international.com/Automation_Letters/16_gewuenschtes_Verhalten.pdf

$$p_2=-\frac{1}{T_{\mathrm{M}}}=-\frac{5}{T_{\mathrm{aus}}}$$

Im betrachteten Fall ist T_{aus} = 5 s gewünscht, so dass $p_2=-1$ ist.

Um D-Anteil zu reduzieren, wird empfohlen: $p_1=\dfrac{p_2}{100}$ Im betrachteten Fall wird $p_1=-0{,}01$.

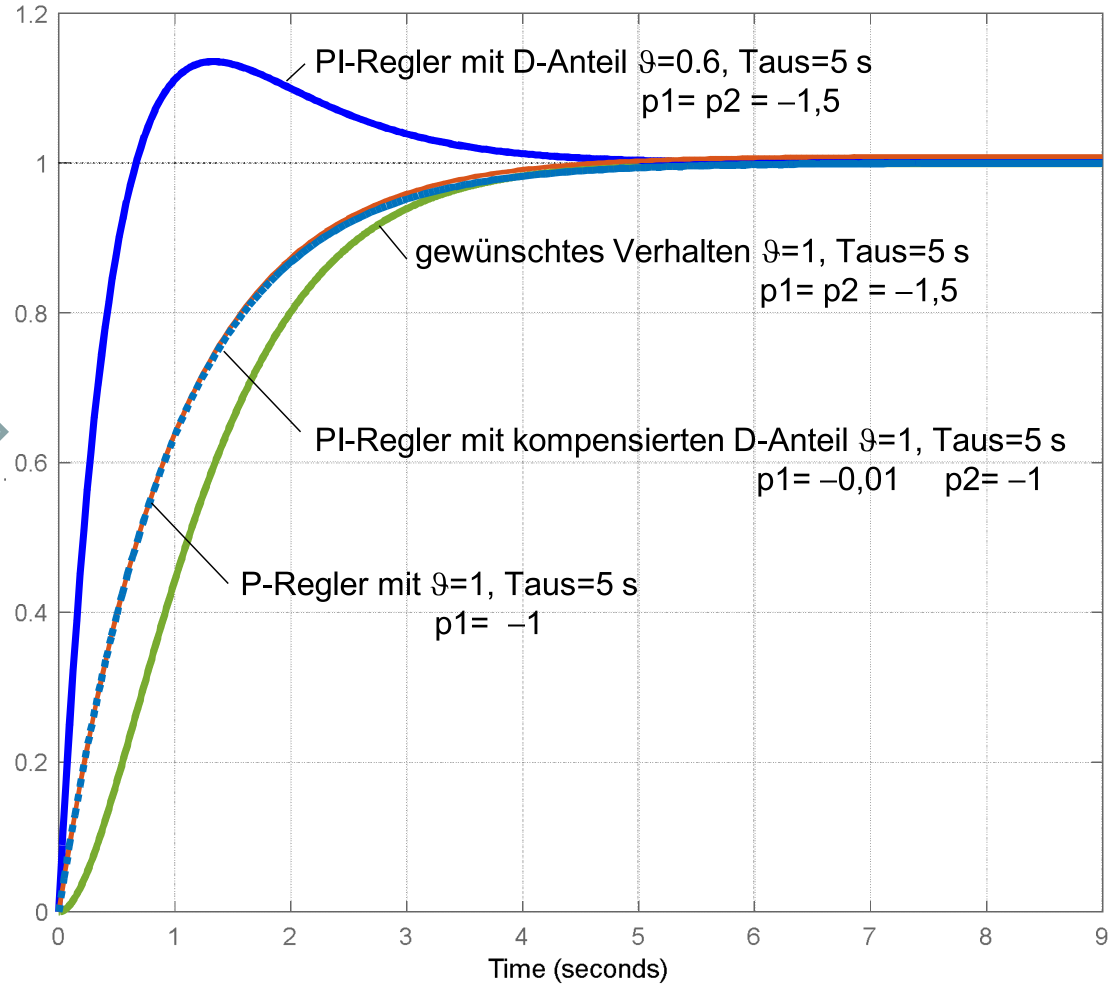
Daraus werden die Reglerparameter K_{PR} und T_{n} für eine Regelung ohne Überschwingung ermittelt:

$$K_{\mathrm{PR}}=\frac{-p_1-p_2}{K_{\mathrm{iS}}}=\frac{0{,}01+1}{0{,}0082}=123{,}3\qquad T_{\mathrm{n}}=\frac{-p_1-p_2}{p_1p_2}=\frac{0{,}01+1}{0{,}01\cdot 1}=101$$

```
%% Lösungskontrolle
s=tf('s');
Taus=5; % Eingabe Ausregelzeit
Kis=0.00819;
Gs=Kis/s; %I-Strecke
%% gewünschtes Verhalten
p2=-5/Taus; p1=p2;
GM=(p1*p2)/(s^2-(p1+p2)*s+p1*p2);
step(GM);hold on; grid
%% PI-Regler
%% Polzuweisung mit D-Anteil
KpR=(-p1-p2)/Kis;
Tn=(-p1-p2)/(p1*p2);
GR=KpR+KpR/(s*Tn);
G0=GR*Gs;
Gw=G0/(1+G0);
step(Gw);grid
%% D-Anteil kompensieren
p2=-3.9/Taus;
p1=0.01*p2;
KpR=(-p1-p2)/Kis;
Tn=(-p1-p2)/(p1*p2);
GR=KpR+KpR/(s*Tn);
G0=GR*Gs; Gw=G0/(1+G0);
step(Gw);hold on; grid
%% P-Regler zum Vergleich
GR=KpR;
G0=GR*Gs; Gw=G0/(1+G0);
step(Gw);hold on; grid
```

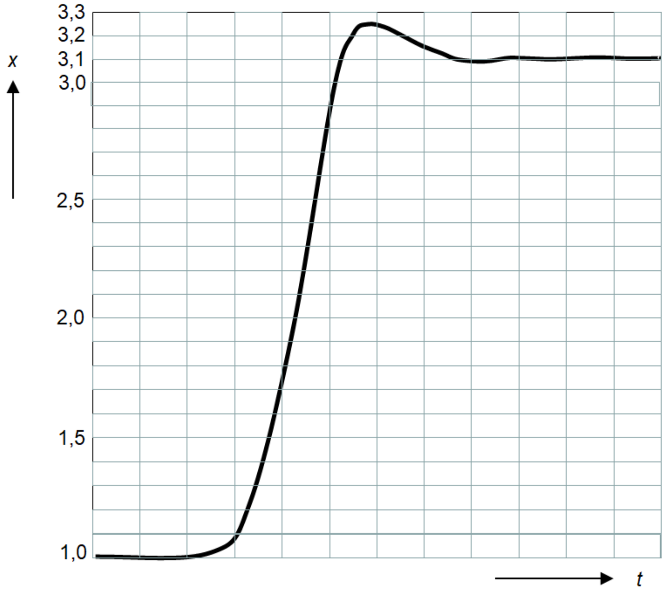
Abschließend sind die Sprungantworten des gewünschten Verhaltens mit den oben diskutierten PI-Regler-Optionen ohne und mit kompensiertem D-Anteil miteinander sowie mit einem P-Regler verglichen.

Beim Führungsverhalten ist die Regelung mit der P-Regler fast identisch dem kompensierten PI-Regler. Jedoch bei Störverhalten hinterlässt der P-Regler eine bleibende Regeldifferenz e(∞), während der PI-Regler vollständig beseitigt die bleibende Regeldifferenz bzw. e(∞) =0.



Diskussion zu Frage 4: PI-Regler mit I-Strecke

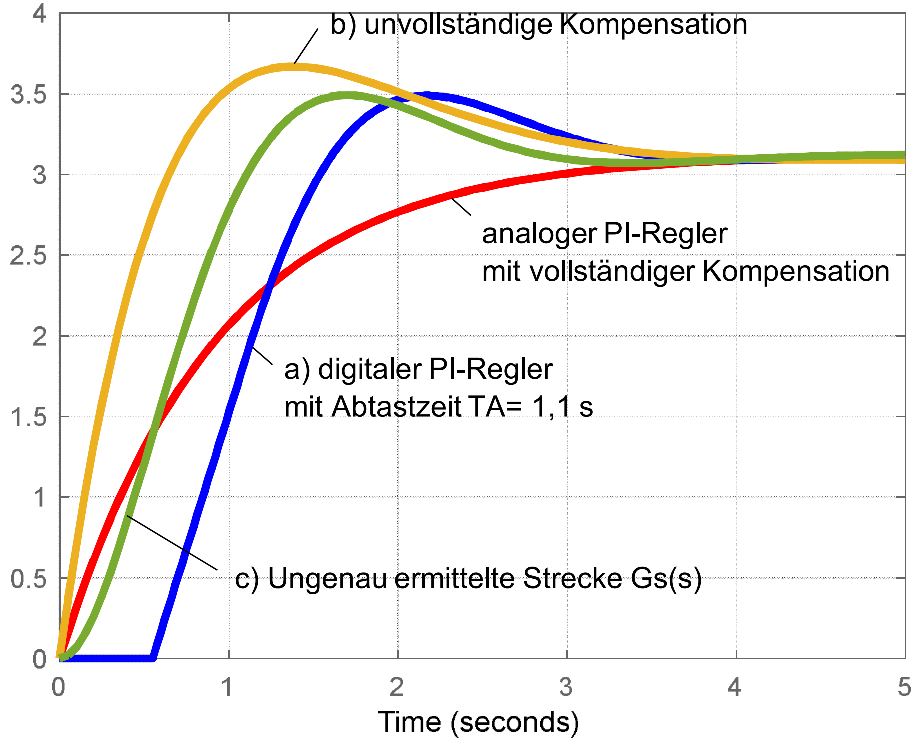
Frage: Ich habe die Strecke mit den berechneten Werten K_{PR}=133 und T_n = 101 s auf einen Sollwert w= 3,1 geregelt. Dabei sollte ein Verhalten ohne Überschwingung entstehen. Woher kommt hierbei im realen System die Überschwingung (Bild rechts)?



Antwort:
Dafür können verschiedene Gründe sein:

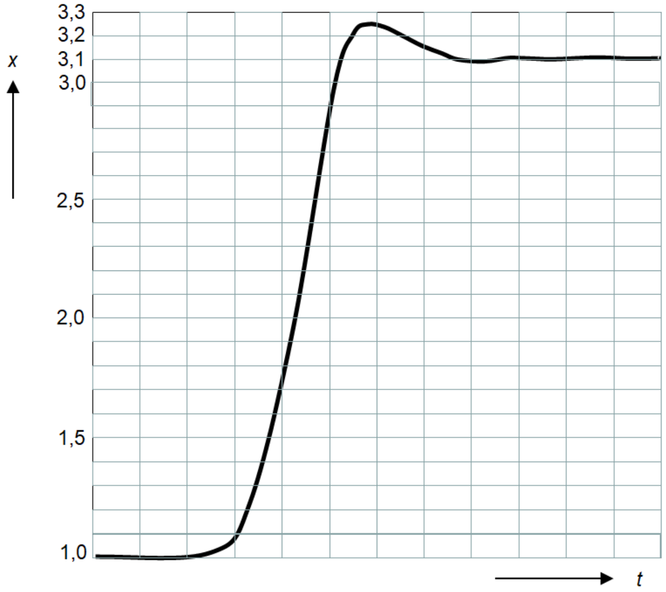
a) Die Abtastzeit T_A des realen Reglers
b) Die Ungenauigkeit des Streckenparameters K_{is}
c) Die nicht vollständige Kompensation der Vorhaltezeit des Reglers T_n
d) Nichtlinearitäten, Störungen usw.

```
%% analoger PI-Regler
s=tf('s');w=3.1; Taus=5;
Kis=0.00819; KpR=133;Tn=101;
Gs=Kis/s; GR=KpR+KpR/(s*Tn);
G0=GR*Gs; Gw=G0/(1+G0);
step(w*Gw,5);hold on; grid
%% a) Abtastzeit TA des digitalen
TA=1.1;
GTt=exp(-0.5*TA*s);
G0=GR*GTt*Gs; Gw=G0/(1+G0);
step(w*Gw,5);hold on; grid
%% b) unvollständige Kompensation
Kis=0.00819; KpR=300;Tn=1.01;
Gs=Kis/s; GR=KpR+KpR/(s*Tn);
G0=GR*Gs; Gw=G0/(1+G0);
step(w*Gw,5);hold on; grid
%% c) Ungenauigkeit Gs
Kis=0.015;T1=0.4;
Gs=Kis/(s*(1+s*T1));
KpR=133;Tn=101;
GR=KpR+KpR/(s*Tn);
G0=GR*Gs;Gw=G0/(1+G0);
```



Diskussion zu Frage 4: PI-Regler mit I-Strecke

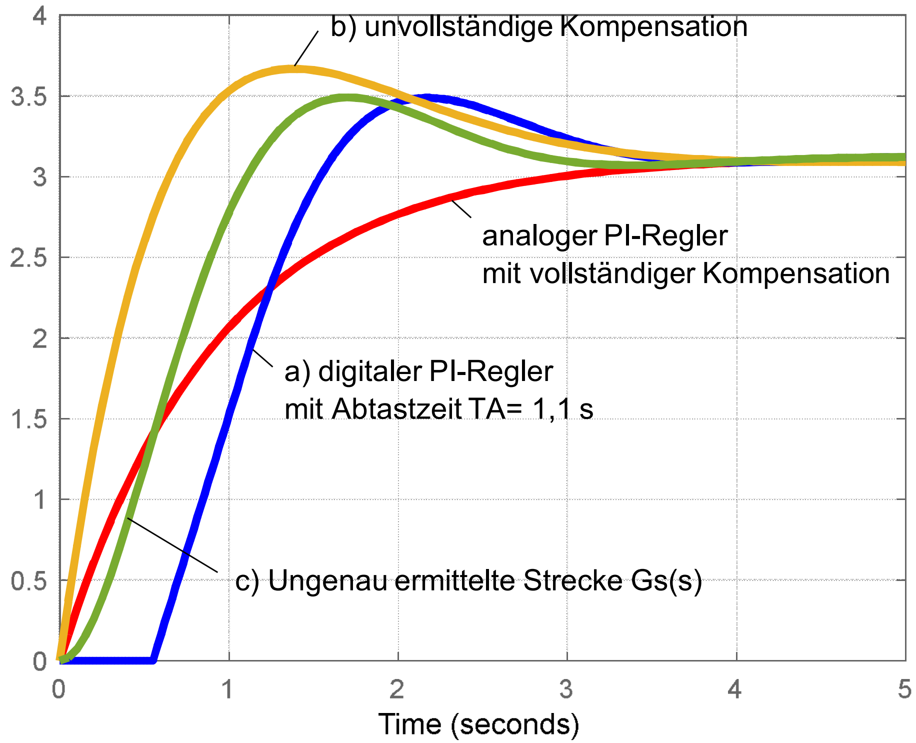
Frage: Ich habe die Strecke mit den berechneten Werten K_{PR}=133 und T_n = 101 s auf einen Sollwert w= 3,1 geregelt. Dabei sollte ein Verhalten ohne Überschwingung entstehen. Woher kommt hierbei im realen System die Überschwingung (Bild rechts)?



Antwort:
Dafür können verschiedene Gründe sein:

a) Die Abtastzeit T_A des realen Reglers
b) Die Ungenauigkeit des Streckenparameters K_{is}
c) Die nicht vollständige Kompensation der Vorhaltezeit des Reglers T_n
d) Nichtlinearitäten, Störungen usw.

```
%% analoger PI-Regler
s=tf('s');w=3.1; Taus=5;
Kis=0.00819; KpR=133;Tn=101;
Gs=Kis/s; GR=KpR+KpR/(s*Tn);
G0=GR*Gs; Gw=G0/(1+G0);
step(w*Gw,5);hold on; grid
%% a) Abtastzeit TA des digitalen
TA=1.1;
GTt=exp(-0.5*TA*s);
G0=GR*GTt*Gs; Gw=G0/(1+G0);
step(w*Gw,5);hold on; grid
%% b) unvollständige Kompensation
Kis=0.00819; KpR=300;Tn=1.01;
Gs=Kis/s; GR=KpR+KpR/(s*Tn);
G0=GR*Gs; Gw=G0/(1+G0);
step(w*Gw,5);hold on; grid
%% c) Ungenauigkeit Gs
Kis=0.015;T1=0.4;
Gs=Kis/(s*(1+s*T1));
KpR=133;Tn=101;
GR=KpR+KpR/(s*Tn);
G0=GR*Gs;Gw=G0/(1+G0);
```

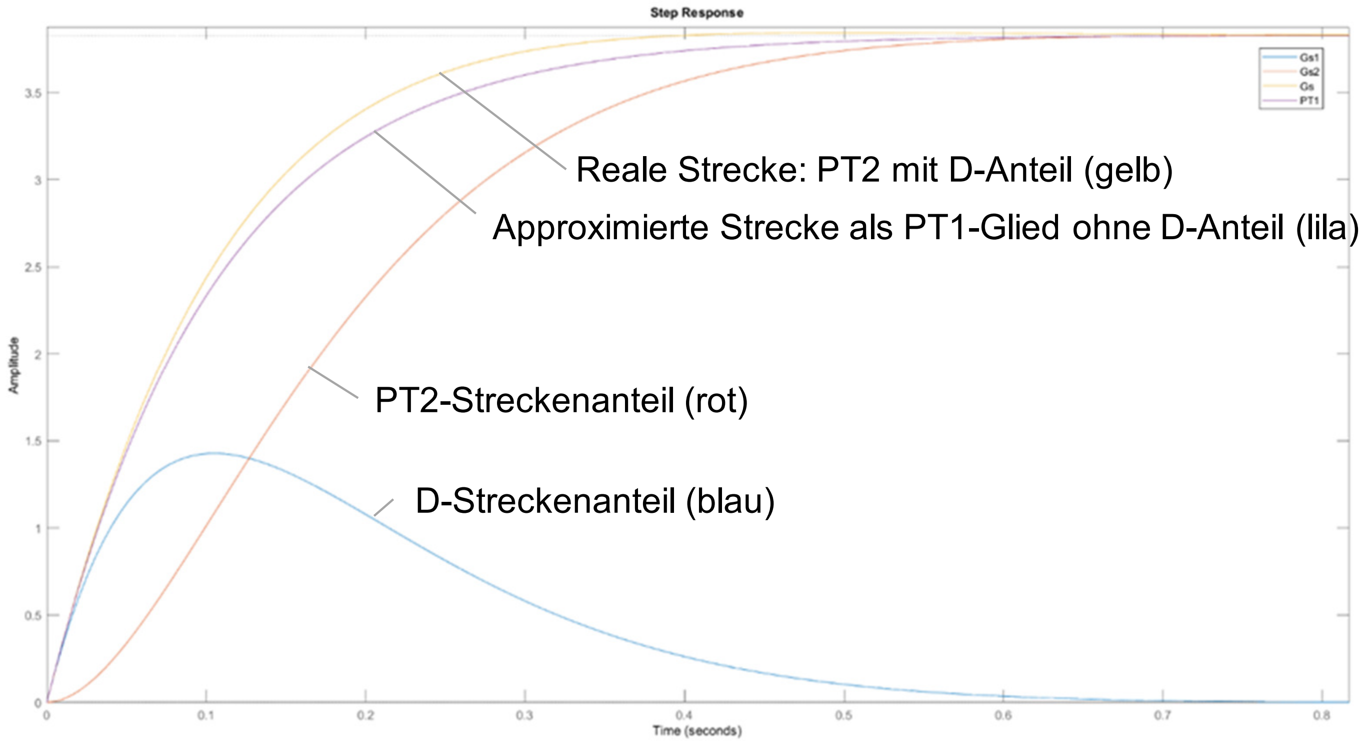


Frage 5: PI- und PID-Regler mit PDT2-Strecke

Meine Regelstrecke hat PDT2-Verhalten:

$$G_{\mathrm{S}}(s) = \frac{K_{\mathrm{PS}}(1+sT_{\mathrm{d}})}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$$

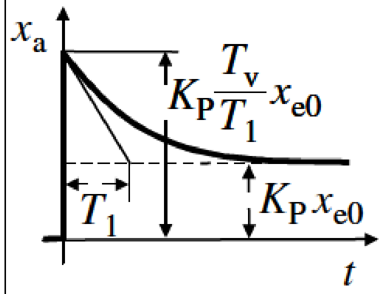
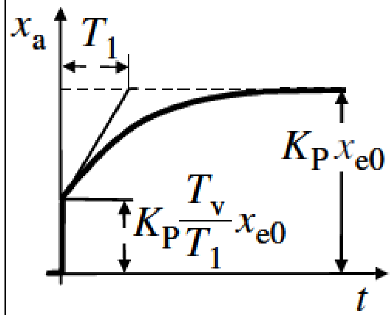
Ich wollte ein relativ einfaches Verfahren anwenden, um den Regler zu erstellen. Das symmetrische Optimum fiel vorerst weg, da die Polstellen komplex sind. Das Betragsoptimum kann nur für stabile komplexe Pole angewendet werden. Das Ziegler-Nichols-Verfahren fiel auch raus, da die Strecke so stabil war, dass ich sie fast nicht zur Instabilität führen konnte, um die Parameter zu bestimmen. Die Frequenzgangverfahren habe ich nicht angewendet, obwohl das auch gegangen wäre.
Das PT1-Glied hat ein dominantes D-Verhalten zu Beginn und erst im späteren Zeitverlauf ist das PT2-Verhalten dominant. Deshalb kann man über die Steigung und die stationäre Verstärkung ein angenähertes PT1-Glied erstellen. Das habe ich dann simuliert und es kommt an den Verlauf sehr gut ran (Bild unten) Schon konnte ich den Regler nach Betragsoptimum ohne Probleme auslegen.



Antwort:

Es gibt zwei Arten von PD-Gliedern mit Zeitverzögerung (Seiten 474, 475 des Buches unten):

- PD-T1 bzw. *Lead*-Glied mit *Tv*>*T1*
- PP-T1 bzw. *Lag*-Glied mit *Tv*<*T1*

Glied	Differentialgleichung	Übertragungsfunktion	Sprungantwort
PD-T_1 mit $T_v > T_1$	$T_1 \dot{x}_a(t) + x_a(t) = K_P \left[x_e(t) + T_v \dot{x}_e(t)\right]$	$K_P \dfrac{1+sT_v}{1+sT_1}$	
PP-T_1 mit $T_v < T_1$	$T_1 \dot{x}_a(t) + x_a(t) = K_P \left[x_e(t) + T_v \dot{x}_e(t)\right]$	$K_P \dfrac{1+sT_v}{1+sT_1}$	

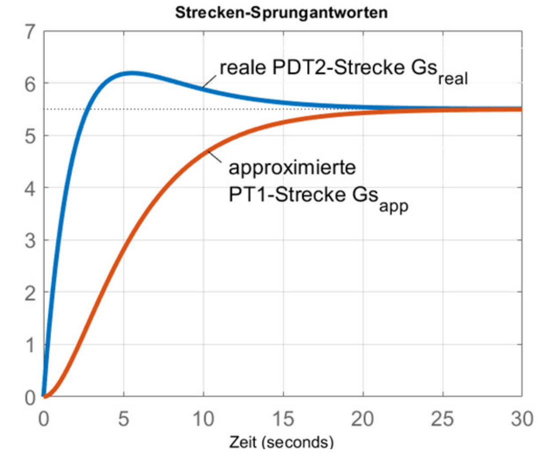
Grundsätzlich dürfen weder PP-T1-, noch PD-T1-Verhalten wegen eines markanten D-Sprungs bei t=0 als P-T1 oder P-T2-Glieder angenähert werden. In Ihrem Beispiel ist ein PP-T1-Glied mit Kps=3,828 betrachtet, und zwar mit T1=0,11 sec und mit der vernachlässigbar kleinen Zeitkonstante T2=0.01 sec, d.h. T1>>T2. Wie groß ist dabei Td, ist nicht angegeben, aber allein aus dem Kurvenverlauf ist es klar, dass Td << T1 ist, z.B. Td = 0,02. Es handelt sich also um eine Strecke mit Parametern, die nur in einem Spezialfall vorkommen können, bei dem es Td ≈ 0 gilt, so dass die Zeitkonstante Td vernachlässigt wird:

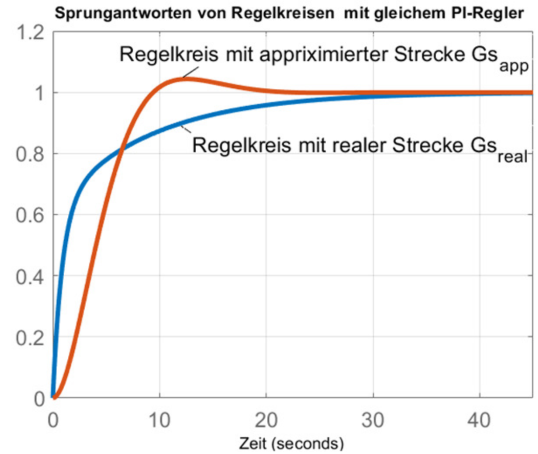
$$G_S(s) = \frac{K_{PS}(1+sT_d)}{(1+sT_1)(1+sT_2)} = \frac{3{,}828 \cdot (1+0{,}02s)}{(1+0{,}11s)(1+0{,}01s)} = \frac{3{,}828}{(1+0{,}11s)(1+0{,}01s)}$$

Antwort 5: PI- und PID-Regler mit PDT2-Strecke

Ganz anders ist es im allgemeinen Fall, z.B. bei T1=4 sec, T2=2 sec und Td= 5 sec. Die Sprungantworten der PDT2-Strecke und der angenäherten P-T1-Strecke, sowie die Sprungantworten von beiden Regelkreisen mit gleichem PI-Regler, der nach dem Betragsoptimum für die P-T1-Strecke eingestellt ist, sind unten beim Führungsverhalten nach dem Sollwertsprung w = 1 simuliert.

```
%% Regelstrecke
clearvars; clc;
s=tf('s');
T1=4;                           % T1>T2
T2=2;
Td=6;                           % Td>T1
Kps=5.5;
Gs_real=Kps*(1+s*Td)/((1+s*T1)*(1+s*T2));
Gs_app=Kps/((1+s*T1)*(1+s*T2)); % Annahme Td=0!
step(Gs_real,Gs_app);
%% Regelung
Tn=T1;              % Kompensation Tn=Tgrößte=T1=4 sec
KpR=Tn/(2*Kps*T2); % Reglereinstellung nach BO für Gs_app
GR=KpR*(1+Tn*s)/(s*Tn); % PI-Regler nach BO für Gs_app
G0_app=GR*Gs_app;           % offener Kreis mit G_app
Gw_app=G0_app/(1+G0_app);   % Regelkreis mit G_app
G0_real=GR*Gs_real;         % offener Kreis mit Gs_real
Gw_real=G0_real/(1+G0_real); % Regelkreis mit Gs_real
step(Gw_real,Gw_app);
```





Beide Sprungantworten, die mit der roten und blauen Kurven, kommen zu gleichen Beharrungszuständen, jedoch mit unterschiedlicher Dynamik.
Wenn die Überschwingungen zugelassen sind und Td << T1 ist, kann man solche Annäherung, wie Td ≈ 0, beim Führungsverhalten noch akzeptieren. Aber nicht beim Störverhalten, wie auf der nächsten Seite gezeigt wird.

