Praktikum MATLAB®/Simulink® I

Prof. Dr.-Ing. U. Konigorski

Versuchsunterlagen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

REGELUNGSTECHNIK UND MECHATRONIK rtm

Stand: 2. Mai 2017

Praktikum MATLAB®/Simulink® I

Prof. Dr.-Ing. U. Konigorski

Versuchsunterlagen

Technische Universität Darmstadt
Institut für Automatisierungstechnik und Mechatronik
Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik
Prof. Dr.-Ing. U. Konigorski

Landgraf-Georg-Straße 4
64283 Darmstadt
Telefon 06151/16-25200
www.rtm.tu-darmstadt.de

Inhaltsverzeichnis

Protokoll Versuch 1

1.1 Matrizen

1. Berechnen Sie für

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 4 & -1 \\ -2 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 7 \\ 4 \end{bmatrix}$$

die Produkte **AB**, **AC**, **BC**, **BA**, **CA** und $\mathbf{AC}^{\mathrm{T}}$, falls diese definiert sind.

$\mathbf{AB} =$	$\mathbf{AC} =$
$\mathbf{BC} =$	$\mathbf{BA} =$
$\mathbf{CA} =$	$\mathbf{AC}^{\mathrm{T}} =$

2. Welche Summen $\mathbf{A}+\mathbf{B}$, $\mathbf{A}+\mathbf{C}$ und $\mathbf{B}+\mathbf{C}$ können Sie bilden? Begründen Sie Ihre Antwort.

3. Berechnen Sie $(\mathbf{BC}) \cdot (-\mathbf{AD} + 3\mathbf{D})$.

4. Gegeben sei die Matrix $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 3 \end{bmatrix}$. Existiert die Inverse? Falls ja, bestimmen Sie die Inverse und alle Vektoren $\mathbf{v}$ mit $\mathbf{E} \cdot \mathbf{v