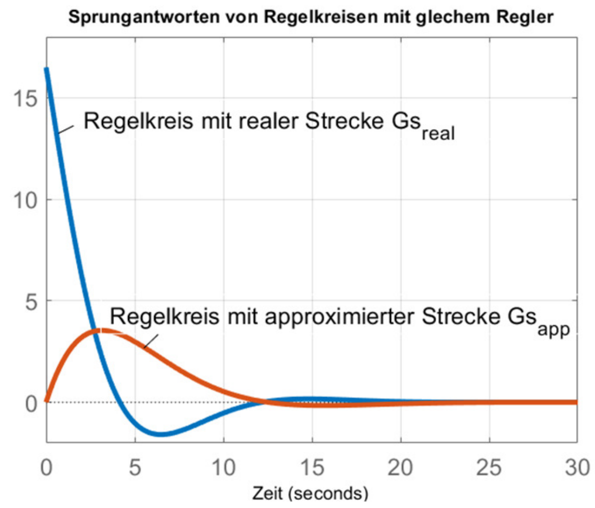
Antwort 5: PI- und PID-Regler mit PDT2-Strecke

Gegeben sind, wie oben, Kps=3,828; T1=4 sec, T2=2 sec und Td= 5 sec. Der PI-Regler GR(s) ist, auch wie oben, optimal nach dem Betragsoptimum anhand der approximierten Strecke Gs_app(s) mit Tn=T1 und KpR=Tn/(2*Kps*T2) eingestellt. Die simulierten Sprungantworten von beiden Regelkreisen mit der PDT2-Strecke Gs_real(s) und der angenäherten P-T1-Strecke Gs_app(s) mit gleichem PI-Regler beim Störverhalten sind unten gezeigt.

```
%% Regelung: Störverhalten
Tn=T1;                          % Kompensation Tn=Tgrößte=T1=4 sec
KpR=Tn/(2*Kps*T2);              % Reglereinstellung nach BO für Gs_app
GR=KpR*(1+Tn*s)/(s*Tn);         % PI-Regler
Gs1=1/(1+s*T1);                 % Teilstrecke Gs_app vor der Störung z
Gs2_app=Kps/(1+s*T2);           % Teilstrecke Gs_app nach der Störung z
Gv_app=Gs2_app;                 % Vorwärts ÜT mit Gs_app
G0_app=GR*Gs1*Gs2_app;          % offener Kreis mit Gs_app
Gz_app=Gv_app/(1+G0_app);       % Regelkreis mit Gs_app nach z=1
Gs2_real=Kps*(1+s*Td)/(1+s*T2); % Teilstrecke Gs_real nach Störung
Gv_real=Gs2_real;               % Vorwärts ÜT mit Gs_real
G0_real=GR*Gs1*Gs_real;         % offener Kreis mit Gs_real
Gz_real=Gv_real/(1+G0_real);    % Regelkreis mit Gs_real nach z=1
step(Gz_real,Gz_app);
```

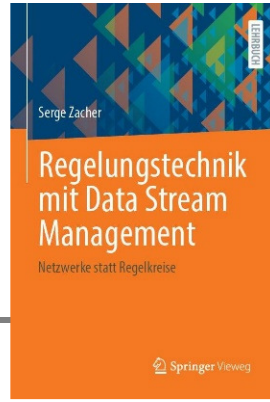
Diese Lösung, wie auch alle anderen Lösungen dieses Automation-Letters, sind unter üblichen Annahmen der klassischen linearen Regelungstechnik erstellt, nämlich:

- die Strecken sind linear;
- die Strecken sind zeitinvariant, d.h. die Streckenparameter sind konstant;
- die Strecken sind genau identifiziert, d.h. die Streckenmodelle unterscheiden sich nicht von realen Strecken;
- die Parameter von Streckenmodellen sind dimensionslos;
- die Stellgrößen sind nicht begrenzt, aber auch nicht unendlich.



Kein Kommentar!

Antwort 5: PI- und PID-Regler mit PDT2-Strecke



Kann aber ein relativ einfaches Verfahren, wie Betragsoptimum, für die Einstellung eines Standardreglers, wie PI oder PID, ohne Annäherung für eine PDT2- oder PPT2-Strecke angewendet werden?

Die Antwort ist „Ja“. Unten sind zwei Beispiele für PDT2-Strecke gezeigt (siehe Seiten 143-149 des Buches).

- PI-T1-Regler, eingestellt nach dem Betragsoptimum, Typ A

$$G_\mathrm{R}(s)=\frac{K_\mathrm{PR}(1+sT_\mathrm{n})}{sT_\mathrm{n}(1+sT_\mathrm{R})} \qquad G_\mathrm{S}(s)=\frac{K_\mathrm{PS}(1+sT_\mathrm{d})}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$$

$$G_0(s)=G_\mathrm{R}(s)G_\mathrm{S}(s)=\frac{K_\mathrm{PR}(1+sT_\mathrm{n})}{sT_\mathrm{n}(1+sT_\mathrm{R})}\cdot\frac{K_\mathrm{PS}(1+sT_\mathrm{d})}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$$

$$T_\mathrm{n}=T_1 \qquad T_\mathrm{R}=T_\mathrm{d}$$

$$G_0(s)=\frac{K_\mathrm{PR}K_\mathrm{PS}}{sT_\mathrm{n}(1+sT_2)}$$

$$K_\mathrm{PR}=\frac{T_\mathrm{n}}{2\cdot T_2\cdot K_\mathrm{PS}}$$

Die Regelung erfolgt mit der Dämpfung ϑ=0,707,
max. Überschwingung 4,3%, Ausregelzeit $T_\mathrm{Aus}=11\ T_2$

- PID-T1-Regler, eingestellt nach dem Typ C für gewünschte Ausregelzeit T_Aus

$$G_\mathrm{R}(s)=\frac{K_\mathrm{PR}(1+sT_\mathrm{n})(1+sT_\mathrm{v})}{sT_\mathrm{n}(1+sT_\mathrm{R})} \qquad G_\mathrm{S}(s)=\frac{K_\mathrm{PS}(1+sT_\mathrm{d})}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$$

$$G_0(s)=G_\mathrm{R}(s)G_\mathrm{S}(s)=\frac{K_\mathrm{PR}(1+sT_\mathrm{n})(1+sT_\mathrm{v})}{sT_\mathrm{n}(1+sT_\mathrm{R})}\cdot\frac{K_\mathrm{PS}(1+sT_\mathrm{d})}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$$

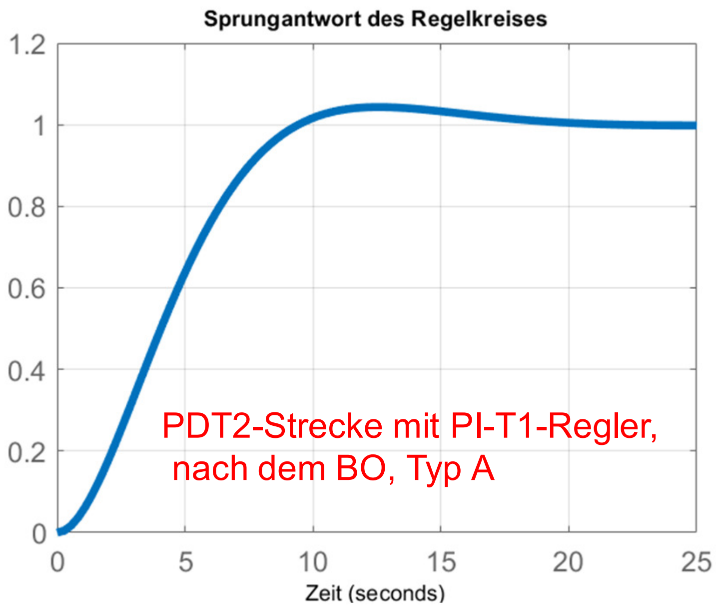
$$T_\mathrm{n}=T_1 \qquad T_\mathrm{v}=T_2 \qquad T_\mathrm{R}=T_\mathrm{d}$$

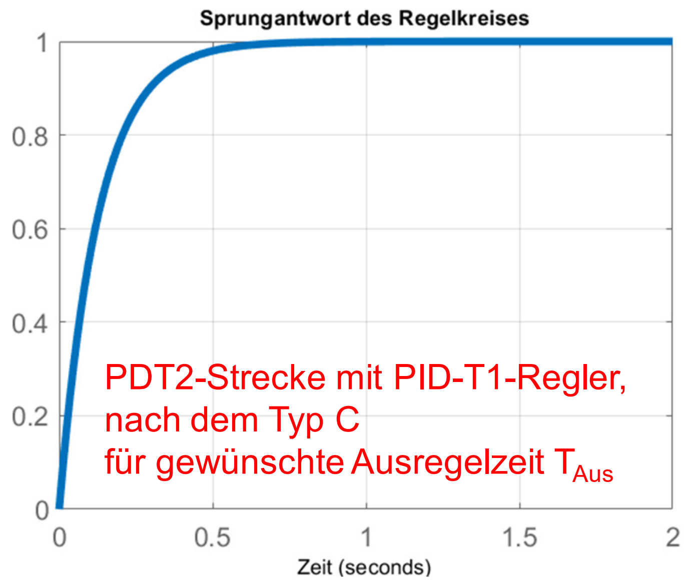
$$G_0(s)=\frac{K_\mathrm{PR}K_\mathrm{PS}}{sT_\mathrm{n}}$$

$$K_\mathrm{PR}=\frac{3{,}9\cdot T_\mathrm{n}}{K_\mathrm{PS}\cdot T_\mathrm{Aus}}$$

Die Regelung erfolgt mit der Dämpfung ϑ=1,
keine Überschwingung, gewünschte Ausregelzeit T_Aus

```
%% PDT2-Regelstrecke
clearvars; clc;
s=tf('s');
T1=4; T2=2; Td=6; Kps=5.5;
Gs=Kps*(1+s*Td)/((1+s*T1)*(1+s*T2));
%% PI-T1-Regler nach Betragsoptimum, Typ A
Tn=T1; TR=Td;          % Kompensation Tn=Tgrößte=T1=4 sec
KpR=Tn/(2*Kps*T2); % Reglereinstellung nach BO nach Typ A
GR=KpR*(1+Tn*s)/((s*Tn)*(1+s*TR)); % PI-T1-Regler
%% PID-T1-Regler nach Typ C für gewünschte Ausregelzeit
Taus=0.5;
Tn=T1; Tv=T2; TR=Td;    % Kompensation Tn=Tgrößte=T1 und Tv=T2
KpR=3.9*Tn/(Kps*Taus); % Reglereinstellung nach Typ C
GR=KpR*(1+Tn*s)*(1+s*Tv)/((s*Tn)*(1+s*TR)); % PI-T1-Regler
%% Sprunganwort
G0=GR*Gs;
Gw=G0/(1+G0);
step(Gw)
```

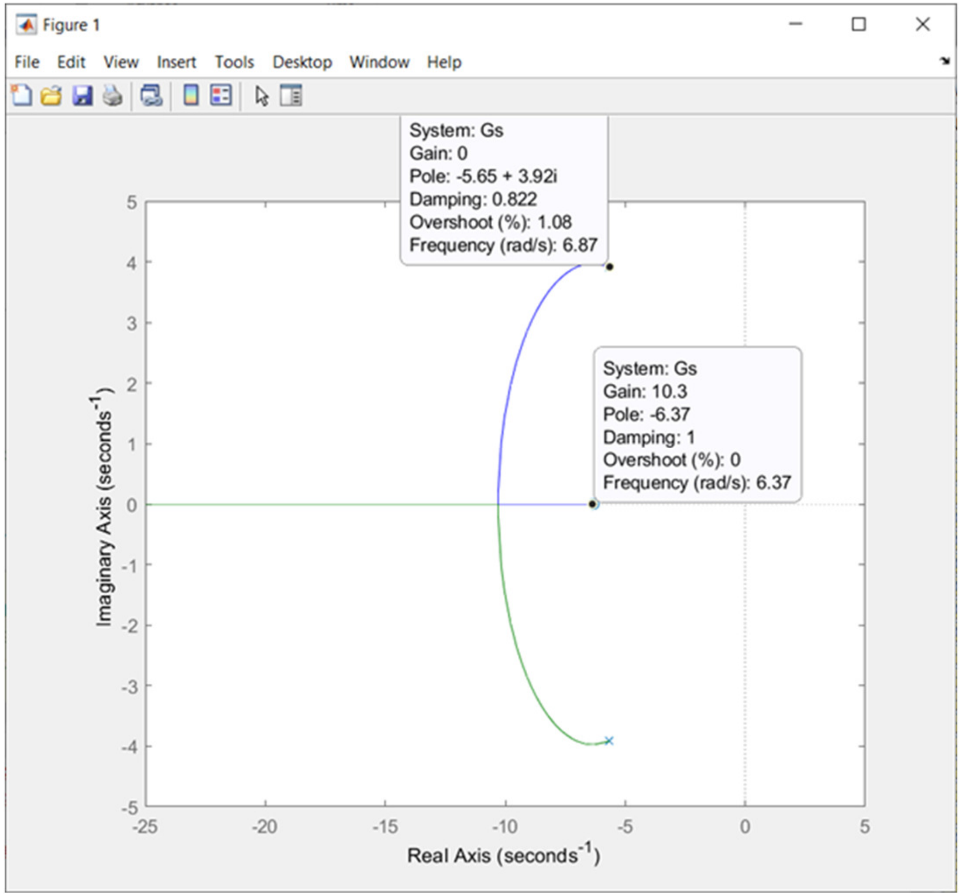


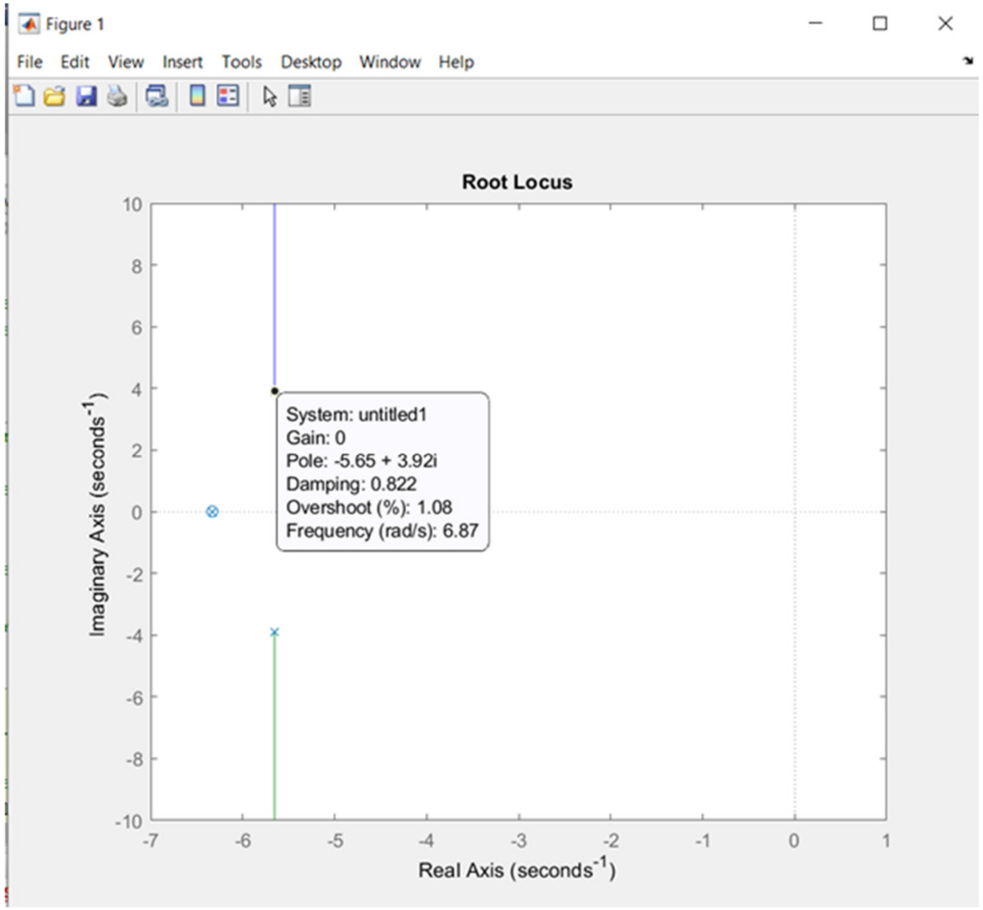


Diskussion zu Frage 5:

Frage 5.1:

Generell kann ich noch nicht die Theorie, die hinter einem PI-T1-Regler steckt, verstehen, da Sie diesen in der Lösung angeben. In der Simulation in Simulink ergibt sich momentan bei diesem Regler kein Mehrgewinn. Ganz im Gegenteil. Die Nullstelle bzw. der Zähler der Strecke ist minimalphasig und sollte durch den Regler nicht gekürzt werden. In der Ortskurve kann man dies leicht nachvollziehen. Sobald der Zähler, also die Nullstelle gekürzt würde, laufen die Pole nach außen weg.





Antwort 5.1:

Bekanntlich „Systeme, die ausschließlich Nullstellen in der negativen Halbebene besitzen, minimale Phasen aufweisen. Sie werden als minimalphasige Systeme bezeichnet.“ Quelle: https://www.eit.hs-karlsruhe.de/

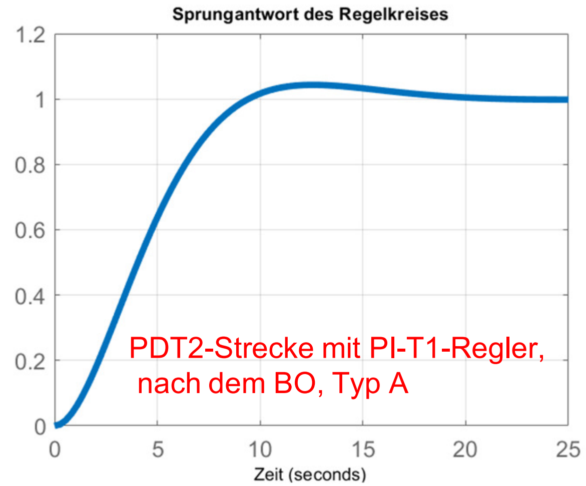
„Ein lineares System ist phasenminimal, wenn seine Pole und Nullstellen in der linken *s*-Halbebene liegen und es keine Totzeit aufweist. Weil sie den kleinstmöglichen Phasenverzug aufweisen, lassen sich phasenminimale Systeme leichter und besser regeln als nicht phasenminimale gleicher Komplexität.“ https://www.docsity.com/de/regelungstechnik-universitaet-siegen/5446754/

Bekanntlich ist auch, dass „Kompensation der Nullstellen durch instabile Pole des Reglers nicht realisierbar ist. Damit wurde die Stellgröße unbegrenzt ansteigen, was sich technisch verbietet.“ Grundlagen der Regelungstechnik (tu-bs.de)

Dagegen ist die Kürzung der minimalphasigen Nullstelen der Strecke durch stabile Pole des Reglers realisierbar. Ob und wie die Regelgütekriterien damit optimiert werden, ist für die „Blitz-Einstellung“ nicht vordringlich. Wichtig ist, dass der Kreis stabil und die Stellgröße nicht unbegrenzt ansteigen wird. Für eine präzise und optimale Regelung soll man keine „Blitz-Verfahren“ anwenden.

Nun zu Polstellen des geschlossenen Kreises, die aus der Reglereinstellung (Seiten 29, 30) resultieren.

Ohnehin es ist aus der simulierten Sprungantwort ersichtlich, dass der Kreis stabil ist und die Polstellen, wie es zu erwarten ist, einem klassischen Betragsoptimum entsprechen. Trotzdem bestimmen wir zur Kontrolle die Polstellen des geschlossenen Kreises. Kehren wir zum MATLAB®-Skript der Seite 30 zurück.




```
%% PDT2-Regelstrecke
clearvars; clc;
s=tf('s');
T1=4; T2=2; Td=6; Kps=5.5;
Gs=Kps*(1+s*Td)/((1+s*T1)*(1+s*T2));
%% PI-T1-Regler nach Betragsoptimum, Typ A
Tn=T1; TR=Td;         % Kompensation Tn=Tgrößte=T1=4 sec
KpR=Tn/(2*Kps*T2); % Reglereinstellung nach BO nach Typ A
GR=KpR*(1+Tn*s)/((s*Tn)*(1+s*TR)); % PI-T1-Regler
```

Nach dem Abschluss des MATLAB®-Skriptes geben wir in *MATLAB Control Window* folgende Befehle ein (siehe nächste Seite).

Diskussion zu 5: PI- und PID-Regler mit PDT2-Strecke
Antwort 5.1:

```
>> Gw

Gw =

  4608 s^6 + 6144 s^5 + 3104 s^4 + 752 s^3
                               + 88 s^2 + 4 s
  ----------------------------------------------
  36864 s^8 + 67584 s^7 + 54016 s^6 + 24576 s^5
           + 6816 s^4 + 1136 s^3 + 104 s^2 + 4 s

Continuous-time transfer function.
```

```
>> num=[4608 6144 3104 752  88 4 0];
>> den=[36864 67584 54016 24576 6816 1136 104 4 0];
>> roots(num)

ans =

         0
   -0.5000
   -0.2500
   -0.2500
   -0.1667
   -0.1667
```

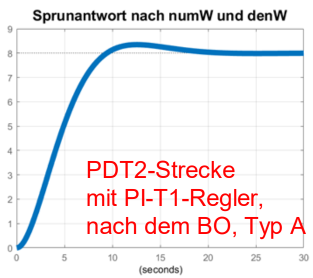
```
>> roots(den)

ans =

   0.0000 + 0.0000i
  -0.5000 + 0.0000i
  -0.2500 + 0.2500i
  -0.2500 - 0.2500i
  -0.2500 + 0.0000i
  -0.2500 - 0.0000i
  -0.1667 + 0.0000i
  -0.1667 - 0.0000i
```

Da MATLAB die gleichen Null- und Polstellen nicht kürzen kann, wird hier der reale Kreis der 2. Ordnung durch das System der 8. Ordnung dargestellt.
Man kann mit diesem System 8. Ordnung auch weiter simulieren, wie es oben, auf der Seite 30, gemacht wurde. Oder kann man die gleichen Null-/Polstellen kürzen, wie es links gemacht ist.

```
%% Polstellen-Kontrolle
s1=-0.25+0.25i;
s2=-0.25-0.25i;
ch_P=(s-s1)*(s-s2);
% Antwort: Ch.Polynom P= s^2 + 0.5 s + 0.125
numW=[1];
denW=[1  0.5  0.125];
step(numW,denW)
```



Frage 5.2:

Ich habe mir noch einmal die Ausführungen zu ihrer Antwort Nr. 5 im Automation-Letter Nr.1 angesehen. Leider kann ich diesen Ausführungen nicht ganz folgen.
Die Pole der Strecke, die ich betrachte, sind nicht reell sondern komplex konjungiert. Deshalb gibt es ausschließlich eine Zeitkonstante in der PDT2-Strecke.
Den Nenner kann ich dadurch nicht in der reellen Form mit 1/((1+T1*s)*(1+T2*s)) darstellen. Folglich müsste die Strecke korrekterweise die Form zu (K_PS*(1+T_d*s))/(s^2+2*D*w*s+w^2) annehmen.
Dafür gibt es allerdings kein Standardverfahren in einem ihrer Bücher.

Antwort 5.2:

Ja, für Strecken solcher Formen, wie bei Ihnen bzw. für Strecken mit D-Anteil und komplexen Polen

$$G_{\mathrm{S}}(s) = \frac{K_{\mathrm{PS}}(1 + sT_{\mathrm{d}})}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

gibt es kein expliziertes Standardverfahren. Aber man kann ein vorhandenes Standardverfahren A, B, C, D, E dafür anpassen:

https://youtu.be/RuJYuUIWb9I

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-30860-5_5

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-29220-1_1

Für Ihre Strecke ist an besten ein PID-T1-Regler nach dem Typ C geeignet (siehe Seiten 29, 30), was nachfolgend an einem Beispiel erklärt wird.

Die oben gezeigte Strecke $G_S(s)$ ist mit folgenden Parametern gegeben:

$$K_{\mathrm{PS}} = 5{,}5 \quad T_{\mathrm{d}} = 2 \quad a_2 = 1 \quad a_1 = 0{,}2 \quad a_0 = 0{,}05$$

Die komplexen konjugierten Pole s_1 und s_2 der Strecke $G_S(s)$ sind die Wurzel der charakteristischen Gleichung:

$$a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0 \qquad \begin{aligned} s_1 &= -0{,}1 + 0{,}2j \\ s_1 &= -0{,}1 - 0{,}2j \end{aligned}$$

Antwort 5.2

Setzten wir nun für die Regelung dieser Strecke einen PID-T1-Regler, jedoch nicht in multiplikativer Form

$$G_{\mathrm{R}}(s) = \frac{K_{\mathrm{PR}}(1+sT_{\mathrm{n}})(1+sT_{\mathrm{v}})}{sT_{\mathrm{n}}(1+sT_{\mathrm{R}})}$$

wie es in der klassischen Regelungstechnik üblich ist, sondern in der additiven Form, wie es in der Praxis und auch bei MATLAB® der Fall ist:

$$G_{\mathrm{R}}(s) = K_{\mathrm{PR}}\left(1+\frac{1}{sT_{\mathrm{n}}}+\frac{sT_{\mathrm{v}}}{1+sT_{\mathrm{R}}}\right)$$

Daraus resultiert die Übertragungsfunktion $G_S(s)$ des offenen Kreises, die folgendermaßen umgestaltet wird:

$$G_0(s) = G_{\mathrm{R}}(s)G_{\mathrm{S}}(s) = K_{\mathrm{PR}}\left(1+\frac{1}{sT_{\mathrm{n}}}+\frac{sT_{\mathrm{v}}}{1+sT_{\mathrm{R}}}\right)\cdot\frac{K_{\mathrm{PS}}(1+sT_{\mathrm{d}})}{a_2s^2+a_1s+a_0}$$

$$G_0(s) = K_{\mathrm{PR}}\frac{(T_{\mathrm{n}}T_{\mathrm{v}}+T_{\mathrm{n}}T_{\mathrm{R}})s^2+T_{\mathrm{n}}s+1}{sT_{\mathrm{n}}\cdot(1+sT_{\mathrm{R}})}\cdot\frac{K_{\mathrm{PS}}(1+sT_{\mathrm{d}})}{\frac{a_2}{a_0}s^2+\frac{a_1}{a_0}s+1}$$

$$G_0(s) = K_{\mathrm{PR}}\frac{(T_{\mathrm{n}}T_{\mathrm{v}}+T_{\mathrm{n}}T_{\mathrm{R}})s^2+T_{\mathrm{n}}s+1}{sT_{\mathrm{n}}\cdot(1+sT_{\mathrm{R}})}\cdot\frac{K_{\mathrm{PS}}(1+sT_{\mathrm{d}})}{A_2s^2+A_1s+1}$$

Nach der Kompensation

$$\boxed{\begin{aligned} T_{\mathrm{n}}T_{\mathrm{v}}+T_{\mathrm{n}}T_{\mathrm{R}} &= A_2 \\ T_{\mathrm{n}} &= A_1 \\ T_{\mathrm{R}} &= T_{\mathrm{d}} \end{aligned}}$$

ergibt sich der Standardtyp C:

$$\boxed{G_0(s) = \frac{K_{\mathrm{PR}}K_{\mathrm{PS}}}{sT_{\mathrm{n}}}}$$

Antwort 5.2

Bestimmen wir K_{PR} für eine vorgegebene bzw. gewünschte Ausregelzeit T_{aus} nach der Formel für Typ C (siehe Seite 29):

$$K_{\mathrm{PR}} = \frac{3{,}9 \cdot T_{\mathrm{n}}}{K_{\mathrm{PS}} \cdot T_{\mathrm{Aus}}}$$

Man soll nur solche Ausregelzeiten auswählen, welche von Stellgrößen auch realisierbar sind. Nehmen wie jedoch nachfolgend $T_{aus} = 1{,}5$ an, ohne die Realisierbarkeit zu prüfen.

Das MATLAB®-Skript mit den für das gegebene Beispiel bestimmen Regler-Kennwerten ist unten gezeigt

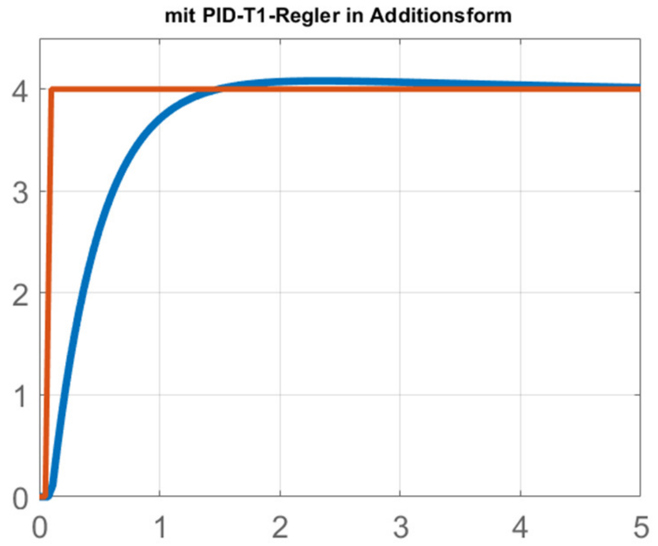
$$T_{\mathrm{n}} = A_1 = \frac{a_1}{a_0} = 4 \qquad T_{\mathrm{v}} = \frac{A_2 - A_1 T_{\mathrm{R}}}{T_{\mathrm{n}}} = 3$$

$$T_{\mathrm{R}} = T_{\mathrm{d}} = 2 \qquad K_{\mathrm{PR}} = \frac{3{,}9 \cdot T_{\mathrm{n}}}{K_{\mathrm{PS}} \cdot T_{\mathrm{Aus}}} = 1{,}89$$

```
s=tf('s');
Taus=1.5;                                   % Gegebene bzw. gewünschte Ausregelzeit
Kps=5.5; Td=2; a2=1;a1=0.2;a0=0.05;         % Gegebene Streckenparameter
Gs=Kps*(1+s*Td)/(a2*s^2+a1*s+a0);           % Strecke mit Polstellen s1=-0.1+0.2i; s2=-0.1+0.2i;
A2=a2/a0; A1=a1/a0;A0=a0/a0;                % Normierung: A2=20;A1=4;A0=1
Tn=A1; TR=Td; Tv=(A2-A1*TR)/Tn;             % Regler-Kennwerte
KpR=3.9*Tn/(Kps*Taus);                      % Reglereinstellung nach Multiplikationsform (Typ C)
GRp=s/s; GRn=1/(s*Tn); GRv=s*Tv/(1+s*TR); % P-, I-, D-Anteile des Reglers, Additionsform
GR=KpR*(GRp+GRn+GRv);                       % PI-T1-Regler, Additionsform
G0=GR*Gs_schw;                              % offener Regelkreis
Gw=G0/(1+G0);                               % geschlossener Regelkreis
step(Gw,5); title('mit PID-T1-Regler in Additionsform');
grid
```

Antwort 5.2

Die Sprungantwort nach dem obigen Skript:



Die kleine Abweichung der simulierten Sprungantwort von dem nach dem Typ C erwarteten P-T1-Verhalten ist dadurch zu erklären, dass die Berechnung von Kennwerten für die Multiplikationsform des PID-T1-Reglers erfolgte. Dagegen wurde der Regler nach Additionsform simuliert.

Es entsteht vielleicht die Frage, warum der PID-T1 Regler nach einer Additionsform und nicht nach der Multiplikationsform eingesetzt wird. Hier sind die Gründe aufglistet:

- Die Multiplikationsform wurde früher bei analogen Reglern weit und breit benutzt, wird aber heute kaum in der Praxis eingesetzt, da die Regler ausnahmslos digital bzw. in Additionsform sind.
- Die Multiplikationsform ist für Berechnungen gut geeignet, weil man die Kompensation bzw. die Kürzungen vornehmen kann. Jedoch soll man die Kennwerte, die aus der Multiplikationsform resultieren, in die Additionsform umrechnen, um die Regelung optimal, d.h. wie berechnet, realisieren bzw. simulieren. Oft wird es vernachlässigt.
- Das hier hergeleitete Standardverfahren kann nicht bei einer Multiplikationsform angewendet werden, weil daraus keine reelle, sondern komplexe Kennwerte T_n und T_v resultieren, die nicht realisierbar sind.
- Auch die Umrechnung der hier nach der Additionsform bestimmten Kennwerten in die Multiplikationsform führt zu komplexen Kennwerten T_n und T_v.

Mehr Info über Beschreibungsformer der PID-Regler kann man in Automation-Letter Nr. 09 finden:
https://www.zacher-international.com/Automation_Letters/09_PID_Gesichte.pdf

Für eine präzise bzw. keine „blitzschnelle" Reglereinstellung sind folgende Quellen empfohlen:
Drei-Bode-Plots-Verfahren für Regelungstechnik | SpringerLink
Regelungstechnik mit Data Stream Management | SpringerLink
Regelungstechnik für Ingenieure | SpringerLink
Drei-Bode-Plots-Verfahren und BAD (zacher-international.com)
Grundbegriffe der Regelungstechnik (uni-siegen.de)

Frage 6: Kompensation und Ersatzzeitkonstante

Ich komme soweit mit ihren Unterlagen zur Prüfungsvorbereitung sehr gut zurecht. Allerdings sind mir ein paar Fragen offen geblieben. Es geht mir konkret um die Ersatzzeitkonstanten, die gebildet werden dürfen.

Frage 5a): Im Skript auf S.7 (unten) steht, das man eine Ersatzzeitkonstante bilden darf, wenn Bedingung $\boldsymbol{T_2>5*T_4}$ ist oder umgekehrt.

3. Nach der Anzahl der Basis-Glieder wird die Übertragungsfunktion zum Standard-Typ zugeordnet. Im obigen Beispiel wäre der Standard-Typ A möglich, jedoch hat der Kreis nicht ein, sondern zwei P-T1-Glieder. Man darf eine Ersatzzeitkontante T_E bilden bzw. beide Zeitkonstanten T_2 und T_4 zueinander addieren, falls die Bedingung $T_2 \geq 5T_4$ oder umgekehrt $T_4 \geq 5T_2$ erfüllt ist:

$$T_E = T_2 + T_4$$

Geht es hier nur darum, das die vorhandenen Zeitkonstanten nach der Kompensation in diesem Verhältnis zueinander stehen? Also ist die Regel folgende? --> Eine Ersatzzeitkonstante darf immer dann gebildet werden, wenn die Zeitkonstanten z.B. einer Strecke $\boldsymbol{T_x}$ > 5*$\boldsymbol{T_y}$ entspricht, egal ob $\boldsymbol{T_1}$, $\boldsymbol{T_2}$?

Antwort zu Frage 6a:

Sie haben richtig verstanden! Trotzdem möchte ich die Regel noch mal an einem Beispiel wiederholen. Angenommen ist die Übertragungsfunktion des offenen Kreises nach der Kompensation gegeben (T_n= 40; T_1=1; T_2=2; T_3=36 und T_4=4):

$$G_0(s) = \frac{K_{\mathrm{PR}} K_{\mathrm{iS}}}{sT_{\mathrm{n}}(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)(1+sT_4)}$$

Da hier eine Zeitkonstante 5 mal größer ist, als alle anderen zusammen, dürfen wir eine Ersatzzeitkonstante T_E bilden:

$$T_3 \geq 5 \cdot (T_1 + T_2 + T_4) \quad \Longrightarrow \quad T_{\mathrm{E}} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad \Longrightarrow \quad G_0(s) = \frac{K_{\mathrm{PR}} K_{\mathrm{iS}}}{sT_{\mathrm{n}}(1+sT_{\mathrm{E}})}$$

Frage 6b): Und wo ich noch unsicher bin, ist folgendes. Wir haben ja auf S.8 (unten) des Skripts Tabelle 5. mit den Einstellregeln etc. von Standard-Reglern.

Typ-Bezeich-nung	Übertragungsfunktion des offenen Kreises $G_0(s)$	Gegebene Regelgüte-kriterien	Proportionalbeiwert des Reglers K_{PR}
Typ A	$G_0(s) = \dfrac{K_{PR} K_{PS} K_{IS}}{s T_n (1 + s T_E)}$	$\vartheta = \dfrac{1}{\sqrt{2}}$	$K_{PR} = \dfrac{T_n}{2 \cdot K_{PS} K_{IS} \cdot T_E}$
Typ B	$G_0(s) = \dfrac{K_{PR} K_{PS}}{(1 + s T_E)(1 + s T_2)}$	$\vartheta = \dfrac{1}{\sqrt{2}}$	$K_{PR} = \dfrac{(T_E + T_1)^2}{2 \cdot K_{PS} \cdot T_E \cdot T_2} - \dfrac{1}{K_{PS}}$
Typ C	$G_0(s) = \dfrac{K_{PR} K_{PS} K_{IS}}{s T_n}$	T_{aus}	$K_{PR} = \dfrac{3.9 \cdot T_n}{K_{PS} K_{IS} \cdot T_{aus}}$
Typ D	$G_0(s) = \dfrac{K_{PR} K_{PS}}{1 + s T_E}$	T_{aus}	$K_{PR} = \dfrac{1}{K_{PS}} \left(\dfrac{3.9 \cdot T_E}{T_{aus}} - 1 \right)$
Typ E	$G_0(s) = \dfrac{K_{PR} K_{PS} K_{IS}}{s^2 T_n}$		Instabil bei beliebigem K_{PR}
Typ SO	$G_0(s) = \dfrac{K_{PR} K_{PS} K_{IS} (1 + s T_n)}{s^2 T_n (1 + s T_E)}$	Phasen-reserve φ_R = max	$K_{PR} = \dfrac{1}{2 \cdot K_{PS} K_{IS} \cdot T_E}$

Tabelle 1.5: **Einstellregeln und Regelgütekriterien von Standard-Regelkreisen**

Hier sind in den Formeln unter anderem die Bezeichnungen $\boldsymbol{T_E}$ und $\boldsymbol{T_1}$ vorhanden, allerdings ist mir in einigen Aufgaben aufgefallen, das für T_E nicht immer die Ersatzzeitkonstante T_E eingesetzt wurde, sondern auch mal T_1.
Jetzt ist mir nicht sicher, woher ich weiß, wann T_E die Ersatzzeitkonstante sein soll und wann z.B. T_1.
Vielleicht können sie mir hier noch weiter helfen.

Antwort zu Frage 6b:

Leider hat sich in der Tabelle ein Druckfehler eingeschlichen! Anstelle ***T*1** sollte ***T*2** beim Typ B stehen:

Typ-Bezeich-nung	Übertragungsfunktion des offenen Kreises $G_0(s)$	Gegebene Regelgüte-kriterien	Proportionalbeiwert des Reglers K_{PR}
Typ A	$G_0(s)=\dfrac{K_{PR}K_{PS}K_{IS}}{sT_n(1+sT_E)}$	$\vartheta=\dfrac{1}{\sqrt{2}}$	$K_{PR}=\dfrac{T_n}{2\cdot K_{PS}K_{IS}\cdot T_E}$
Typ B	$G_0(s)=\dfrac{K_{PR}K_{PS}}{(1+sT_E)(1+sT_2)}$	$\vartheta=\dfrac{1}{\sqrt{2}}$	$K_{PR}=\dfrac{(T_E+T_1)^2}{2\cdot K_{PS}\cdot T_E\cdot T_2}-\dfrac{1}{K_{PS}}$

Die besagte Tabelle gilt als Schablone und sollte möglichst kompakt dargestellt werden, d.h. die Bezeichnungen T_1, T_2 oder T_E in der linken Spalte nur die Platzhalter für die rechte Spalte sind. Der Index spielt keine Rolle. Wichtig ist nur, wo die Zeitkonstante aus der linken Spalte in die Lösung, also in die Formel für Proportionalbeiert des Reglers, eingesetzt werden soll.

<u>Beispiel 1</u>: Die Übertragungsfunktion des offenen Kreises nach der Kompensation mit $T_1 = 1$ und $T_2 = 2$ ist gegeben. Es handelt sich um Typ B, da keine Zeitkonstante gebildet werden darf:

$$G_0(s)=\frac{K_{PR}K_{PS}}{(1+sT_3)(1+sT_4)} \quad\Rightarrow\quad K_{PR}=\frac{(T_3+T_4)^2}{2\cdot K_{PS}\cdot T_3\cdot T_4}-\frac{1}{K_{PS}}$$

<u>Beispiel 2</u>: Die Übertragungsfunktion des offenen Kreises nach der Kompensation mit $T_1 = 1$ und $T_2 = 5$ ist gegeben.

$$T_2 \geq 5\cdot T_1 \quad\Rightarrow\quad T_E = T_1 + T_2 \quad\Rightarrow\quad G_0(s)=\frac{K_{PR}K_{PS}}{1+sT_E} \quad\Rightarrow\quad \text{Typ D:}\quad K_{PR}=\frac{1}{K_{PS}}\left(\frac{3{,}9T_E}{T_{Aus}}-1\right)$$

Frage 7: Fuzzy-Regler

Ich lese zur Zeit ihr Buch "Regelungstechnik für Ingenieure" und mir ist im Kapitel für die Fuzzy-Regelung (S. 374) ein Fehler aufgefallen.

REGEL:		*Regeldifferenz*		*Ventil_leeren*		*Ventil_füllen*
1		positiv		open		close
2	WENN	negativ	DANN	close	UND	open
3		Null		close		close

Sollten *Ventil_leeren* und *Ventil_füllen* nicht anders herum sein?

Wenn die Regeldifferenz positiv ist, müsste das Ventil öffnen, um den Behälter zu füllen. Entsprechend schließen, wenn die Regeldifferenz negativ ist.
Oder übersehe ich etwas?
Freundliche Grüße,

Antwort zu Frage 7:

Sie haben richtig verstanden! Trotzdem möchte ich die Regel noch mal an einem Beispiel wiederholen. Angenommen ist die Übertragungsfunktion des offenen Kreises nach der Kompensation gegeben (T_n= 40; T_1=1; T_2=2; T_3=36 und T_4=4):

$$G_0(s) = \frac{K_{\mathrm{PR}} K_{\mathrm{iS}}}{sT_{\mathrm{n}}(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)(1+sT_4)}$$

Da hier eine Zeitkonstante 5 mal größer ist, als alle anderen zusammen, dürfen wir eine Ersatzzeitkonstante T_E bilden:

$$T_3 \geq 5 \cdot (T_1 + T_2 + T_4) \quad \Rightarrow \quad T_{\mathrm{E}} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad \Rightarrow \quad G_0(s) = \frac{K_{\mathrm{PR}} K_{\mathrm{iS}}}{sT_{\mathrm{n}}(1+sT_{\mathrm{E}})}$$

Frage 8: Smart Building Recorder (SBR) von SIEMENS

Ich befasse mich in meiner Projektarbeit mit der Gebäudeautomatisierung, nämlich mit der Optimierung von digitalen PID-Reglern für Heiz- und Lüftungsanlagen. Dafür nutze ich das SBR Siemens-Tool, der den Verlauf von Daten eines einzelnen Raums oder eine Gruppe der Räume eines Gebäudes messen, speichern und darstellen lässt. Ziel des Projektes ist es, anhand der Messdaten die Werte des PID-Reglers optimal einzustellen. Können Sie mir eine Methode empfehlen, wie man anhand der Daten der Regelstrecke, z.B. durch einen Einheitssprung die Werte des PID bestimmen kann?

Antwort zu Frage 8:

Zunächst betrachten wir im Allgemeinen, wie die PID-Reglereinstellung nach einem Eingangssprung erfolgt, erst dann beschäftigen wir uns mit dem SBR.

Wenn die Daten eine Regelstrecke bekannt sind, z.B. die Übertragungsfunktion $G_s(s)$, dann die Einstellung des PID-Reglers stellt sich kein Problem vor und ist in der Literatur ausführlich beschrieben, siehe z.B.

Regelungstechnik für Ingenieure	https://www.szacher.de/my-Books/RT_Ingenieure/
Übungsbuch Regelungstechnik	https://www.szacher.de/my-Books/Uebungsbuch/
Regelungstechnik Aufgaben	https://www.szacher.de/my-Books/RT_Aufgaben/

Anders ist es, wenn die Übertragungsfunktion $G_s(s)$ der Strecke nicht bekannt ist. Dann soll man die Strecke identifizieren bzw. die Übertragungsfunktion $G_s(s)$ nach Eingabe eines Test-Eingangssignals bestimmen.

Es werden folgende Eingangssignale benutzt:

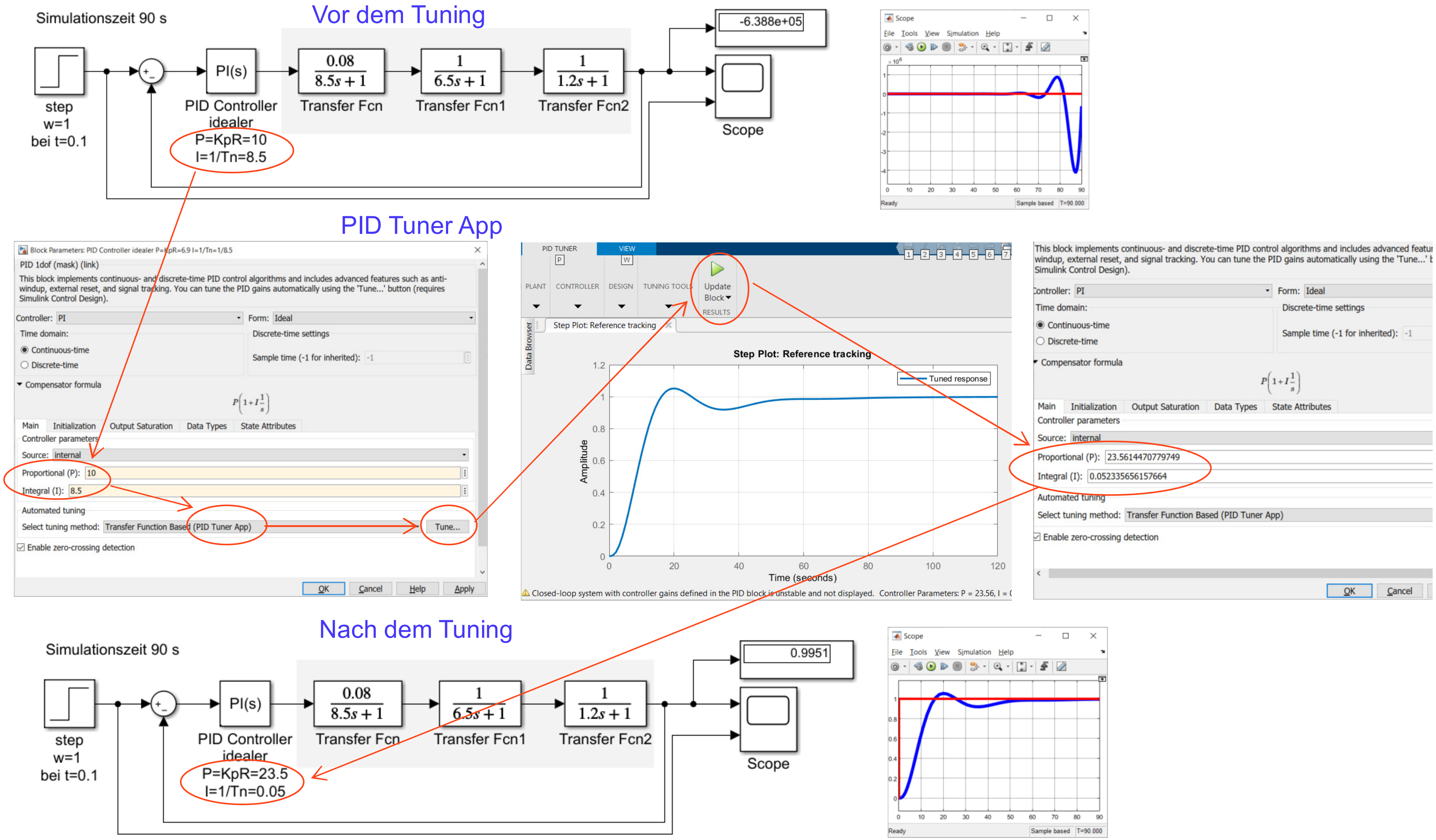
- Sprung
- Impuls
- Harmonische Schwingung
- Zufallsfolge

Das einfachste und meist benutzte Identifikation der Strecke wird anhand Eingang-Sprünge realisiert, was in o.g. Büchern und in **Automation-Letter 03** https://www.zacher-international.com/Automation_Letters/03_Hinweise_Identifikation.pdf beschrieben ist.

Nun nehmen wir an, dass die Übertragungsfunktion $G_s(s)$ der Regelstrecke bekannt ist.
Im bereits erwähnten Buch „Regelungstechnik Aufgaben“ und im neuen Buch „Drei-Bode-Plots-Verfahren)
https://www.springer.com/de/book/9783658292195 , dass im September 2020 erschienen wird,
sind 6 Standard-Regelkreise definiert (Typ A, B, C usw.) und dafür die Einstellregeln von Standard-PID-Reglern gegeben.

Typ-Bezeich-nung	Übertragungsfunktion des offenen Kreises $G_0(s)$	Gegebene Regelgüte-kriterien	Proportionalbeiwert des Reglers K_{PR}
Typ A	$G_0(s)=\dfrac{K_{PR}K_{PS}K_{IS}}{sT_n(1+sT_E)}$	$\vartheta=\dfrac{1}{\sqrt{2}}$	$K_{PR}=\dfrac{T_n}{2\cdot K_{PS}K_{IS}\cdot T_E}$
Typ B	$G_0(s)=\dfrac{K_{PR}K_{PS}}{(1+sT_E)(1+sT_2)}$	$\vartheta=\dfrac{1}{\sqrt{2}}$	$K_{PR}=\dfrac{(T_E+T_1)^2}{2\cdot K_{PS}\cdot T_E\cdot T_2}-\dfrac{1}{K_{PS}}$
Typ C	$G_0(s)=\dfrac{K_{PR}K_{PS}K_{IS}}{sT_n}$	T_{aus}	$K_{PR}=\dfrac{3.9\cdot T_n}{K_{PS}K_{IS}\cdot T_{aus}}$
Typ D	$G_0(s)=\dfrac{K_{PR}K_{PS}}{1+sT_E}$	T_{aus}	$K_{PR}=\dfrac{1}{K_{PS}}\left(\dfrac{3.9\cdot T_E}{T_{aus}}-1\right)$
Typ E	$G_0(s)=\dfrac{K_{PR}K_{PS}K_{IS}}{s^2T_n}$		Instabil bei beliebigem K_{PR}
Typ SO	$G_0(s)=\dfrac{K_{PR}K_{PS}K_{IS}(1+sT_n)}{s^2T_n(1+sT_E)}$	Phasen-reserve φ_R = max	$K_{PR}=\dfrac{1}{2\cdot K_{PS}K_{IS}\cdot T_E}$

Andererseits kann man die bekannte Übertragungsfunktion $G_s(s)$ der Regelstrecke mit MATLAB®/Simulink simulieren und den PID-Regler nach der automatischen PID-Tuner App einstellen. Unten ist ein Beispiel gezeigt.



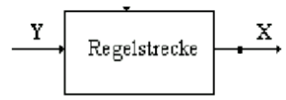
Die PID-Reglereinstellung nach einem Eingangssprung erfolgt also nach dem oben beschriebenen Vorgang:

a) Zum Eingang der Strecke wird ein Sprung Y gegeben.

b) Die Sprungantwort X wird am Ausgang der Strecke gemessen.

c) Aus dem Zusammenhang von X und Y wird die Übertragungsfunktion der Strecke bestimmt.

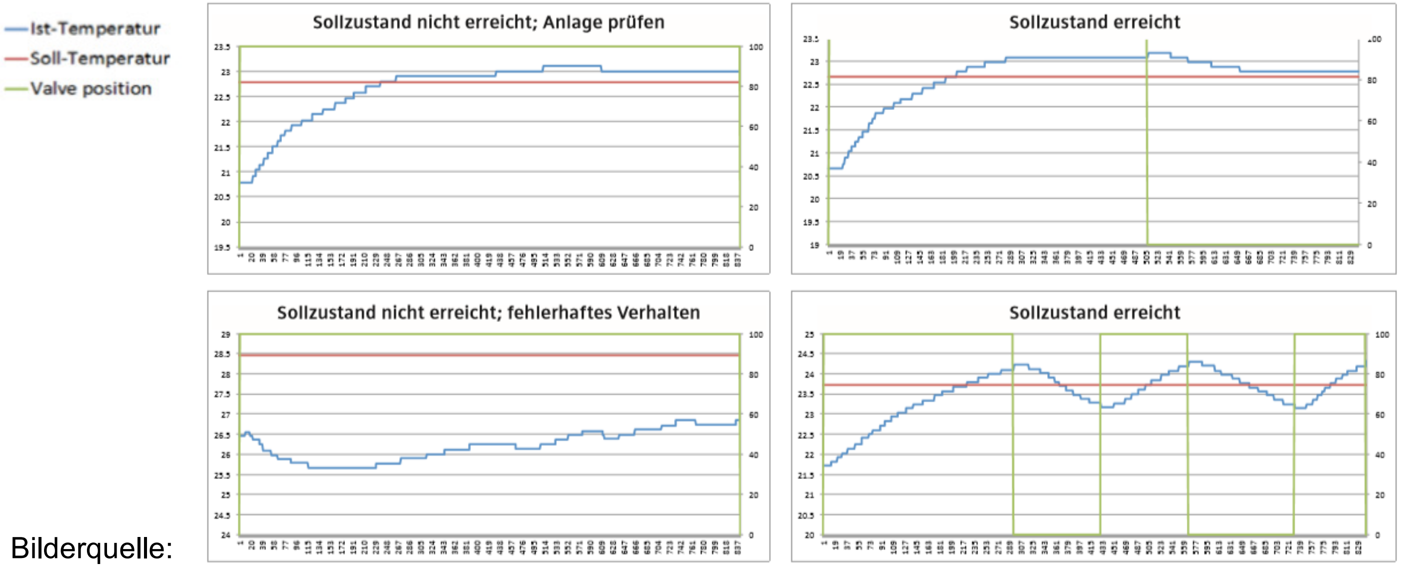
d) Der PID-Regler wird nach einem Standard-Verfahren oder mit einem Tuner eingestellt.

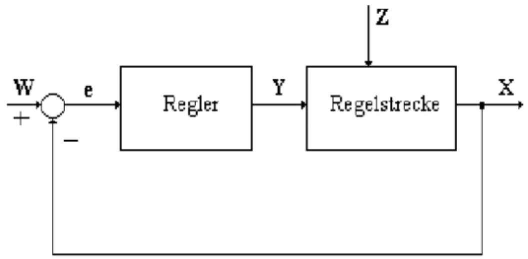


Nun beschäftigen wir uns endlich mit dem SBR. Laut Literaturangaben (s. Bilder unten links) wird der Eingangssprung nicht zum Stellwert Y, sondern zum Sollwert W eingegeben. Daraus wird nicht die Sprungantwort X der Strecke gemessen, sondern die Sprungantwort X des gesamten geschlossenen Regelkreises samt PID-Regler und Rückführung (s. Bild unten rechts).

Es sind zwei Lösungswege zur optimalen Tuning des PID-Reglers mit dem SBR möglich:

1. Die Rückführung und folglich der Regler für die Test-Sprünge sollen ausgeschaltet werden, um die obigen Punkte (a) bis (d) anzuwenden.
2. Aus der unten links gegebenen Sprungantwort des Kreises soll die Sprungantwort der Strecke extrahiert werden, um dann den Regler nach obigen Punkten (c) und (d) einzustellen.





Bilderquelle:

https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&id1=A6V11815551

Frage 9: Identifikation der Strecke und Reglereinstellung

Es ergeben sich 2 Probleme für mich:
a) Wie bekomme ich aus Messwerten die Übertragungsfunktion einer Temperaturregelstrecke.
b) Wie ermittle ich die optimalen Werte für den digitalen PID-Regler aus der Regelstrecke.

Antwort zu Frage 9a:

Die Heiz- und Lüftungsanlagen sind grundsätzlich Proportionalglieder mit Zeitverzögerung (mit Ausgleich), also P-T1, P-T2, P-T3, … P-Tn-Glieder mit oder ohne Totzeit. Hierzu ist mein Skript zum Kurs RT1, Seiten 15, 16.
https://www.szacher.de/.cm4all/uproc.php/0/Lehre/DHBW_Stuttgart/RT_1/RT1_m_Labor_2018.pdf?_=165b35e0500&cdp=a

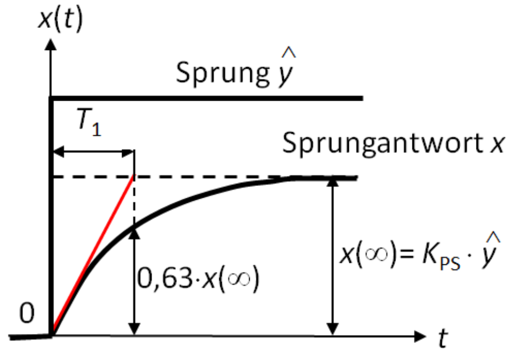
Ihre Aufgabe ist es, aus Messwerten folgende Parameter zu bestimmen:

n – Ordnung der Strecke
K – Proportionalbeiwerte
T – Zeitkonstanten

Dafür gibt es einfache Erkennungsmerkmale:

- Liegt die Tangente zum Anfangspunkt der Sprungantwort nicht horizontal, ist $n = 1$.

$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{1 + sT_1}$$

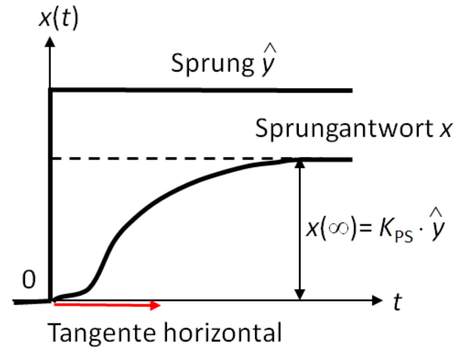


- Anderenfalls ist $n = 2$

$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)}$$

oder auch $n > 2$

$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)\ldots(1 + sT_n)}$$



Weiterhin gibt es für P-Tn zwei Wege:

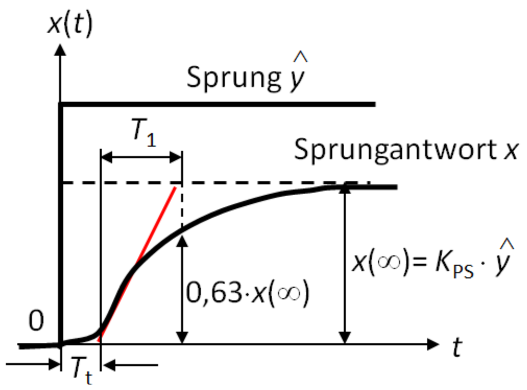
- Entweder nehmen Sie grob an, dass *n* = 1 mit Totzeit ist. Dann nutzen Sie das Tangentenverfahren. Oft genugt es für reale Temperaturregelung. https://www.zacher-international.com/Automation_Letters/03_Hinweise_Identifikation.pdf
  Die Hilfe hierzu ist auch in meinen Unterlagen zum Kurs RT1:
https://www.szacher.de/.cm4all/uproc.php/0/Lehre/DHBW_Stuttgart/RT_1/WebLab_Hinweise_18.pdf?_=165bad45be0&cdp=a

P-Tn kann man approximieren als P-T1 mit Totzeit

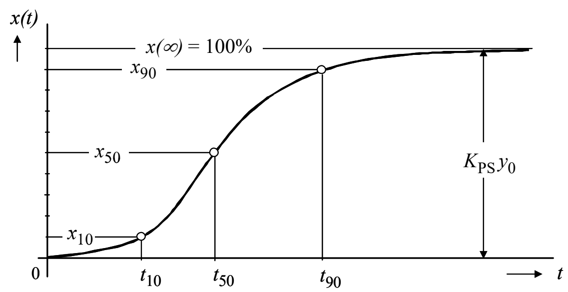
$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{(1+sT_1)(1+sT_2)\ldots(1+sT_n)} \longrightarrow G_S(s) = \frac{K_{PS}}{1+sT_1}e^{-sT_t}$$

oder ganz grob als P-T2

$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{(1+sT_1)(1+sT_t)}$$



- Oder Sie benutzen das Zeit-/Prozentkennlinien-Verfahren.
  https://www.zacher-international.com/Automation_Letters/24_Zeit_Prozentkennwert.pdf
  Dieses Verfahren ist genauer, als Tangentenverfahren.



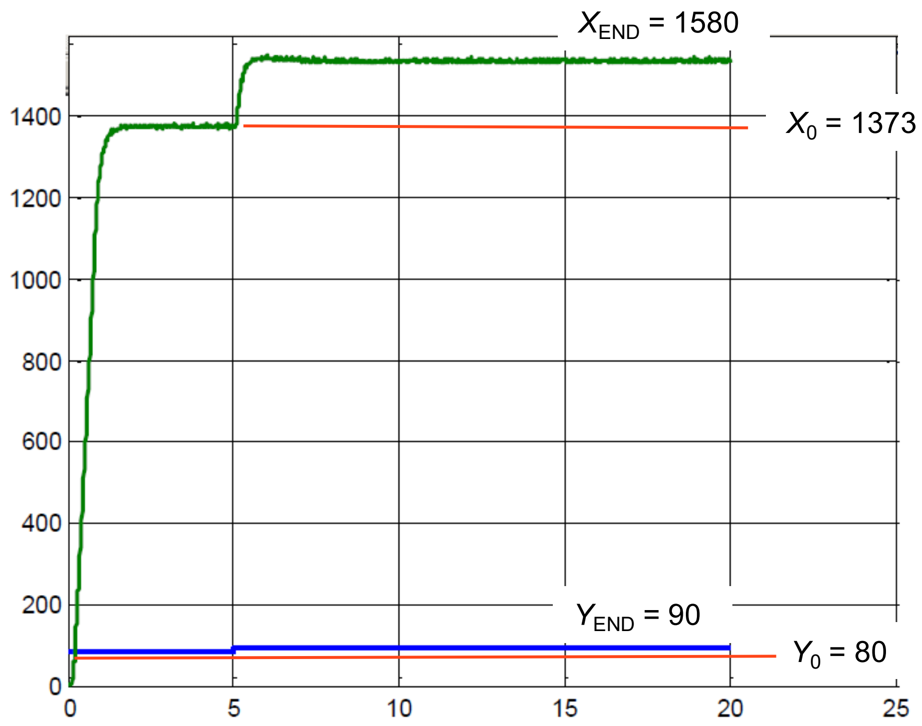
Aber für Strecken großer Ordnung, z.B. *n* = 5 oder 6 wird die Reglereinstellung nach dem Zeit-/Prozentkennlinien-Verfahren. komplizierter. Also, kann man für *n* = 1 bis *n* = 3 kann das Zeit-/Prozentkennlinien-Verfahren empfehlen.

Die Ermittlung des Proportionalbeiwertes K_{PS} ist eigentlich sehr einfach, nämlich $K_{\mathrm{PS}} = \dfrac{x(\infty)}{\hat{y}}$, wird aber oft fehlerhaft gemacht, falls Studierenden den Begriff „Arbeitspunkt" ignorieren.

Im Bild rechts liegt der Arbeitspunkt bei X_0 = 1373 und Y_0 = 80.

Um Arbeitspunkt zu erreichen, soll die Stellgröße zuerst von 0 auf 80 geändert werden (1. Sprung $\hat{y} = 80$).

Es wird $K_{\mathrm{PS}} = \dfrac{1373}{80} = 17{,}16$ bestimmt. Soweit ist ok,



falls der Arbeitspunkt X_0 = 0 und Y_0 = 0 wäre. Hier aber ist gegeben, dass der erste Sprung nur die Anfahrt zum Arbeitspunkt ist, d.h. entscheidend ist der 2. Sprung $\hat{y} = 10$.

Daraus folgt für diesen Arbeitspunkt:

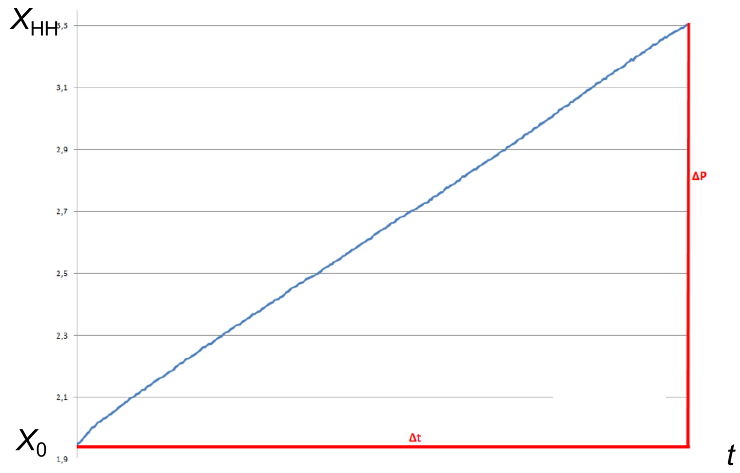
$$K_{\mathrm{PS}} = \frac{1542 - 1373}{90 - 80} = \frac{169}{10} = 16{,}9$$

Des weiteren soll man merken, dass in der Praxis die Strecken nichtlinear sind, d.h. ein anderer Sprung aus gleichem Arbeitspunkt X_0 = 1373 und Y_0 = 80, z.B. $\hat{y} = 30$ oder in Gegenrichtung $\hat{y} = -20$ kann zu solchen X_{END}-Werten führen, dass der Proportionalbeiwert K_{PS} zu anderen Werten resultieren wird. Es ist klar, dass zu jedem K_{PS} bzw. zu jedem Arbeitspunkt soll der Regler entsprechend umgestellt werden. Daraus folgenden die Regelungs-Strategien: entweder die Nichtlinearität ignorieren und K_{PR} konstant halten, oder:

- *Adaptive Regelung*, d.h. zu jedem neuen Arbeitspunkt den K_{PS} bestimmen und K_{PR} automatisch anpassen.
- *Gain-Scheduling* bzw. die K_{PS} -Werte vorab bestimmen und eine Tabelle für K_{PR}-Werte bilden.

Antwort zu Frage 9a: Identifikation der Strecke

Ein anderer Fehler kann passieren, falls Studierenden die Schutz-Steuerung, mit der in der Praxis oft die Strecken ausgestattet sind, nicht berücksichtigen.
Die Sprungantwort einer Temperaturregelstrecke (Bild rechts), die allein aus deren physikalischen Natur einen Ausgleich hat bzw. ein P-Tn-Gleid ist, wurde anhand der Rampenform theoretisch korrekt als ein I-Glied identifiziert.



In Wirklichkeit hat die Schutz-Steuerung die Heizung beim Erreichen des vorprogrammierten X_{HH}-Wertes (High-High) einfach ausgeschaltet, was vom Studierenden fehlerweise als X_{END}-Wert verstanden und für die Berechnung von K_{PS} benutzt wurde. Anderseits darf man die Schutz-Steuerung nicht aus der Kraft setzen, sonst die Strecke beschädigt wird.
Die korrekte Lösung bestand also darin, den Eingangssprung viel kleiner als im obigen Beispiel auszuwählen und genig lange warten, bis der echte Beharrungswert X_{END} erreicht wird.

Und noch ein Fehler beim Sprung-Versuch kann passieren, wenn die Strecke bereits in einem Regelkreis mit einem PID-Regler geregelt wird. Um die Wirkung des Regler zu eliminieren, setzt die/der Studierende die Kennwerte wie folgt ein:

P-Anteil bzw. K_{PR}=1 (es soll K_{PR}=0 sein, aber in diesem Fall kein Stellsignal kommt auf die Strecke)

I-Anteil bzw. 1/Tn = 0

D-Anteil bzw. Tv = 0

Als Ergebnis wird nicht die Strecke $G_s(s)$ identifiziert, sondern der geschlossene Regelkreis mit dem K_{PR}=1:

$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{(1+sT_1)(1+sT_2)...(1+sT_n)} \longleftrightarrow G_w(s) = \frac{G_0(s)}{1+G_0(s)} = \frac{K_{PR}K_{PS}}{(1+sT_1)(1+sT_2)...(1+sT_n)+K_{PR}K_{PS}}$$

Antwort zu Frage 9b:

Wenn Sie den PID-Regler möglichst einfach und schnell einstellen möchten, dann wenden Sie sich an folgende Lehrbücher, wo die standardisierte Einstellregeln gegeben sind:

Regelungstechnik Aufgaben https://www.szacher.de/my-Books/RT_Aufgaben
Drei-Bode-Plots-Verfahren https://www.springer.com/de/book/9783658292195

Wenn Sie über Einstellverfahren nachlesen möchten, dann nehmen Sie das Buch
Regelungstechnik für Ingenieure https://www.szacher.de/my-Books/RT_Ingenieure
oder das bereits erwähnte Skript RT1 wie auch das Skript RT2:
https://www.szacher.de/.cm4all/uproc.php/0/Lehre/DHBW_Stuttgart/RT_2/RT2_ST_2019_20.pdf?_=16da7fced90&cdp=a

Wenn Sie über den PID-Regler mehr wissen möchten, dann kann ich Ihnen den Automation-Letter 09 empfehlen:
https://www.zacher-international.com/Automation_Letters/09_PID_Gesichte.pdf

Antwort zu Frage 9a und 9b:

Alternativ können Sie beide Probleme – Identifikation der Strecke und Reglereinstellung - mit einem Tool lösen, nämlich mit dem AFIC:

Regelungstechnik für Ingenieure (15. Auflage), Verlag Springer Vieweg, 2017, Seiten 365-367
https://www.szacher.de/my-Books/RT_Ingenieure

Die Beschreibung von AFIC finden Sie auf meiner Webseite https://www.szacher.de/New-Concepts-of-Control/
als PDF-Datei
https://www.zacher-international.com/New_Concepts/AFIC/Adaptiver_Regler_12_01_11.pdf

Dort ist auch ein Beispiel-Projekt gezeigt:
https://www.zacher-international.com/New_Concepts/AFIC/AFIC-Beispielprojekt.pdf

Frage 10: PID-Regler mit P-T3-Strecke

Ich habe nach dem Zeit-Prozent-Kennwert-Verfahren eine PT3-Strecke mit Kp=1,56 und T= 0,5 s identifiziert, also Gs(s)=1,56/(1+0,5s)^3.
Gerne möchte ich einen PID-Regler verwenden. Sofern ich die Tabelle zu den 6 Standardtypen von G0(s) richtig deute, lässt sich meine Übertragungsfunktion damit keinem Standardregelkreis zuordnen. Wie unter Kapitel 1.3.5 Ersatzzeitkonstante aufgeführt ist, kann ich keine Ersatzzeitkonstante wählen, da ja alle Zeitkonstanten gleich groß sind. Muss ich in diesem Fall ein anderes Stabilitäts-Kriterium wählen?
Ich würde mich über Ihre Einschätzung hierzu freuen.

Antwort:

$$G_S(s) = \frac{K_{PS}}{(1+sT_1)^3} \qquad G_R(s) = \frac{K_{PR}(1+sT_n)(1+sT_v)}{sT_n}$$

$$G_0(s) = G_R(s)G_S(s) = \frac{K_{PR}(1+sT_n)(1+sT_v)}{sT_n} \cdot \frac{K_{PS}}{(1+sT_1)^3}$$

Nach der Kompensation mit

$$T_n = T_1 = 0,5 \qquad T_v = T_1 = 0,5$$

ergibt sich der Grundtyp A:

$$G_0(s) = \frac{K_{PR}K_{PS}}{sT_n(1+sT_1)}$$

Daraus folgt die Reglereinstellung nach der Tabelle für Grundtyp A: $K_{PR} = \dfrac{T_n}{4\vartheta^2 K_{PS} T_1}$

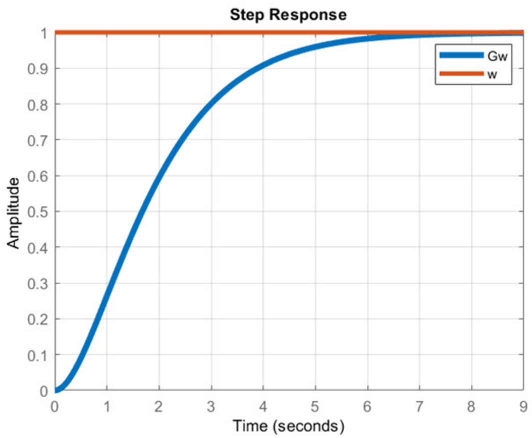
Welche Dämpfung ϑ soll der Regelkreis in Ihrem Beispiel haben? Soll die Regelung ohne Überschwingung bzw. monoton erfolgen? Wenn „ja", dann soll ϑ =1 gesetzt werden.
Wenn doch eine kleine Überschwingung von 4,3% erlaubt ist, dann soll $\vartheta = \dfrac{1}{\sqrt{2}}$ gesetzt werden, was man Betragsoptimum nennt.

Die Reglereinstellung für ϑ =1:

$$K_{\mathrm{PR}} = \frac{T_{\mathrm{n}}}{4\vartheta^2 K_{\mathrm{PS}} T_1} = \frac{0,5}{4 \cdot 1^2 \cdot 1,56 \cdot 0,5} = 0,08$$

Lösungskontrolle für ϑ =1:

```
Kps=1.56;T1=0.5;
Tn=T1;Tv=T1; % Kompensation
theta=1; % ohne Überschwingung
KpR=Tn/(4*theta^2*Kps*T1);
s=tf('s');
GR=KpR*(1+s*Tn)*(1+s*Tv)/(s*Tn);
Gs=Kps/(1+s*T1)^3;
G0=GR*Gs;
Gw=G0/(1+G0);
w=1*s/s; % Sollwert, Führungsgröße
step(Gw, w)
grid
```

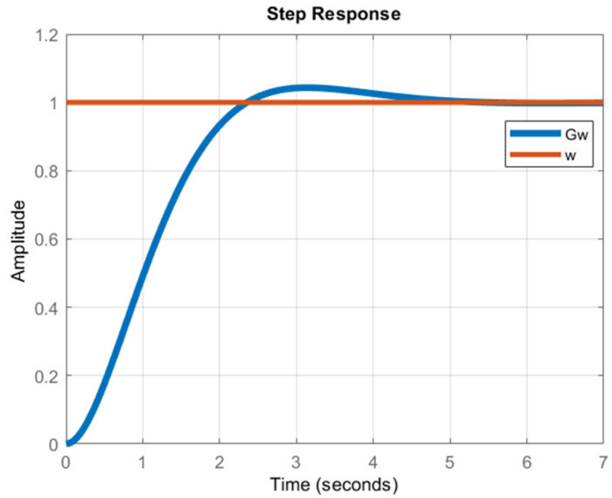


Die Reglereinstellung fürs Betragsoptimum:

$$K_{\mathrm{PR}} = \frac{T_{\mathrm{n}}}{2 K_{\mathrm{PS}} T_1} = \frac{0,5}{2 \cdot 1,56 \cdot 0,5} = 0,16$$

Lösungskontrolle fürs Betragsoptimum:

```
Kps=1.56;T1=0.5;
Tn=T1;Tv=T1; % Kompensation
theta=1/sqrt(2); % mit 4,3% Überschwingung
KpR=Tn/(4*theta^2*Kps*T1);
s=tf('s');
GR=KpR*(1+s*Tn)*(1+s*Tv)/(s*Tn);
Gs=Kps/(1+s*T1)^3;
G0=GR*Gs;
Gw=G0/(1+G0);
w=1*s/s; % Sollwert, Führungsgröße
step(Gw, w)
grid
```



Frage 11: Digitaler Kompensationsregler

mir ist beim Rechnen der Musterklausur eine Frage zur Aufgabe 6 gekommen.
Und zwar steht im Skripts im allgemeinen Vorgehen, dass nur die Nullstellen der Strecke in den Nenner des Reglers kommen, sowie die Polstellen in den Zähler. d0 ist davon nicht betroffen.

$\frac{1}{z-1}$ dem Regler eingeprägt wird (dadurch wird der Nenngrad um Eins erhöht).

$$R_z(z) = r_0 \frac{(z-z_{p1})(z-z_{p2})(z-z_{p3})}{\underbrace{(z-1)}_{I-Anteil}(z-z_{01})(z-z_{02})}$$

Entwurf des Kompensationsreglers:

$$G_0(z) = R_z(z)G_{HS}(z) = r_0 \frac{(z-z_{p1})(z-z_{p2})(z-z_{p3})}{(z-1)(z-z_{01})(z-z_{02})} \cdot d_0 \frac{(z-z_{01})(z-z_{02})}{(z-z_{p1})(z-z_{p2})(z-z_{p3})}$$

$$G_0(z) = R_z(z)G_{HS}(z) = \frac{r_0 d_0}{z-1}$$

Charakteristische Gleichung des geschlossenen Regelkreises: $z-1+r_0 d_0 = 0$

$$z = 1 - r_0 d_0 = z_0$$

Daraus folgt die Einstellung: $r_0 = \frac{1-z_0}{d_0}$

In Ihrer Musterlösung wird d0 allerdings mit in den Nenner genommen und anschließen gekürzt. Warum? Oder ist d0 ungleich 0,8?

$$G_{HS}(z) = \frac{0{,}8z}{(z^2 - 1{,}6z + 0{,}8)(z - 0{,}8)}$$

$$(z^2 - 1{,}6z + 0{,}8)(z - 0{,}8) = 0$$

$$z_{1,2} = 0{,}8 \pm j0{,}4 \qquad |z| = \sqrt{0{,}8^2 + (0{,}4)^2} = 0{,}8944 < 1 \quad \text{Strecke ist stabil}$$

$$z_3 = 0{,}8$$

$$R_z(z) = r_0 \frac{(z^2 - 1{,}6z + 0{,}8)(z - 0{,}8)}{0{,}8z(z - 1)}$$

$$G_{0z}(z) = r_0 \frac{(z^2 - 1{,}6z + 0{,}8)(z - 0{,}8)}{0{,}8z(z - 1)} \frac{0{,}8z}{(z^2 - 1{,}6z + 0{,}8)(z - 0{,}8)} = \frac{r_0}{z - 1}$$

$$G_{wz}(z) = \frac{r_0}{z - 1 + r_0}$$

$$z - 1 + r_0 = 0$$

$$z = 1 - r_0 = z_0$$

$$r_0 = 1 - z_0 = 0{,}4$$

Es stellt sich uns die Frage welcher Weg nun der Richtige ist und warum.

Vielen Dank im Voraus!

Antwort zu Frage 11:

Es gibt keine mehrere Wege, sondern nur einen Lösungsweg, welcher zur einer einzigen Lösung bei dem gegebenen Proportionalbeiwert der Strecke d_0=0,8 und der gewünschten Polstelle des geschlossenen Regelkreises z_0=0,6 führt. Um dies zu erklärten, möchte ich jedoch zuerst ein Paar Fragen stellen: wie groß ist der Proportionalbeiwert K_{PR} des digitalen Kompensationsreglers

$$R_z(z) = \frac{r_0(z^2 - 1{,}6z + 0{,}8)(z - 0{,}8)}{d_0 z(z-1)} = \frac{K_{PR}(z^2 - 1{,}6z + 0{,}8)(z - 0{,}8)}{z(z-1)}$$

bei der Muster-Lösung, K_{PR}=0,4 oder K_{PR}=0,5?

Die Antwort ist:

$$K_{PR} = \frac{r_0}{d_0} = \frac{r_0}{0{,}8} = \frac{0{,}4}{0{,}8} = 0{,}5$$

Meine nächste Frage ist: wie groß wird der Proportionalbeiwert K_{PR} denselben digitalen Kompensationsreglers

$$R_z(z) = \frac{r_0(z^2 - 1{,}6z + 0{,}8)(z - 0{,}8)}{z(z-1)}$$

nach der Skript-Lösung?

Die Antwort ist: $G_{0z}(z) = \dfrac{r_0 d_0}{(z-1)}$

$$z - 1 + r_0 d_0 = 0 \quad \Rightarrow \quad r_0 = \frac{1 - z_0}{d_0} = \frac{1 - 0{,}6}{0{,}8} = 0{,}5 \quad \Rightarrow \quad K_{PR} = r_0 = 0{,}5$$

Antwort zu Frage 11:

Fazit: Die Lösung ist von der Wahl des Koeffizienten d_0 der Strecke nicht abhängig.

Beispiel 1 mit $d_0=0{,}8$ und $z_0=0{,}6$

$$G_{HS}(z)=d_0\frac{z}{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}$$

$$R_z(z)=\frac{r_0}{z-1}\cdot\frac{1}{G_{HS}(z)}=r_0\cdot\frac{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}{d_0\cdot z(z-1)}$$

$$G_{0z}(z)=R_z(z)G_{HS}(z)$$

$$G_{0z}(z)=r_0\frac{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}{d_0\cdot z(z-1)}\cdot d_0\frac{z}{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}$$

Beispiel 2 mit $d_0=5$ und $z_0=0{,}6$

$$G_{HS}(z)=d_0\frac{0{,}16z}{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}$$

$$R_z(z)=\frac{r_0}{z-1}\cdot\frac{1}{G_{HS}(z)}=r_0\cdot\frac{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}{d_0\cdot 0{,}16z(z-1)}$$

$$G_{0z}(z)=R_z(z)G_{HS}(z)$$

$$G_{0z}(z)=r_0\frac{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}{d_0\cdot 0{,}16z(z-1)}\cdot d_0\frac{0{,}16z}{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}$$

$$G_{0z}(z)=r_0\frac{1}{(z-1)}$$

$$G_{wz}(z)=\frac{1}{(z-1)+r_0}$$

$$z-1+r_0=0$$

$$z=1-r_0=z_0$$

$$r_0=1-0{,}6=0{,}4$$

Beispiel 1:

$$R_z(z)=r_0\cdot\frac{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}{d_0\cdot z(z-1)}$$

$$R_z(z)=0{,}4\cdot\frac{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}{0{,}8\cdot z(z-1)}$$

Beispiel 2:

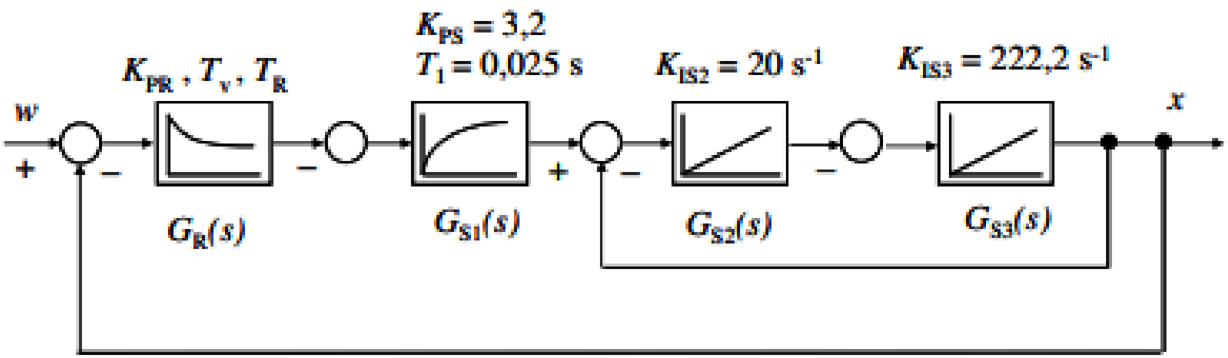
$$R_z(z)=r_0\cdot\frac{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}{d_0\cdot z(z-1)}$$

$$R_z(z)=0{,}4\cdot\frac{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}{5\cdot 0{,}16z(z-1)}$$

$$\boxed{R_z(z)=0{,}5\frac{(z^2-1{,}6z+0{,}8)(z-0{,}8)}{z(z-1)}}$$

Frage 12: Mit- und Gegenkopplung

Ich bereite mich derzeit auf die Prüfung vor und habe eine Aufgabe vor mir bei der ich eine Sache nicht verstehe. Es handelt sich um folgende Aufgabe:



Bestimmen Sie die Einstellung des Reglers so, dass der Regelkreis stabil wird.

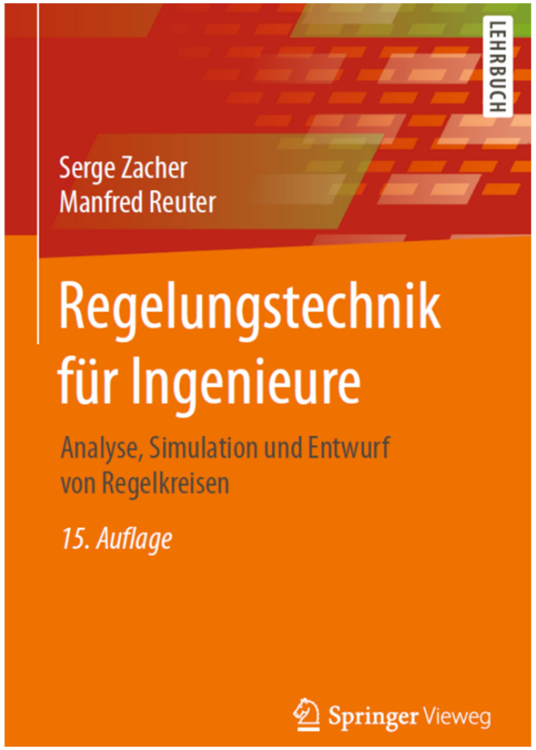
Nun habe ich $G_0(s)$ berechnen wollen und komme dabei aber nicht auf das Ergebnis aus der Lösung im Skript. Konkret geht es um ein Vorzeichen, siehe Markierung im Bild.

$$G_0(s) = \frac{K_{PR}(1+sT_v)}{1+sT_R} \cdot \frac{K_{PS1}}{1+sT_1} \cdot \frac{\frac{K_{IS2}}{s} \cdot \frac{K_{IS3}}{s}}{1 - \frac{K_{IS2}}{s} \cdot \frac{K_{IS3}}{s}}$$

Hier komme ich auf ein +. Die Rückkopplung müsste doch eigentlich Gs2*Gs3/(1+ Gs2*Gs3) ergeben oder habe ich hier einen Denkfehler?

Antwort zu Frage 12:

Die Antwort und die Herleitung finden Sie in unserem Buch S .Zacher, M. Reuter *„Regelungstechnik für Ingenieure“*, 15. Auflage, Springer-Vieweg Verlag, 2017, Seite 44



c) Rückführungsschaltung

Wie **Bild 2.24** zeigt, wird die Ausgangsgröße $x_a(s)$ des ersten Gliedes $G_1(s)$ über ein zweites Glied mit $G_2(s)$ auf den Eingang von $G_1(s)$ zurückgeführt und zu der Eingangsgröße $x_e(s)$ addiert (Mitkopplung) oder von der Eingangsgröße subtrahiert (Gegenkopplung).

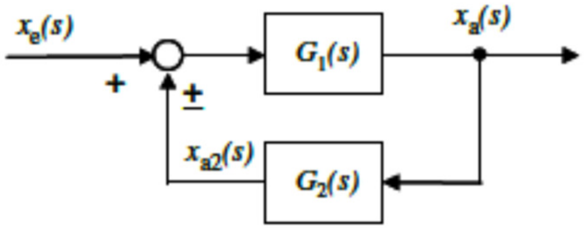


Bild 2.24 Rückkopplungs-schaltung

Für den oberen Block gilt:

$$x_a(s) = G_1(s) \cdot [x_e(s) \pm x_{a2}(s)]$$

und für den unteren Block (im Rückführzweig):

$$x_{a2}(s) = G_2(s) \cdot x_a(s) .$$

Setzt man $x_{a2}(s)$ in die obere Gleichung ein, so erhält man:

$$x_a(s) = G_1(s) \cdot [x_e(s) \pm G_2(s) \cdot x_a(s)]$$

bzw.

$$x_a(s) \cdot [1 \mp G_1(s) G_2(s)] = G_1(s) \cdot x_e(s) .$$

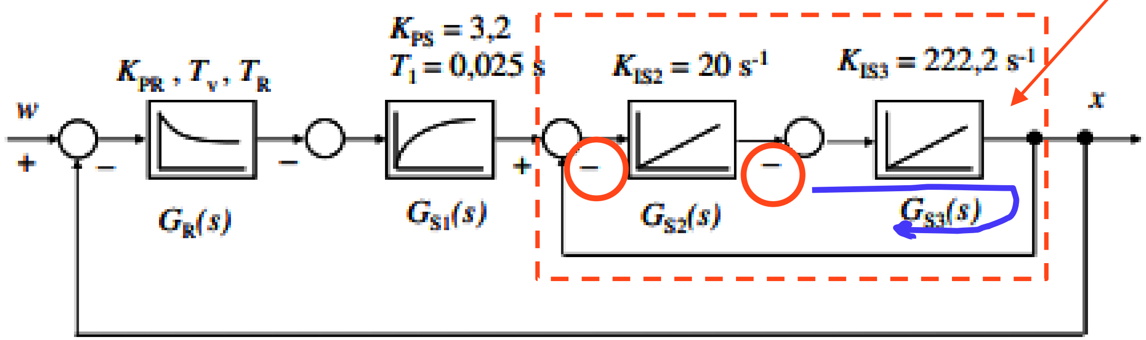
Daraus folgt die Übertragungsfunktion der Rückführschaltung:

$$G(s) = \frac{x_a(s)}{x_e(s)} = \frac{G_1(s)}{1 \mp G_1(s) G_2(s)} ,$$

Mitkopplung $\hat{=}$ negatives Vorzeichen
Gegenkopplung $\hat{=}$ positives Vorzeichen.

Antwort zu Frage 12:

Was ist es also in Ihrer Aufgabe, Mitkopplung oder Gegenkopplung?



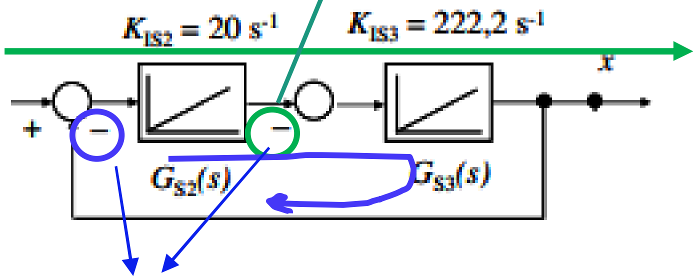
Hier, in diesem kleinen internen Kreis, entsteht eine Mitkopplung, weil sich ein „minus“ nach dem anderen „minus“ ein „plus“ ergibt.

Nun die nächste Frage: Wenn es eine Mitkopplung ist, welches Vorzeichen in der Formel stehen soll? Die Antwort haben wir schon auf der Seite 44 des Buches gegeben, nämlich, „minus“. Also, die im Skript gegebene Lösung ist korrekt.

Die Mitkopplung ist typisch für Generatoren, bei Regelkreisen kommt sie eher selten vor, weil dadurch der Kreis instabil werden kann.

Lösen wir doch erneut Ihre Aufgabe und zwar ausführlicher, Schritt für Schritt. Betrachten wir zuerst nur den internen Kreis, wie unten im Wirkungsplan gezeigt ist, und bestimmen wir dafür die Übertragungsfunktion $G_{w\_intern}(s)$.

$$G_{vorwärts\_intern}(s) = - \frac{K_{is2}}{s} \cdot \frac{K_{is3}}{s}$$



„minus“ und „minus“
= Mitkopplung

$$G_{0\_intern}(s) = \frac{K_{is2}}{s} \cdot \frac{K_{is3}}{s}$$

$$G_{w\_intern}(s) = \frac{G_{vorwärt\_intern}(s)}{1 - G_{0\_intern}(s)} = \frac{- \frac{K_{is2}}{s} \cdot \frac{K_{is3}}{s}}{1 - \frac{K_{is2}}{s} \cdot \frac{K_{is3}}{s}} = \frac{- \frac{K_{is2}}{s} \cdot \frac{K_{is3}}{s}}{1 - \frac{K_{is2}}{s} \cdot \frac{K_{is3}}{s}}$$

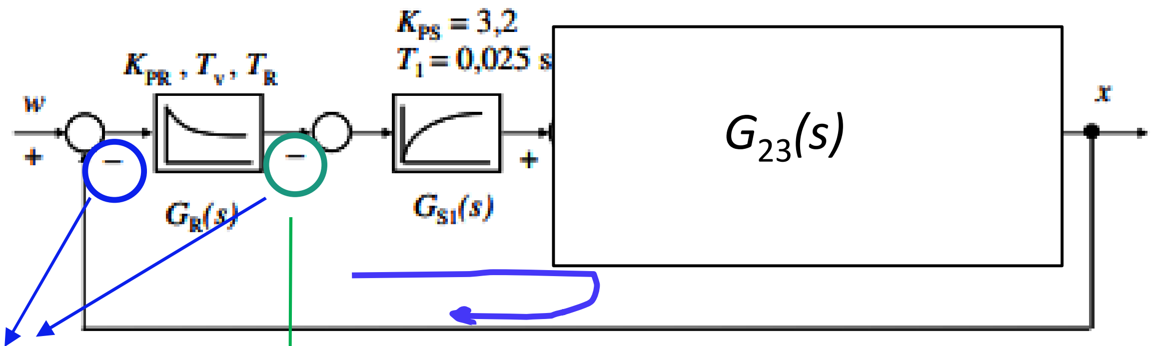
Mitkopplung

Antwort zu Frage 12:

Bezeichnen wir den internen Kreis als nur ein Glied $G_{23}(s)$ und „verstecken“ wir dieses Glied in einem Block, wie unten im Wirkungsplan gezeigt ist:

$$G_{w\_intern}(s) = G_{23}(s) = \frac{-K_{is2}K_{is3}}{s^2 - K_{is2}K_{is3}} = \frac{-K_{is2}K_{is3}}{K_{is2}K_{is3}\left(\frac{1}{K_{is2}K_{is3}}s^2 - 1\right)} = \frac{-1}{\left(\frac{1}{K_{is2}K_{is3}}s^2 - 1\right)} = \frac{-1}{\left(T_2^2 s^2 - 1\right)}$$

Im gesamten Regelkreis $G_w(s)$ gilt auch eine Mitkopplung?



Mitkopplung

Bestimmen wir die Übertragungsfunktion $G_0(s)$.

$$\boxed{G_0(s) = -\, G_R(s)\cdot G_{S1}(s)\cdot G_{23}(s)}$$

Setzen wir alle Werte in diese Formel für $G_0(s)$ ein:

$$G_0(s) = -G_R(s)\cdot G_{S1}(s)\cdot G_{23}(s) = -\frac{K_{PR}(1+sT_v)}{(1+sT_R)}\cdot\frac{K_{PS1}}{1+sT_1}\cdot\frac{-1}{\left(T_2^2 s^2 - 1\right)} = \boxed{\frac{K_{PR}(1+sT_v)}{(1+sT_R)}\cdot\frac{K_{PS1}}{1+sT_1}\cdot\frac{1}{\left(T_2^2 s^2 - 1\right)}}$$

Diese Formel für $G_0(s)$ ist im Skript gegeben!

Antwort zu Frage 12:

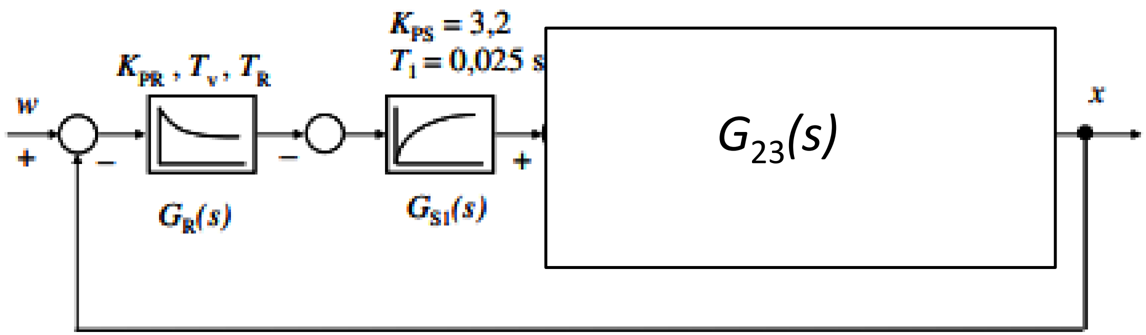
Hoffentlich wurde somit Ihre Frage klar beantwortet.
Trotzdem stelle ich zur Kontrolle zwei Fragen.

<u>1. Frage</u>

Der Wirkungsplan eines Regelkreises ist unten gegeben. Die Übertragungsfunktion *$G_0(s)$* des offenen Kreises wurde oben bereits ermittelt:

$$G_0(s) = -\frac{K_{PR}(1+sT_v)}{(1+sT_R)} \cdot \frac{K_{PS1}}{1+sT_1} \cdot \frac{1}{\left(T_2^2 s^2 - 1\right)}$$

Bestimmen wir die Übertragungsfunktion *$G_w(s)$* des geschlossenen Kreises!



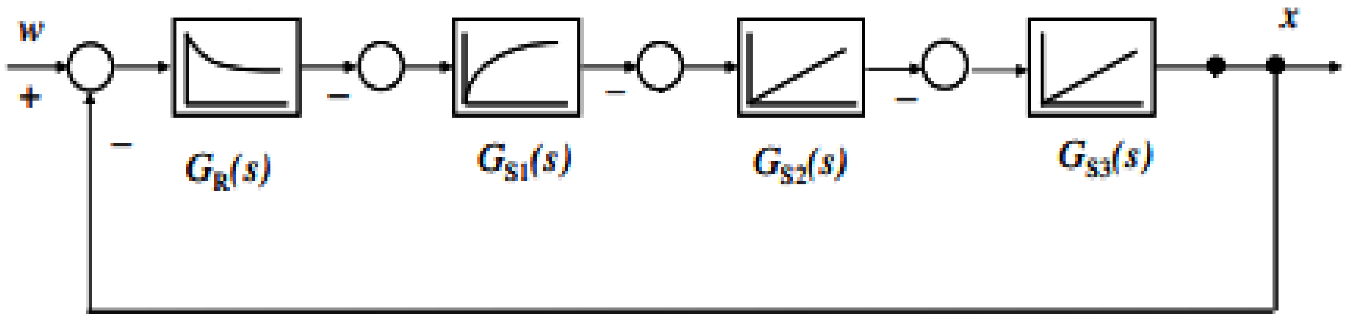
Die Antwort ist:

$$G_w(s) = \frac{\dfrac{K_{PR}(1+sT_v)}{(1+sT_R)} \cdot \dfrac{K_{PS1}}{1+sT_1} \cdot \dfrac{1}{(T_2^2 s^2 - 1)}}{1 - \dfrac{K_{PR}(1+sT_v)}{(1+sT_R)} \cdot \dfrac{K_{PS1}}{1+sT_1} \cdot \dfrac{1}{(T_2^2 s^2 - 1)}} = \frac{K_{PR}K_{PS1}(1+sT_v)}{(1+sT_R)(1+sT_1)(T_2^2 s^2 - 1) - K_{PR}K_{PS1}(1+sT_v)}$$

Antwort zu Frage 12:

2. Frage

Der Wirkungsplan eines Regelkreises ist unten gegeben.



Welche der unten gezeigten Übertragungsfunktionen $G_w(s)$ des geschlossenen Regelkreises ist korrekt, A, B oder C?

A: $$G_w(s) = \frac{G_R(s)G_{S1}(s)G_{S2}(s)G_{S3}(s)}{1+G_R(s)G_{S1}(s)G_{S2}(s)G_{S3}(s)}$$

B: $$G_w(s) = \frac{-G_R(s)G_{S1}(s)G_{S2}(s)G_{S3}(s)}{1-G_R(s)G_{S1}(s)G_{S2}(s)G_{S3}(s)}$$

C: $$G_w(s) = \frac{G_R(s)G_{S1}(s)G_{S2}(s)G_{S3}(s)}{1-G_R(s)G_{S1}(s)G_{S2}(s)G_{S3}(s)}$$

Antwort zu Frage 12:

Hinweis zur Lösung

Für einen Regelkreis mit Gegenkopplung soll die Anzahl von Minus-Vorzeichen beim „Durchlaufen" durch den Kreis ungerade sein:

$$G_w(s) = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)}$$

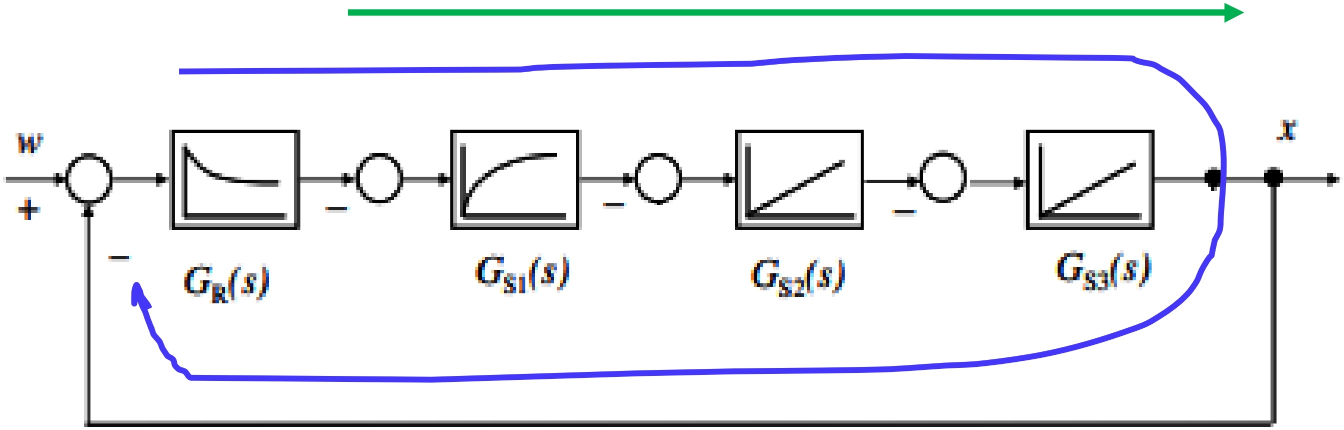
Wenn die Anzahl von Minus-Vorzeichen beim „Durchlaufen" gerade ist, handelt es sich um die Mitkopplung:

$$G_w(s) = \frac{G_0(s)}{1 - G_0(s)}$$

Die Antwort auf die Frage 2 ist B, weil es 3 Minus-Zeichen im Vorwärts-Signalweg und 4 Minus-Zeichen in Kreis-Kontur gibt.

$$G_w(s) = \frac{-G_R(s)G_{S1}(s)G_{S2}(s)G_{S3}(s)}{1 - G_R(s)G_{S1}(s)G_{S2}(s)G_{S3}(s)}$$

Vorwärts-Signalweg mit ungerade Zahl der Minus-Zeichen



Im Kreis ist gerade Zahl der Minus-Zeichen, d.h. Mitkopplung

Frage 13: Mehrfache Phasenreserve

S .Zacher *„Regelungstechnik Aufgaben“*, 4. Auflage, 2016
https://www.szacher.de/my-Books/RT_Aufgaben/

Bei der Vorbereitung auf die kommenden Klausuren ist die folgende Frage bei mir aufgetaucht.
Übungsaufgabe 2.10.6, Seite 34 aus dem Buch „Regelungstechnik Aufgaben“
In der Teilaufgabe c) wird nach der Reglerverstärkung gefragt, bei der die Phasenreserve 45° beträgt. In der Lösung wird hier der Punkt ω =0,4 gewählt und K_{PR} entsprechend ausgerechnet. Im Phasengang gibt es allerdings noch zwei weitere Punkte, an der eine Phasenreserve von 45° vorliegt (siehe eigener Lösungsweg). Sind diese beiden, zusätzlich berechneten Verstärkungen, ebenfalls möglich?

c) (1) $\omega = 0{,}4$ $\Delta dB = 5\,dB$ nach unten ✓
(2) $\omega = 0{,}8$ $\Delta dB = 7\,dB$ nach oben
(3) $\omega = 7$ $\Delta dB = 20\,dB$ nach oben

(1) $\Delta k = 10^{5/20} = 1{,}778$ ✓

$k_{PR\,neu} = k_{PR\,alt} \cdot \frac{1}{\Delta k} = \underline{\underline{0{,}56}}$ ✓

(2) $\Delta k = 10^{7/20} = 2{,}238$

$k_{PR\,neu} = k_{PR\,alt} \cdot \Delta k = \underline{2{,}238}$

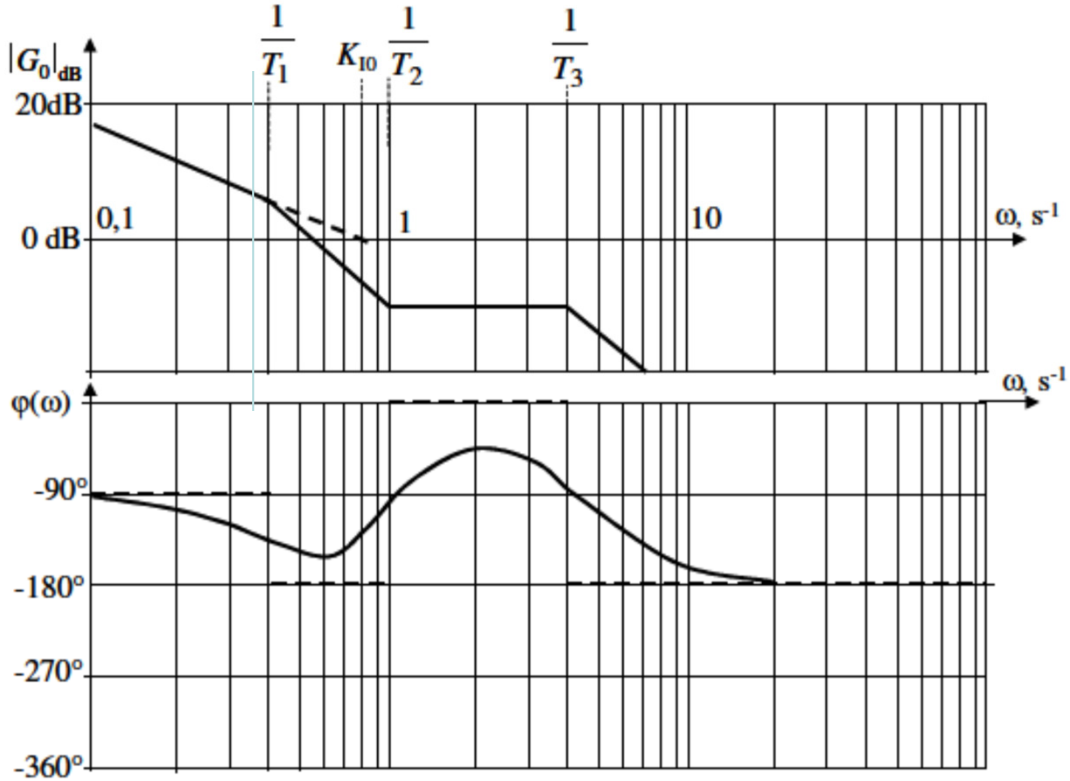
(3) $\Delta k = 10^{20/20} = 10$ $k_{PR\,neu} = k_{PR\,alt} \cdot \Delta k = \underline{10}$

2.10.6 Nyquist-Kriterium im Bode-Diagramm

Das Bode-Diagramm eines aufgeschnittenen Regelkreises

$$G_0(s) = \frac{K_{PR} K_{PS} (1 + sT_2)^2 (1 + sT_n)}{sT_n (1 + sT_1)^2 (1 + sT_3)^2}$$

mit dem vollkompensierten PI-Regler mit $K_{PR} = 1$ ist im Bild 2.15 gezeigt.



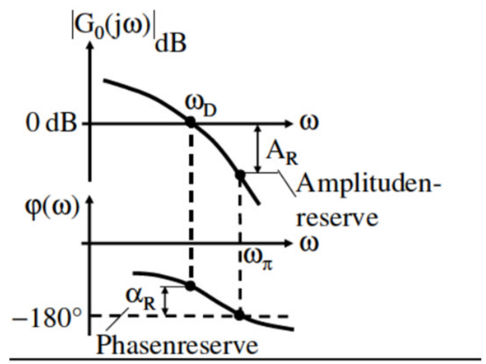
Antwort zu Frage 13:

Ihre Lösung ist korrekt!
Im aktuellen Zustand mit K_{PR} = 1 ist die Phasenreserve φ_{Rd} = 25°.

Die Phasenreserve φ_{Rd} = 45° bzw. α_R = 45° wird erreicht:

1) bei Kreisfrequenz ω_{D1} = 0,4 s^{-1} , wenn K_{PR1} = 0,56 ist.
2) bei Kreisfrequenz ω_{D2} = 0,8 s^{-1} , wenn K_{PR2} = 2,24 ist.
3) bei Kreisfrequenz ω_{D3} = 7,0 s^{-1} , wenn K_{PR3} = 10 ist.

Nyquist-Stabilitätskriterium:



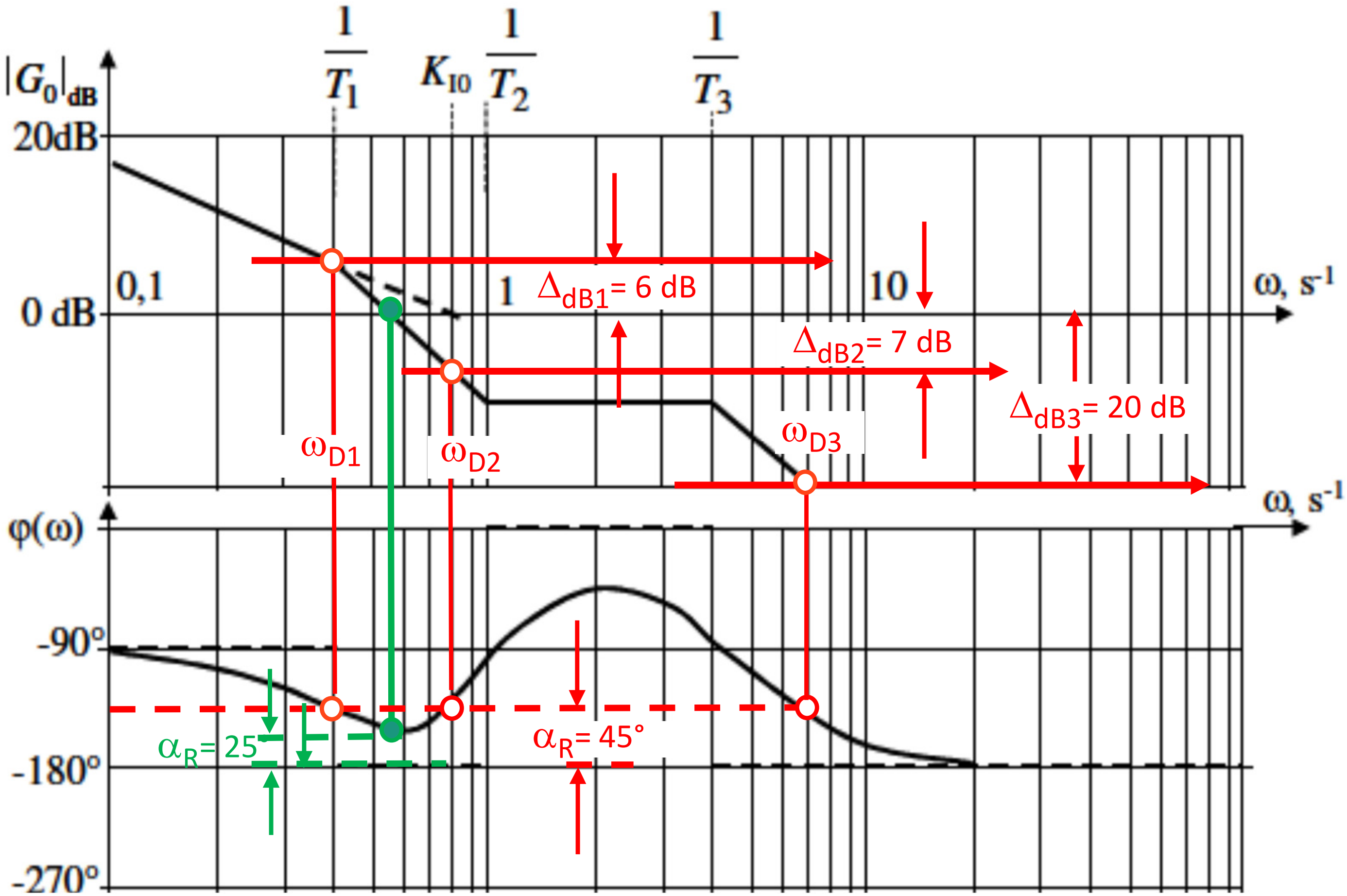
S .Zacher „*Regelungstechnik Aufgaben*“, 4. Auflage, 2016, Seite 2

Also, alle drei Lösungen sind bei dieser Aufgabe möglich.

Aber welcher K_{PR}-Wert von drei obigen Werten soll in der Praxis gewählt werden?

Da die Amplitudenreserve A_R in drei Fällen $A_R = \infty$ ist, wird der Regelkreis bei allen drei K_{PR}-Werten gleiche Dämpfung von ϑ = 0,5 haben, d.h. die Sprungantwort wird mit zwei Halbwellen erfolgen.

Unterschiedlich sind nur die Ausregelzeiten T_{aus} , wie auf der nächsten Seite gezeigt ist.



Antwort zu Frage 13:

Üblicherweise soll der Regelkreis möglichst schnell funktionieren, d.h., es wird von einer Regelung die minimal mögliche Ausregelzeit T_{aus} erwartet, falls keine andere Anforderungen an Regelgütekriterien gestellt werden.

Aber bei welcher von drei Durchtrittsfrequenzen ω_D ist die Ausregelzeiten T_{aus} minimal:

1) $\omega_{D1} = 0{,}4\ s^{-1}$ mit $K_{PR1} = 0{,}56$?
2) $\omega_{D2} = 0{,}8\ s^{-1}$ mit $K_{PR2} = 2{,}24$?
3) $\omega_{D3} = 7{,}0\ s^{-1}$ mit $K_{PR3} = 10{,}0$?

Die Antwort ist auf der Seite 3 des besagten Buches gegeben.

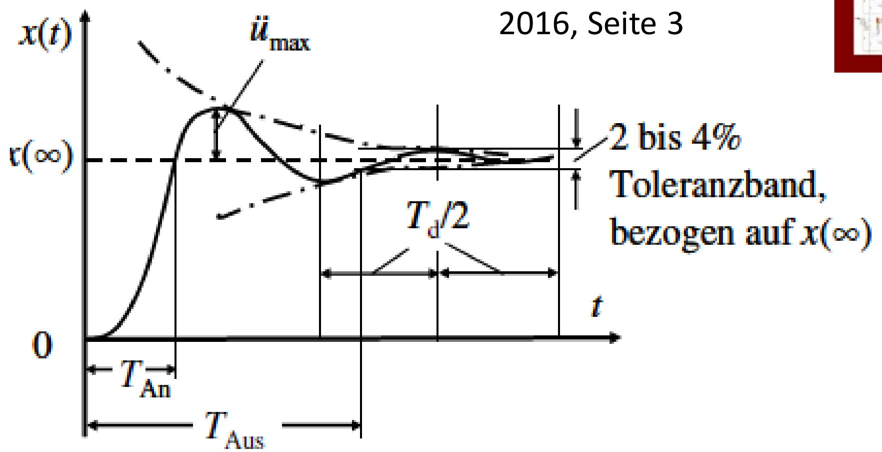
Je größer ist die Eigenkreisfrequenz ω_0 bei gleicher Dämpfung ϑ, desto kleiner ist nach Gl. (4) die Ausregelzeit T_{aus}.

Die größte Eigenkreisfrequenz ω_0 bei gleicher Dämpfung ϑ entspricht nach Gl. (2) und (3) der größten Durchtrittsfrequenz ω_D.

Daraus folgt, dass die kleinste Ausregelzeit T_{aus} bei der größten Durchtrittsfrequenz ω_D erreicht wird. Das ist der Fall 3 mit $\omega_{D3} = 7{,}0\ s^{-1}$ und $K_{PR3} = 10{,}0$.

Auf nächster Seite sind alle drei Fälle mit MATLAB® simuliert.

S .Zacher „*Regelungstechnik Aufgaben*“, 4. Auflage, 2016, Seite 3



Periodendauer: $T_d = \dfrac{2\pi}{\omega_d}$ (1)

Eigenkreisfrequenz:

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1-\vartheta^2} \qquad (2)$$

Durchtrittsfrequenz:

$$\omega_D \approx \omega_d \qquad (3)$$

$$T_{Aus} = \frac{\ln 25}{\vartheta \omega_0} = \frac{3{,}22}{\vartheta \omega_0} \qquad (4)$$

Anzahl der Halbwellen:

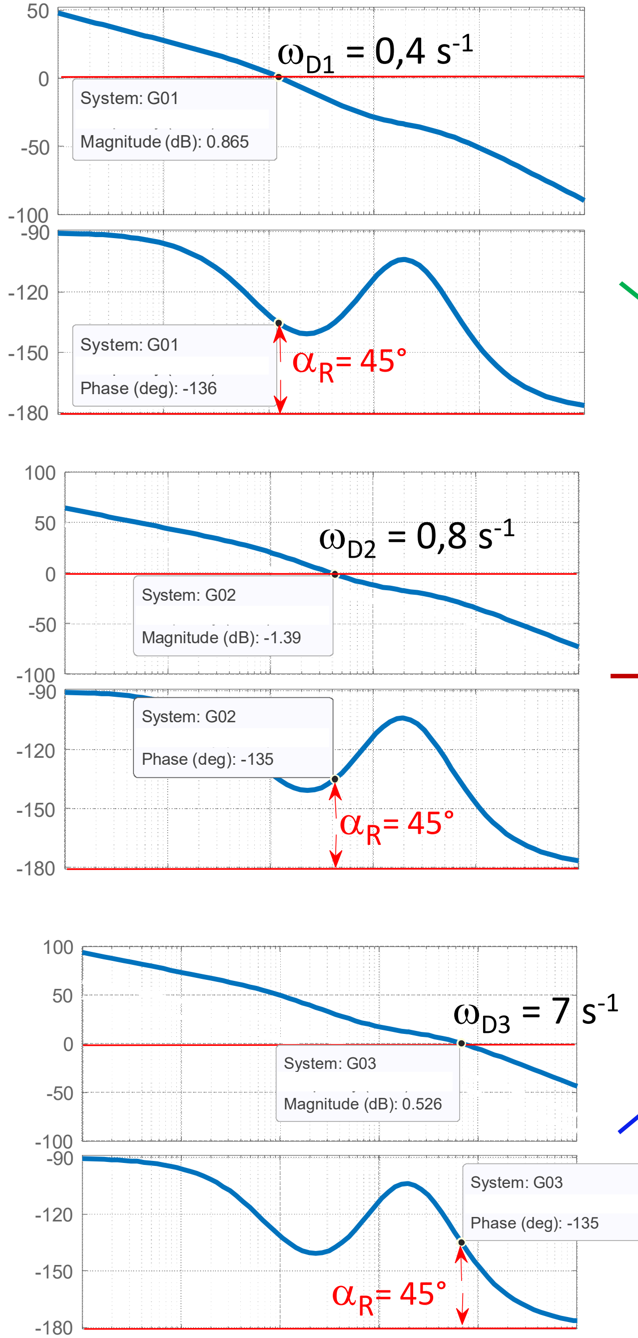
$$N = \sqrt{\frac{1}{\vartheta^2} - 1} \approx \frac{1}{\vartheta} \qquad (5)$$

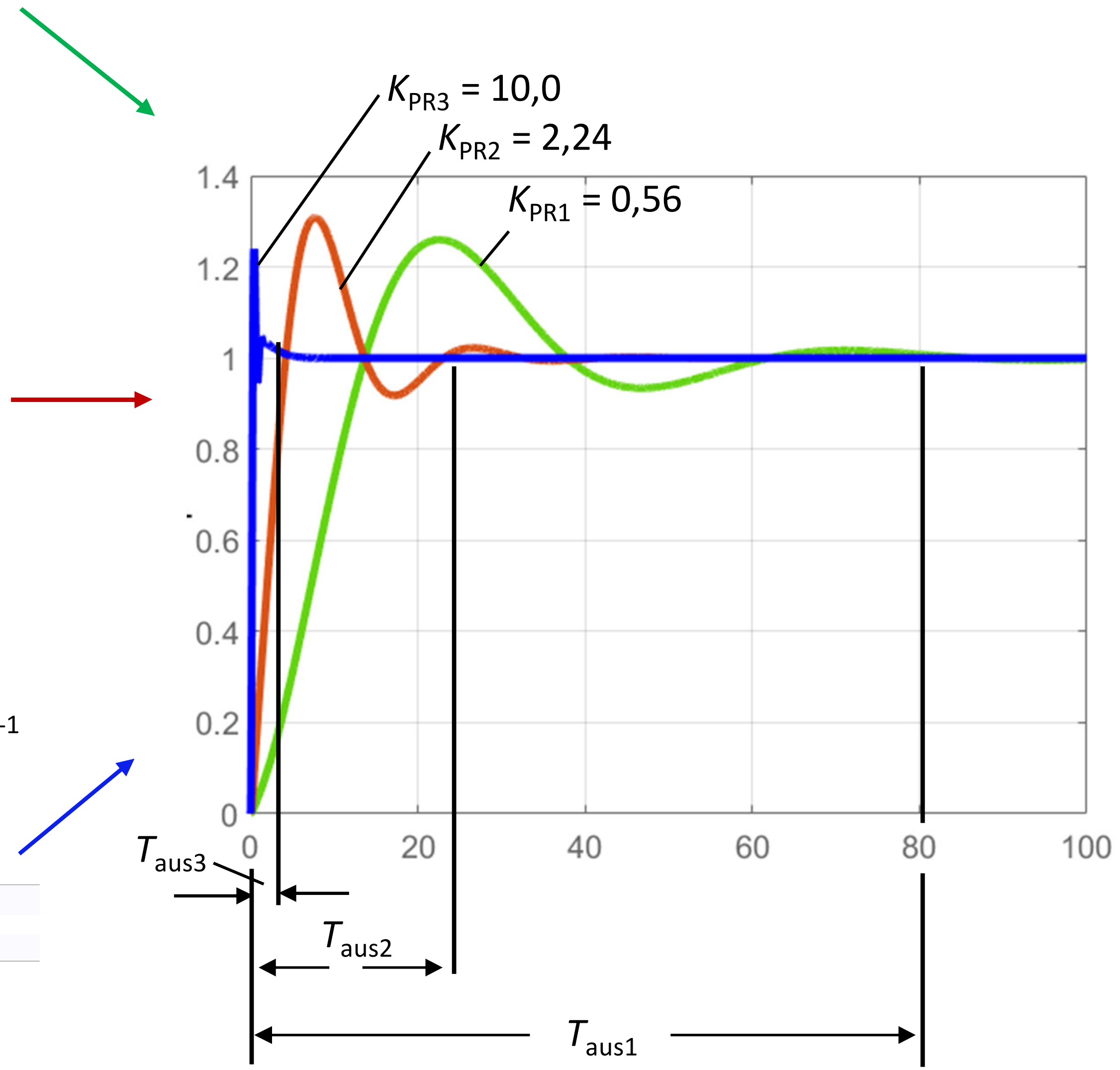
Antwort zu Frage 13:

K_{PR1} = 0,56

K_{PR2} = 2,24

K_{PR3} = 10,0



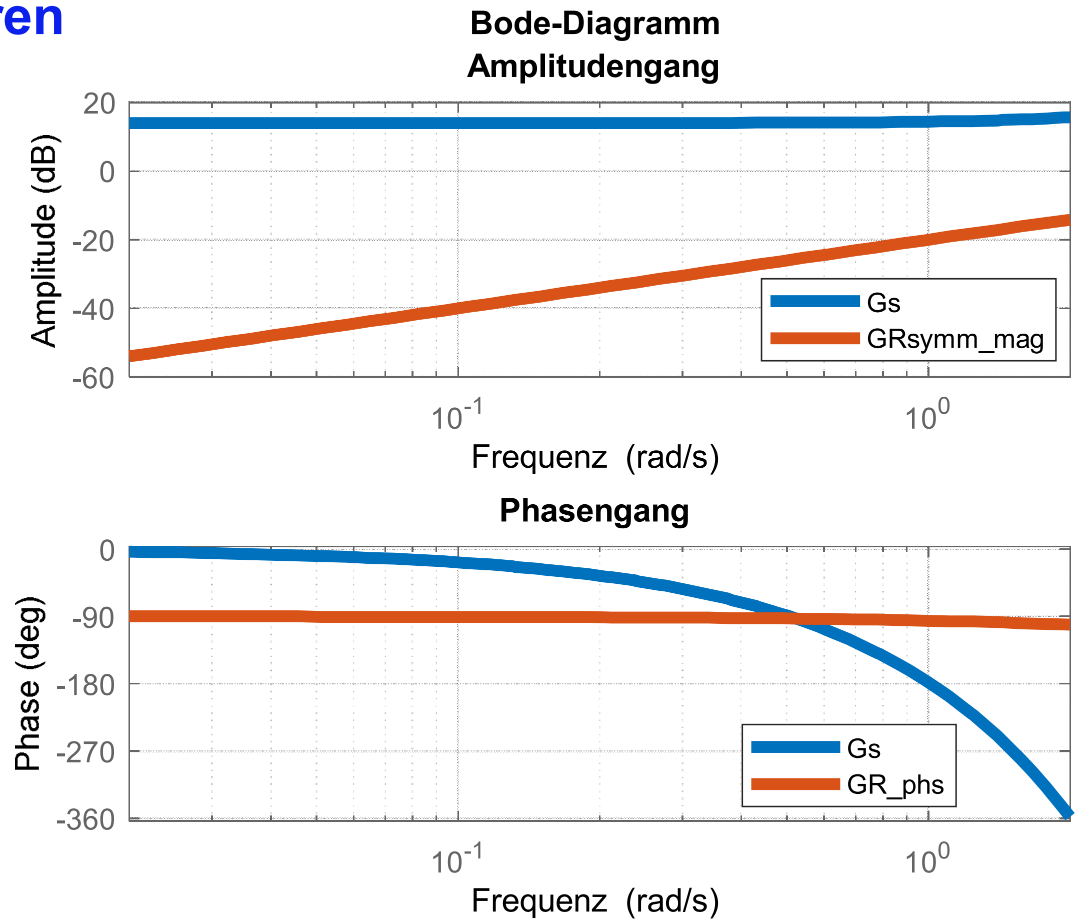


Frage 14: Drei-Bode-Plots-Verfahren

Von:
Gesendet: Mittwoch, 22. Dezember 2021 09:05
An: info@szacher.de
Betreff: Frage zum Drei-Bode-Plot

Guten Morgen Herr Prof. Zacher,
ich muss Ihnen zum Drei-Bode-Plot noch eine Frage stellen.
Muss sich der Phasengang überschneiden oder reicht es, wenn der phasensymmetrische Regler im Phasengang über dem Phasengang der Strecke liegt?

Vielen Dank im Voraus.
Mit besten Grüßen



Antwort zu Frage 14:

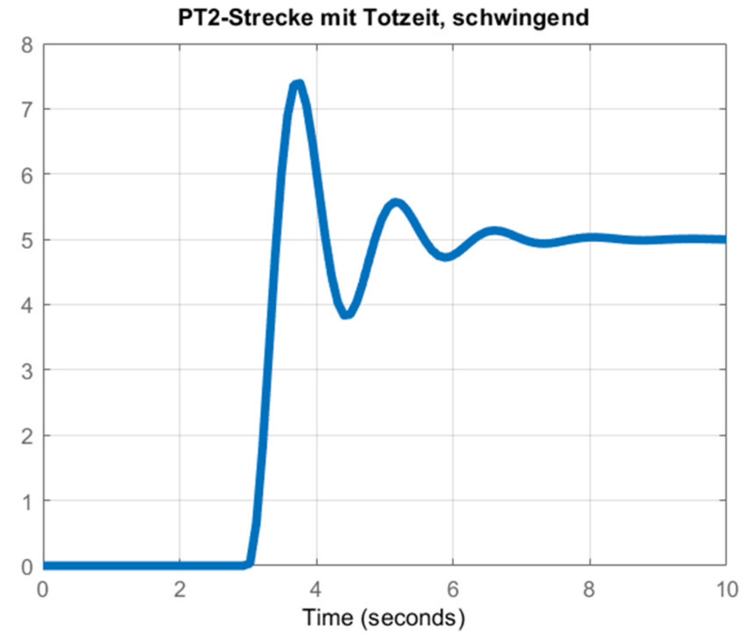
Die Antwort finden Sie im Buch, in Automation-Letter Nr. 11 und in Video:

S .Zacher „*Drei-Bode-Plots-Verfahren*“, 2020
https://www.springer.com/de/book/9783658292195
https://www.zacher-international.com/Automation_Letters/11_Fingerprint_DBV.pdf
https://youtu.be/iil-tRnY3J8

Ja, es stimmt: das DBV ist ungewöhnlich, aber universell, praktisch und einfach. Man kann sagen: „Nyquist, ade, Willkommen Leonhard!“ Hoffentlich wird das Verfahren, das 1940 für Ortskurven angeboten wurde, wieder seinen Platz in Lehrbüchern für die linearen RT, diesmal als Bode-Plot-Option, finden. Nun zum Verfahren (nächste Seiten).

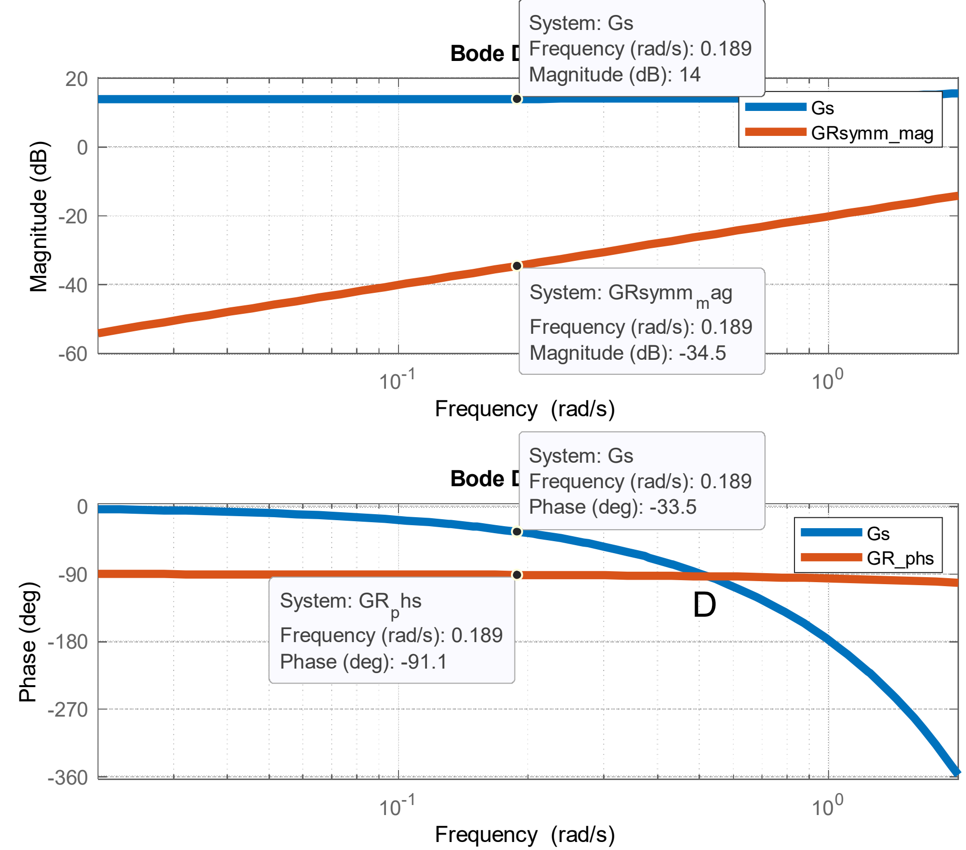
Antwort zu Frage 14: Drei-Bode-Plots-Verfahren

```
% DBV für PT2-Tt-Strecke mit PI-Regler
% Quelle: S.Zacher: "Drei-Bode-Plots-Verfahren für Regelungstechnik", 2020
% 2021 Copyright Dr.Zacher, www.szacher.de
%*****************************************
%% 1.Parameter-Eingabe
clearvars; clc;                          % Bildschirm bzw. Workspace säubern
s = tf('s');                             % Laplace-Operator
Kps=5; a2=0.05; a1=0.1; a0=1;            % Streckenparameter
Tt=1.5;                                  % Tt: Totzeit
Gs1=Kps*exp(-s*Tt)/(a2*s^2+a1*s+a0);     % Gs1:Teiltrecke ohne Totzeit
Gs2=exp(-s*Tt)*s/s;                      % Gs2:Totzeit
Gs=Gs1*Gs2;                              % Gs: gesamte Strecke mit Totzeit
step(Gs,10);title('PDT2-Strecke mit Totzeit, schwingend'); grid
KpR=1;                                   % Annahme
Tn=0.1;                                  % Annahme
GR=KpR*(1+s*Tn)/(s*Tn);                  % PI-Regler
```



Antwort zu Frage 14: Drei-Bode-Plots-Verfahren

```
%% 2. DBV (Seiten 231-268)
GRsymm_mag=1/GR;
GR_phs=1/(s^2*GR);
wmin=0.02;wmax=2;
bode(Gs,{wmin,wmax}); hold on;grid
subplot(211);
bodemag(Gs,{wmin,wmax}); hold on
opts_mag=bodeoptions('cstprefs');
opts_mag.PhaseVisible='off';
h_mag=bodeplot(GRsymm_mag,{wmin,wmax},opts_mag);
hold on;grid
subplot(212);
bode(Gs,{wmin,wmax}); hold on
opts_ph=bodeoptions('cstprefs');
opts_ph.MagVisible='off';
h_ph=bodeplot(GR_phs,{wmin,wmax}, opts_ph);
hold on;grid
```



Bei der Frequenz 0,546 (Punkt D), bei der sich die Phasengänge schneiden, ist der geschlossene Kreis kritisch (Stabilitätsgrenze, ungedämpfte Schwingungen). Klar, man soll das vermeiden.

In Frequenzbereichen, wo die blaue Kurve im Phasengang unterhalb der roten liegt (rechts vom Punkt D), ist der Kreis bei beliebigen KpR-Werten instabil. In Ihrem Beispiel liegt die blau Kurve oberhalb der roten Kurve links vom Punkt D, d.h. der Kreis kann für beliebige Frequenzen $\omega <$ 0,546 (Punkt D) stabil sein, aber mit unterschiedlichen Phasenreserven.

Bei ω = ca .0,4 rad/s ist die Phasenreserve (Abstand zwischen beiden Phasengängen) etwa 5°, daraus werden Schwingungen mit ca. 10 Halbwellen resultieren, d.h. die Dämpfung ϑ wird sehr klein, etwa ϑ =0,1 ÷0,2.

Bei ω = 0,189 rad/s ist die Phasenreserve (Phasenrand) φ_{Rd} =|-91,1°-(-33,5°)|=57,6°. Das entspricht dem Betragsoptimum mit der optimalen Dämpfung ϑ = 0,707. Um diese Dämpfung zu erreichen, sollen sich beide Amplitudengänge bei der Frequenz ω = 0,189 rad/s schneiden.

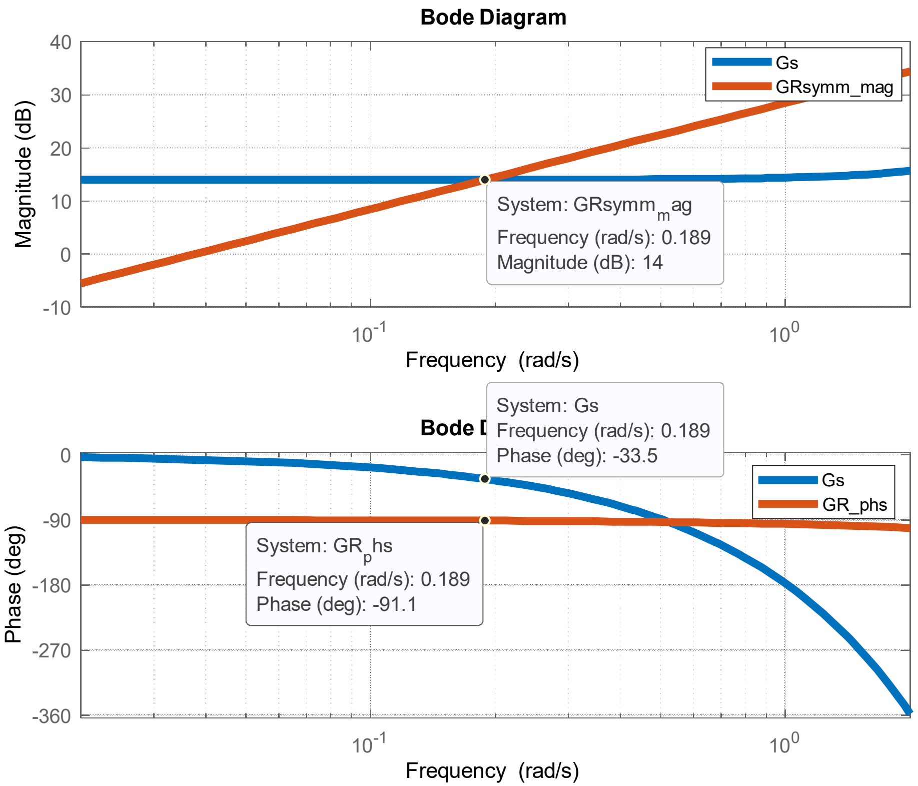
Antwort zu Frage 14: Drei-Bode-Plots-Verfahren

Die gewünschte Position für Schnittpunkt von Amplitudengängen befindet sich also bei $\omega = 0{,}189$ rad/s. Die rote Kurve (Amplitudengang des symmetrischen Reglers Gs_symm) soll nach oben um

$$\Delta K_{dB} = 14 \text{ dB} + 34{,}5 \text{ dB} = 48{,}5 \text{ dB}$$

verschoben werden (siehe Bode-Diagramm der vorherigen Seite). Daraus wird in Sektion 3 der entsprechende KpR-Wert berechnet. Das Bode-Diagramm nach der Verschiebung der roten Kurve ist unten gezeigt.

```
%% 3. Verschiebung in gewünschten Arbeitpunkt mit Phasenreserve 60°
delta_K=14+34.5;        % Verschiebung im Bode-Plot bei omega 0.189 ablesen
KpR=10^(-delta_K/20);
GR=KpR*(1+s*Tn)/(s*Tn);
% zur Kontrolle kann man Sektion 2 mit dem neuen KpR-Wert wiederholen
```

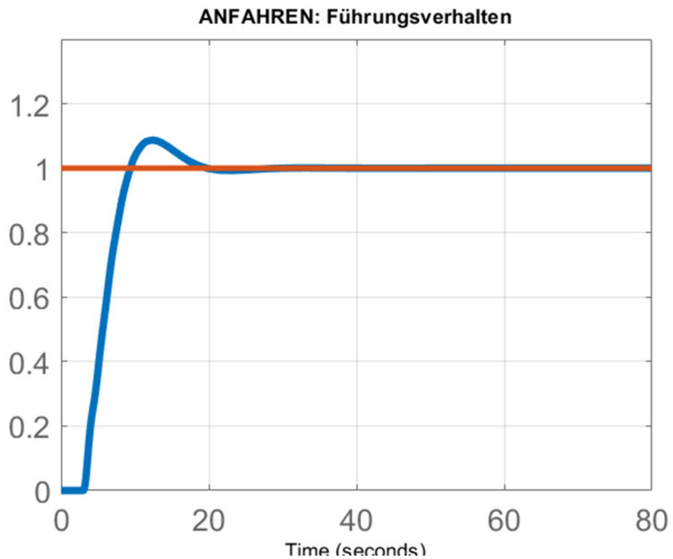


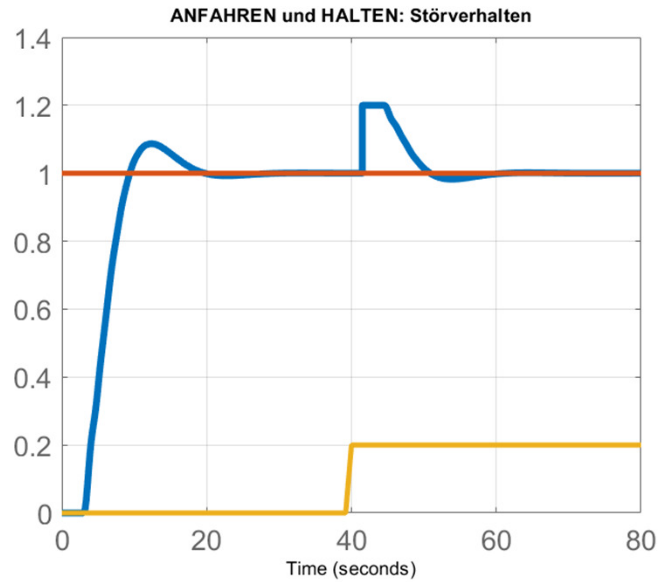
Anmerkung:

Man kann die rote Kurve in den gewünschten Punkt bei der Frequenz $\omega = 0{,}189$ rad/s nicht nur mit dem KpR-Wert nach oben verschieben, sondern auch nach links mit dem anderen Tn-Wert. Darüber kann man im Buch „Drei-Bode-Plots-Verfahren für Regelungstechnik“ nachlesen. https://www.springer.com/de/book/9783658292195

Wie erwartet erfolgt die Regelung nach dem Betragsoptimum.

```
%% 4. Regelung: Führungsverhalten
w=1*s/s;                       % w=1: Sollwert-Sprung bei t=0
G0=GR*Gs;                      % G0:  offener Regelkreis ohne Terminator
Gw=G0/(1+G0);                  % Gw:  geschlossener Regelkreis ohne Terminator
figure
step(w*Gw,80); title('ANFAHREN: Führungsverhalten'); grid
%% 5. Regelung: Störverhalten
z=0.2*exp(-40*s)*s/s;          % z: Störsprung z=0.2 bei t=40 sec
Gvz=Gs2;                       % Gvz: Vorwärts-Übertragungsfunktion des Kreises für z
Gz=Gvz/(1+G0);                 % Gv:  Übertragungsfunktion des Kreises beim Störverhalten
G=Gw*w+Gz*z;                   % Gw:  geschlossener Regelkreis beim Führungs-und Störverhalten
figure
step(G,w,z,80);title('ANFAHREN und HALTEN: Störverhalten');
grid
```





Frage 15: Hurwitz-Stabilitätskriterium für Abtastsysteme im z-Bereich

Gesendet: Freitag, 25. März 2022 11:23

Ich hätte eine Frage zu Aufgabe 7.2.8 aus Ihrem Buch „Regelungstechnik Aufgaben". Dort wurden für die Stabilität eines geschlossenen Regelkreises mit Differenzengleichung 2. Ordnung mit a_2 =1

$$a_2 x_{k+2} + a_1 x_{k+1} + a_0 x_k = b_0 w_k$$

bzw. mit charakteristischer Gl. 2. Ordnung mit a_2 =1

$$a_2 z^2 + a_1 z + a_0 = 0$$

mir bislang unbekannte Bedingungen für das Hurwitz-Kriterium verwendet

(Lösung S. 125 im Buch):

$$\begin{cases} a_0 < 1 \\ a_1 < 1 + a_0 \\ a_1 > -1 - a_0 \end{cases}$$

1. Sind diese Bedingungen allgemein im Z-Bereich gültig und kann ich diese mir aufschreiben? Oder sind sie nur Aufgabenspezifisch?

   Antwort: Diese Bedingungen sind allgemein im z-Bereich wie auch im Zeitbereich gültig.

2. Das mir bekannte Hurwitz-Kriterium besagt, dass alle Koeffizienten positiv sein müssen. Wie kann es dann sein dass der Koeffizient „a1" in der besagten Aufgabe negativ ist? Gibt es im Z-Bereich andere Regeln?

   Antwort: Ja, im z-Bereich gibt es andere Regeln, als in s-Bereich, wie es beim Unterricht behandelt und in meinem Skript RT2 (Seiten 52-55) gegeben ist: https://www.szacher.de/Download-fuer-Studenten/

3. Wie kommt man auf diese Bedingungen? Könnten sie mir das noch einmal erklären bitte?
   Antwort: Die Herleitung ist auf der nächsten Seite gezeigt.

Antwort zu Frage 15:
Hurwitz-Stabilitätskriterium für Abtastsysteme

Die Herleitung des Hurwitz-Kriteriums für digitale Systeme finden Sie im Buch „*Regelungstechnik für Ingenieure*“, Seiten 340, 341: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-36407-6

Auch im Skript von *Michael Danzer*, Seiten 21-22. https://d-nb.info/1016591535/34 Zugegriffen am 25.03.2022

Im Skript von *TU Wien* ist dieses Kriterium auf Seiten 169-171 behandelt.
https://www.acin.tuwien.ac.at/fileadmin/cds/lehre/aut/Archiv/WS1314/Kapitel6.pdf Zugegriffen am 25.03.2022

11.4.6 Stabilitätsbedingung für Abtastsysteme

Ein Abtastsystem ist dann stabil, wenn die Ausgangsgröße $x_{\mathrm{a,\,k}}$ nach einem Eingangssprung zu einem Beharrungszustand übergeht. Mathematisch bedeutet es, dass die Lösung (11.10) der homogenen Gl. (11.7) mit der Zeit $t \to \infty$ bzw. $k \to \infty$ verschwindet, d. h.

$$x_{\mathrm{a,k}}^{\mathrm{h}}\Big|_{\text{bei } k\to\infty} = 0\,.$$

Dies ist für wachsende k und wachsende z_{i}^{k} nur dann möglich, wenn alle Beträge der komplexen Wurzeln der charakteristischen Gleichung (11.9) kleiner Eins sind.

Daraus folgt die Stabilitätsbedingung eines Abtastsystems:

> Ein Abtastsystem ist dann stabil, wenn alle Wurzeln der charakteristischen Gleichung (11.9) zu der Differenzgleichung (11.6) des geschlossenen Regelkreises vom Betrag kleiner Eins sind, d. h.
>
> $$\left| z_{\mathrm{i}} \right| < 1$$

(11.19)

Seiten 340, 341

Für Differenzengleichungen 1. Ordnung

$$a_1 z + a_0 = 0 \quad \text{bzw.} \quad z + \frac{a_0}{a_1} = 0$$

gilt die Stabilitätsbedingung (11.19) bei Koeffizienten

$$\frac{|a_0|}{|a_1|} < 1 \quad \text{bzw.} \quad -a_1 < a_0 < a_1 .$$

Für Differenzengleichungen 2. Ordnung

$$a_2 z^2 + a_1 z + a_0 z^0 = 0$$

mit dem Wert von $a_2 = 1$, was bei geschlossenen Regelkreisen häufig der Fall ist, führt die Stabilitätsbedingung (11.19) zu

$$\begin{cases} a_0 < 1 \\ -1 - a_0 < a_1 < 1 + a_0 . \end{cases} \qquad (11.20)$$

Bild 11.19 zeigt das entsprechende Stabilitätsgebiet in der Ebene (a_0, a_1) der Koeffizienten der Differenzengleichung.

Die Stabilitätskriterien werden in Abschnitt 11.5.5 behandelt.

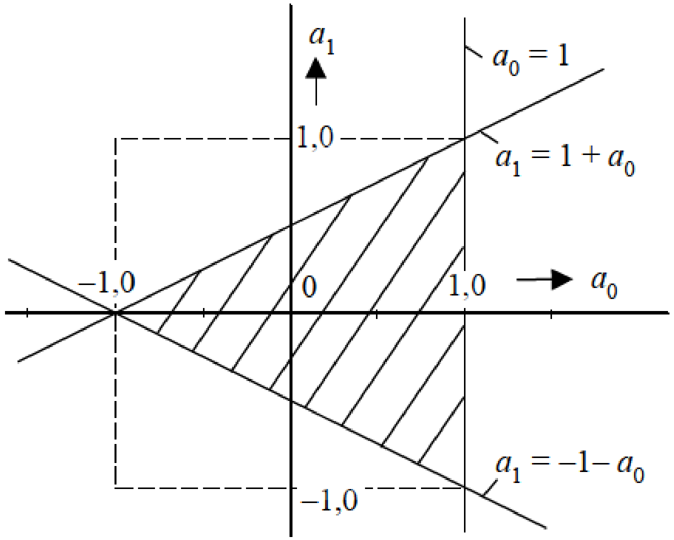


Bild 11.19 Stabilitätsgebiet für digitale Regelkreise 2. Ordnung mit $a_2 = 1$

Seiten 340, 341

Frage 16: Digitale Regelung. Quasikontinuierliche Regelung.

Gesendet: Mittwoch, 15. Februar 2023 18:22

16.1) Für die quasikontinuierliche Regelung gibt es die beiden Bedingungen $T_A < T_g/2$ sowie $T_A < T_{kleinste}/6$. Wie verwende ich diese Bedingungen und wann welche? Bei einem P-T1-Glied entspricht ja z. B. die Zeitkonstante genau Tg.

16.2) Die Lösung, die das Buch vorgibt, zu Aufgabe 7.2.2 aus Ihrem Buch "Regelungstechnik Aufgaben", kann ich im großen und ganzen nachvollziehen. Ich hatte beim Lösen der Aufgabe allerdings bei k=0 angefangen und nicht bei k=1, wodurch dann auch die Feststellung $w_{k-1} = w_k$ nicht korrekt ist, nämlich genau für k=0. Ist das immer so, dass man bei k=1 erst anfängt und x_0 auf 0 setzt oder gibt es hier bestimmte Konventionen für die Berechnung?

Antwort zu Frage 16.1:

In meinem Skript, sowie in meinen Büchern [3]-[6] (siehe Literaturliste oben auf Seite 3] sind diese beide Faustregel gegeben:

Quasikontinuierliche Abtastregelung ist möglich, wenn die Abtastfrequenz höher als die Eigenfrequenz des Regelkreises ist: $T_A < \dfrac{T_g}{2}$ oder $T_A < \dfrac{T_{kleinste}}{6}$

Hierzu gibt es in der Literatur noch eine Faustregel:

Bei Strecken, deren Sprungantwort aperiodisch verläuft, kann die Bedingung $T_A \leq T_{95}/10$ angewandt werden. Dabei ist T_{95} diejenige Zeit, bei der die Sprungantwort 95 % des Endwertes $x(\infty)$ erreicht hat.

Betrachten wir z.B. ein P-T1 Glied

$$T_1 \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = K_{PS}\hat{y} \Rightarrow x(t) = K_{PS}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right)\hat{y} \Rightarrow x(\infty) = K_{PS}\hat{y} \Rightarrow x(t = T_{95}) = K_{PS}\left(1 - e^{-\frac{T_{95}}{T_1}}\right)\hat{y} \Rightarrow 0{,}95 K_{PS}\hat{y} = K_{PS}\left(1 - e^{-\frac{T_{95}}{T_1}}\right)\hat{y}$$

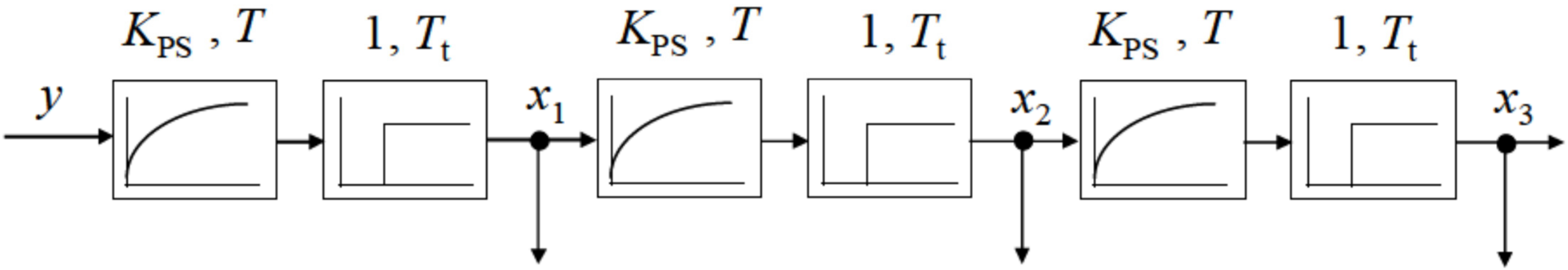
Die DGL — Die Lösung der DGL — Der Endwert (100%) — Der Wert (95%)

$$\boxed{T_{95} = T_1 \cdot \ln(0{,}05) = 2{,}9957 \cdot T_1 \approx 3 \cdot T_1}$$

Antwort zu Frage 16.1: Digitale Regelung. Quasikontinuierliche Regelung.

Wann und welche Bedingung in der Praxis verwendet werden soll, entscheidet der Entwickler selbst. Grundsätzlich gilt die Voraussetzung für quasikontinuierlichen Entwurf: Die Abtastzeit T_A muss kleiner sein gegenüber den wesentlichen Streckenzeitkonstanten. Als solche versteht man eine Zeitkonstante, die das Regelungsverhalten merklich beeinflussen kann. Bei der Klausur wird von Dozenten vorgeschrieben, ob die Aufgabe quasikontinuierlich gelöst werden soll.

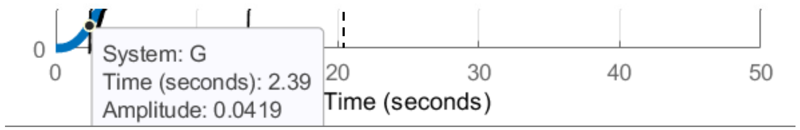
2.1 Gegeben ist eine Regelstrecke mit verteilten Parametern, bestehend aus 6 identischen Teilstrecken: K_{PS} = 0,2; T = 2,0 s und T_t = 0,5 s.



Die Strecke soll mit einem PID-Regler geregelt werden. Die Sollwerte für Regelgrößen x_1, x_2 und x_3 sind gegeben: w_1 = 5; w_2 = 1 und w_3 = 0,2.

Bestimmen Sie die Einstellung des Reglers und die Gewichtskoeffizienten so, damit die Regelung nach dem Typ A verläuft!

Fazit: Man kann den Regelkreis quasikontinuierlich behandeln, aber der Fehler im Vergleich zum realen Verlauf wird größer, als bei der Behandlung des Kreises mit Rekursionen oder im z-Bereich.

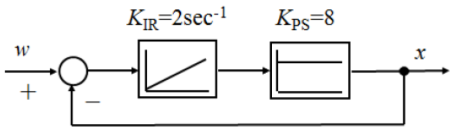


Antwort zu Frage 16.2: Digitale Regelung. Quasikontinuierliche Regelung.

Seite 53

Seite 118

7.2.2 Sprungantwort eines digitalen Regelkreises H



Die Abtastzeit eines digitalen I-Reglers (Bild 7.5), digitalisiert nach der Trapezregel beträgt T_A = 0,05 s. Skizzieren Sie die Sprungantwort der Regelgröße $x(t)$ bei einem Sprung der Führungsgröße von $\hat{w} = 2$.

Anmerkung: Die Aufgabe wird komplett im Zeitbereich mittels Rekursionen gelöst, d.h. das Halteglied wird ignoriert. Auch die Rechentotzeit wird nicht berücksichtigt. „H" weist auf Schwierigkeitsgrad der Aufgabe als „Hoch".

Lösung zu **7.2.2 Sprungantwort eines digitalen Regelkreises**

Digitalisierte Gleichungen sind: die Additionsstelle: $e_k = w_k - x_k$; Regler $y_k = y_{k-1} + K_{IR} \cdot T_A \cdot \dfrac{e_k + e_{k-1}}{2}$; Strecke $x_k = K_{PS} \cdot y_k$, auch $y_{k-1} = \dfrac{x_{k-1}}{K_{PS}}$.

Daraus ergibt sich die digitalisierte Gleichung des geschlossenen Kreises:

$$\frac{x_k}{K_{PS}} = \frac{x_{k-1}}{K_{PS}} + K_{IR} \cdot T_A \cdot \frac{e_k + e_{k-1}}{2} = \frac{x_{k-1}}{K_{PS}} + K_{IR} \cdot T_A \cdot \frac{w_k - x_k + w_{k-1} - x_{k-1}}{2}$$

Die rekursive Formel für die abgetastete Regelgröße (unter Beachtung $w_{k-1} = w_k$):

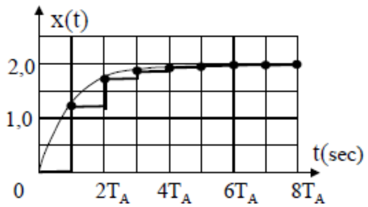
$$x_k = \frac{1 - 0{,}5 \cdot K_{IR} \cdot K_{PS} \cdot T_A}{1 + 0{,}5 \cdot K_{IR} \cdot K_{PS} \cdot T_A} \cdot x_{k-1} + \frac{2 \cdot K_{IR} \cdot K_{PS} \cdot T_A}{1 + 0{,}5 \cdot K_{IR} \cdot K_{PS} \cdot T_A} \cdot w_{k-1}$$

$$x_k = \frac{1 - 0{,}5 \cdot 2\,\text{sec}^{-1} \cdot 8 \cdot 0{,}05\,\text{sec}}{1 + 0{,}5 \cdot 2\,\text{sec}^{-1} \cdot 8 \cdot 0{,}05\,\text{sec}} \cdot x_{k-1} + \frac{2 \cdot 2\,\text{sec}^{-1} \cdot 8 \cdot 0{,}05\,\text{sec}}{1 + 0{,}5 \cdot 2\,\text{sec}^{-1} \cdot 8 \cdot 0{,}05\,\text{sec}} \cdot w_{k-1}$$

$$x_k = 0{,}43 \cdot x_{k-1} + 0{,}57 \cdot w_{k-1}$$

Die Sprungantwort (Bild L.35) wird berechnet, angefangen von $x_0 = 0$ und $w_0 = 2$. Das Simulationsprogramm mit MATLAB/Simulink ist im Bild L.36 gezeigt.

$$x_1 = 0{,}43 \cdot 0{,}00 + 0{,}57 \cdot 2 = 1{,}14$$
$$x_2 = 0{,}43 \cdot 1{,}14 + 0{,}57 \cdot 2 = 1{,}63$$
$$x_3 = 0{,}43 \cdot 1{,}63 + 0{,}57 \cdot 2 = 1{,}84$$
$$x_4 = 0{,}43 \cdot 1{,}84 + 0{,}57 \cdot 2 = 1{,}93$$
$$x_5 = 0{,}43 \cdot 1{,}93 + 0{,}57 \cdot 2 = 1{,}97$$
$$x_6 = 0{,}43 \cdot 1{,}99 + 0{,}57 \cdot 2 = 1{,}99$$



Erklärung zur Lösung: Differenzengleichungen einzelner Glieder

Additionsstelle: $e_k = w_k - x_k$, $e_{k-1} = w_{k-1} - x_{k-1}$

Strecke: $x_k = K_{PS} y_k$, $x_{k-1} = K_{PS} y_{k-1}$

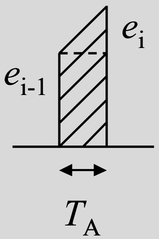
Diskretisierung des I-Reglers $y(t) = K_{IR} \int e(t)dt$ nach Trapezregel

Stellungsalgorithmus

$$y_k = K_{IR} \sum_{i=0}^{k} T_A \frac{e_k + e_{k-1}}{2}$$

$$y_{k-1} = K_{IR} \sum_{i=0}^{k-1} T_A \frac{e_{k-1} + e_{k-2}}{2}$$

b) Trapezregel



Quelle: „Digitale Regelung", https://www.szacher.de/Download-fuer-Studenten/ Seite 24

Geschwindigkeitsalgorithmus

$$y_k = y_{k-1} + \Delta y_k$$

$$\Delta y_k = y_k - y_{k-1} = K_{IR} T_A \sum_{i=0}^{k} \frac{e_i + e_{i-1}}{2} - K_{IR} T_A \sum_{i=0}^{k-1} \frac{e_{i-1} + e_{i-2}}{2}$$

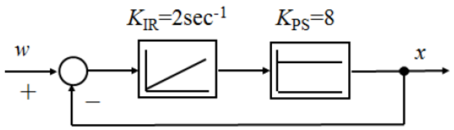
$$\sum_{i=0}^{k} \frac{e_i + e_{i-1}}{2} - \sum_{i=0}^{k-1} \frac{e_{i-1} + e_{i-2}}{2} = \left(\sum_{i=0}^{k-1} \frac{e_{i-1} + e_{i-2}}{2} + \frac{e_k + e_{k-1}}{2} \right) - \sum_{i=0}^{k-1} \frac{e_{i-1} + e_{i-2}}{2} = \frac{e_k + e_{k-1}}{2}$$

$$\boxed{\text{I-Regler: } y_k = y_{k-1} + K_{IR} T_A \frac{e_k + e_{k-1}}{2}}$$

Antwort zu Frage 16.2: Digitale Regelung. Quasikontinuierliche Regelung

Seite 53

7.2.2 Sprungantwort eines digitalen Regelkreises H



Die Abtastzeit eines digitalen I-Reglers (Bild 7.5), digitalisiert nach der Trapezregel beträgt T_A = 0,05 s. Skizzieren Sie die Sprungantwort der Regelgröße $x(t)$ bei einem Sprung der Führungsgröße von $\hat{w} = 2$.

Anmerkung: Die Aufgabe wird komplett im Zeitbereich mittels Rekursionen gelöst, d.h. das Halteglied wird ignoriert. Auch die Rechentotzeit wird nicht berücksichtigt. „H" weist auf Schwierigkeitsgrad der Aufgabe als „Hoch" .

Erklärung zur Lösung: Differenzengleichung des geschlossenen Regelkreises

Strecke: $x_k = K_{PS} y_k$

$x_k = K_{PS} y_k$

$$y_k = \frac{x_k}{K_{PS}}$$

$$y_{k-1} = \frac{x_{k-1}}{K_{PS}}$$

I-Regler: $y_k = y_{k-1} + K_{IR} T_A \dfrac{e_k + e_{k-1}}{2}$

Additionsstelle:

$e_k = w_k - x_k$

$e_{k-1} = w_{k-1} - x_{k-1}$

$$\frac{x_k}{K_{PS}} = \frac{x_{k-1}}{K_{PS}} + K_{IR} T_A \frac{(w_k - x_k) + (w_{k-1} - x_{k-1})}{2}$$

$$\boxed{x_k = \frac{2 - K_{PS} K_{IR} T_A}{2 + K_{PS} K_{IR} T_A} x_{k-1} + \frac{K_{PS} K_{IR} T_A}{2 + K_{PS} K_{IR} T_A} (w_k + w_{k-1})}$$

$$x_k = 0,4286 x_{k-1} + 0,2857 (w_k + w_{k-1})$$

Die Lösung:

Anfangsbedingungen:

$t < 0$ $\quad k = -1, -2, -3, \ldots$ $\quad w_{-1} = w_{-2} = \ldots = 0$ $\quad x_{-1} = x_{-2} = \ldots = 0$

Eingangssprung:

$t = 0$ $\quad k = 0$ $\quad w_0 = 2$ $\quad x_0 = 0$

Sprungantwort:

$t > 0$ $\quad k = 1,\ 2,\ 3, \ldots$ $\quad w_k = 2$ $\quad x_k = 0,43 x_{k-1} + 0,2857 (w_{k-1} + w_k)$

$x_1 = 0,43 \cdot 0,00 + 0,57 \cdot 2 = 1,14$

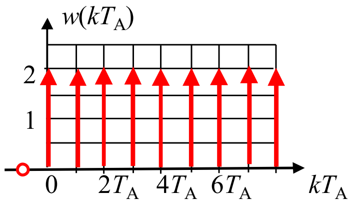
$x_2 = 0,43 \cdot 1,14 + 0,57 \cdot 2 = 1,63$

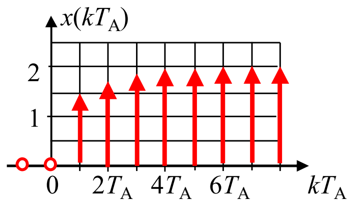
$x_3 = 0,43 \cdot 1,63 + 0,57 \cdot 2 = 1,84$

$x_4 = 0,43 \cdot 1,84 + 0,57 \cdot 2 = 1,93$

$x_5 = 0,43 \cdot 1,93 + 0,57 \cdot 2 = 1,97$

$x_6 = 0,43 \cdot 1,99 + 0,57 \cdot 2 = 1,99$



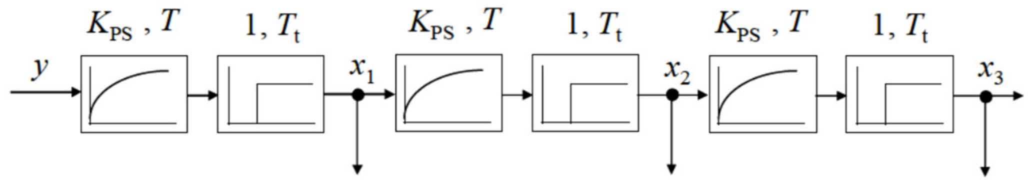


Frage 17: Regelung von Strecken mit verteilten Parametern

Gesendet: Montag, 27. Februar 2023 17:26

Ein paar Kommilitonen und ich haben uns zusammen gesetzt und sind Ihr Skript durchgegangen.
Hierzu haben wir ein paar Fragen, die sich auf die Musterlösung der Aufgabe 2.1 beziehen.

2.1 Gegeben ist eine Regelstrecke mit verteilten Parametern, bestehend aus 6 identischen Teilstrecken: $K_{PS} = 0{,}2$; $T = 2{,}0$ s und $T_t = 0{,}5$ s.



Die Strecke soll mit einem PID-Regler geregelt werden. Die Sollwerte für Regelgrößen x_1, x_2 und x_3 sind gegeben: $w_1 = 5$; $w_2 = 1$ und $w_3 = 0{,}2$.
Bestimmen Sie die Einstellung des Reglers und die Gewichtskoeffizienten so, damit die Regelung nach dem Typ A verläuft!

17.1) Im letzten Ausdruck wurden folgende Vereinfachungen vorgenommen:

$$(1+sT)^2(1+sT_t)^2 = (1+2sT+s^2T^2)(1+2sT_t+s^2T_t^2) \approx (1+2sT)(1+2sT_t)$$

Wir konnten uns nicht erklären wie Sie darauf kommen.

17.2) Aus obigen drei K_{PR}-Werten ergibt sich folgende Bedingung, in der man einen Parameter frei wählen kann:

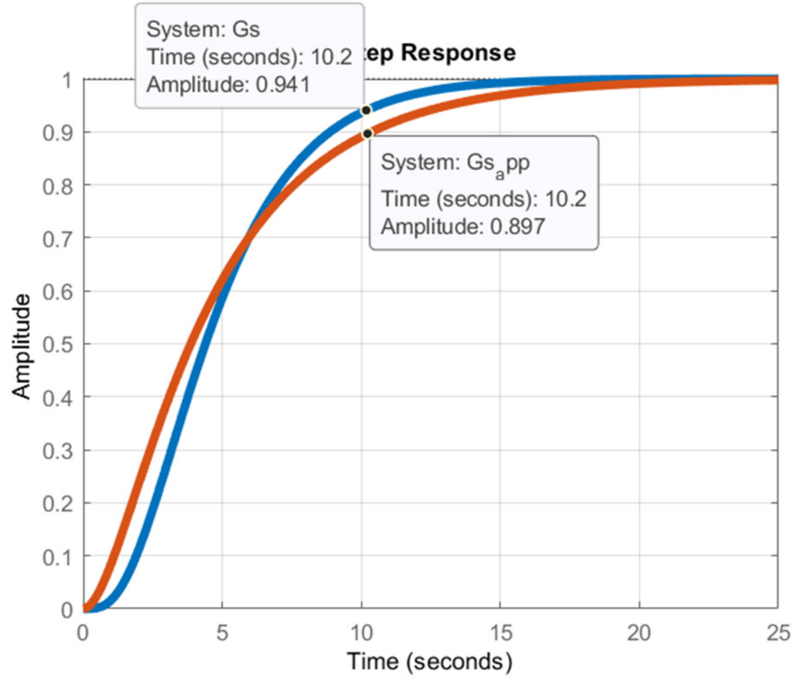
$$K_{PR} = \frac{0{,}65}{g_1} = \frac{10}{g_2} = \frac{25}{g_3}$$

Hier haben Sie angenommen das g_2=1 bzw. K_{PR}=10 ist. Wie kommen Sie auf diese Annahme? Und kann in so einer Situation immer diese Annahme getroffen werden?
Könnte man auch g_3=1 setzten oder g_1=1?

Antwort zu Frage 17.1:

Das besagte Approximieren ist möglich, weil die Wirkung von Gliedern zweiter Ordnung bzw. s^2T^2 auf die Sprungantwort im Vergleich zu Gliedern erster Ordnung bzw. $2sT$-Gliedern relativ klein ist. Aus diesem Grund sind die Glieder s^2T^2 vernachlässigt. Die Simulation unten bestätigt, dass der maximale Fehler wegen solcher Vereinfachung gering ist bzw. 0,044.

```
% Frage zu Aufgabe 2.1
%-----------------------------------------
% Warum ist Gs=1/((1+s*T)^2*(1+s*T1)^2)
% durch Gs_app=1/((1+s*T)*(1+s*T1) approximiert?
s=tf('s');
T=2;T1=0.5;
Gs1=1/(1+s*T)^2;
Gs2=1/(1+s*T1)^2;
Gs=Gs1*Gs2;
Gs_app1=1/(1+2*s*T);
Gs_app2=1/(1+2*s*T1);
Gs_app=Gs_app1*Gs_app2;
step(Gs,Gs_app)
grid
```



Antwort zu Frage 17.1:

Aus der Mathematik ist bekannt, dass man in einem linearen algebraischen System aus drei Gleichungen mit vier Unbekannten eine Unbekannte frei wählen kann.

$$K_{PR} = \frac{0,65}{g_1} = \frac{10}{g_2} = \frac{25}{g_3}$$

$$K_{PR} = \frac{0,65}{g_1}$$

$$K_{PR} = \frac{10}{g_2}$$

$$K_{PR} = \frac{25}{g_3}$$

Man kann einen beliebigen Wert frei wählen, z.B., g_3=1 oder g_3=10 oder auch oder g_1=1 usw. Das ist auch in der Lösung im Skript gezeigt: „Wird eine andere Annahme gemacht, z.B. K_{PR} =25, dann die Lösung ist“

g_1 = 0,26	g_2 = 0,4	g_3 = 1
K_{PR} = 25	T_n = 2,0 sec	T_v = 0,4 sec

Frage 18: Override-Regelung

Gesendet: Montag, 27. Februar 2023 17:26

Diese Frage bezieht sich auf die Aufgabe 2.2.
Hier geht es um Override Regelungen.

18.1) Hier wollten wir fragen, wie Sie auf die Formeln T_{aus}=11*T1 und T_{an}=4,7*T1 kommen? Sind diese fest vorgeschrieben?

18.2) Zusätzlich ist die Frage, wofür T_{wover} benötigt wird?

Antwort zu Frage 18.1:

In Abb. L.6 sind zwei Regelkreise gezeigt, nämlich: der Hauptregelkreis mit der Regelgröße *x* und der Override-Regelkreis mit der Regelgröße x_{over}.

Nach dem Punkt (d) der Aufgabenstellung sollen beide Sprungantworten skizziert werden.

Dafür im Punkt (b) der Lösung ist die Übertragungs-funktion $G_0(s)$ des offenen Hauptregelkreises bestimmt, wonach der Hauptregler nach dem Betragsoptimum, Typ A, eingestellt ist.

Nun öffnen Sie bitte die Seite 9 des Skriptes. Aus der Abb. 1.4 werden Sie die Antwort auf Ihre Fragen zu Formeln T_{aus} und T_{an} finden.

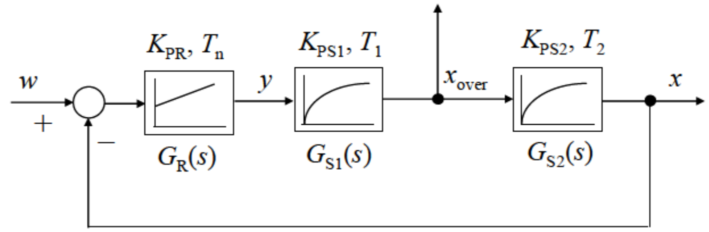
Nach der Abb. 1.4 des Skriptes ist auch die Sprung-antwort in der Abb. 1.7 (siehe nächste Seite) skizziert.

2.2 Eine Regelstrecke besteht aus zwei P-T_1-Gliedern mit folgenden Parametern:

K_{PS1} = 0,5 $\quad$ K_{PS2} = 3

T_1 = 1,8 s $\quad$ T_2 = 2,5 s

Der Wirkungsplan des Regekreises mit dem PI-Regler ist unten gezeigt.



Lösung zu Aufgabe 2.2

a) Der Wirkungsplan des Override-Regelkreises in Abbildung L.6 gezeigt.

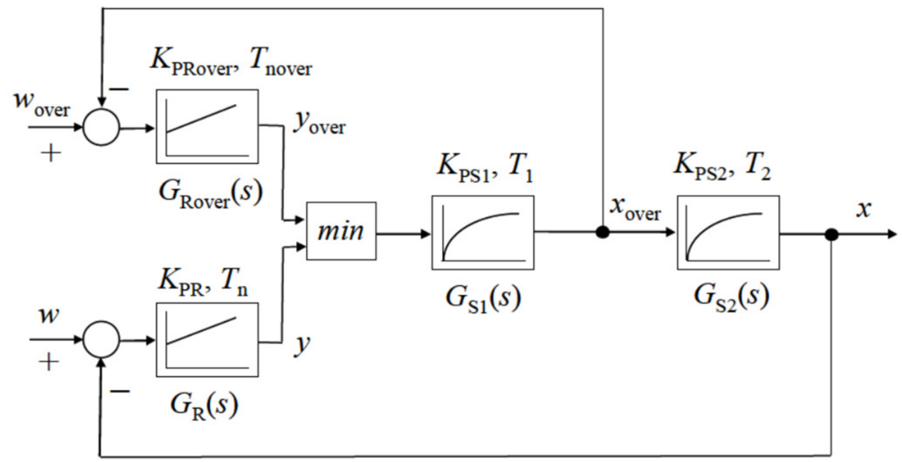


Abbildung L.6: Wirkungsplan des Override-Regelkreises

Antwort zu Frage 18.2:

Nun soll In Abb. L.7 auch die Sprungantwort des Override-Regelkreises eingetragen werden. Dafür ist im Punkt (c) der Lösung zuerst die Übertragungsfunktion $G_{0over}(s)$ des offenen Override-Regelkreises und danach die Übertragungsfunktion $G_{wover}(s)$ des geschlossenen Override-Regelkreises bestimmt.
Man stellt fest, dass der geschlossene Override-Regelkreis ein P-T1-Verhalten besitzt.
Aber wie soll man die Sprungantwort eines P-T1-Verhaltens skizzieren?
Öffnen Sie bitte wieder die Seite 9 des Skriptes. Aus der Abb. 1.4, Typ C , sollen Sie die Antwort auf Ihre Frage, wofür T_{wover} benötigt wird, finden. Natürlich, dort ist keine T_{wover} für die Position der Tangente ist, sondern die Zeitkonstante T_M ausschalgebend ist. Soll es unklar sein, schauen Sie bitte Skripte oder Bücher zu „Regelungstechnik 1".

c) Die Übertragungsfunktion des aufgeschnittenen Override-Regelkreises:

$$G_{0over}(s) = \frac{K_{PRover}(1+sT_{nover})}{sT_{nover}} \cdot \frac{K_{PS1}}{1+sT_1}$$

Nach der Kompensation mit $T_{nover} = T_1 = 1{,}8$ s ergibt sich:

$$G_0(s) = \frac{K_{PRover}K_{PS1}}{sT_{nover}}$$

$$G_{wover}(s) = \frac{G_{0over}(s)}{1+G_{0over}(s)} = \frac{K_{PRover}K_{PS1}}{sT_{nover}+K_{PRover}K_{PS1}} = \frac{1}{1+sT_{wover}}$$

Unter Beachtung $K_{PRover} = K_{PR}$ stellt man fest, dass der geschlossene Override-Regelkreis ein P-T$_1$-Verhalten mit folgender Zeitkonstante hat:

$$T_{wover} = \frac{T_{nover}}{K_{PRover}K_{PS1}} = \frac{T_{nover}}{K_{PR}K_{PS1}} = \frac{1{,}8s}{0{,}46 \cdot 0{,}5} \quad \Rightarrow \quad T_{wover} = 8\,\text{s}$$

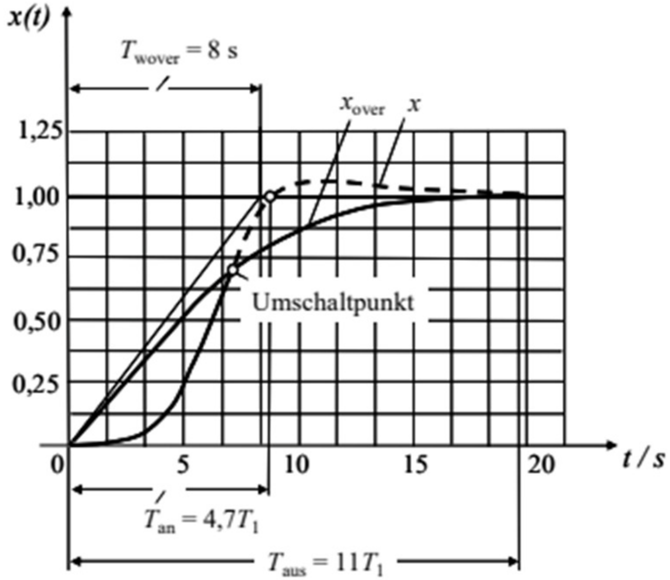


Abbildung L.7: Sprungantwort der Hauptregelgröße und die Begrenzung

Anregelzeit $T_{an} \approx 4{,}7\ T_1 = 8{,}5$ s
Ausregelzeit $T_{aus} \approx 11\ T_1 = 19{,}8$ s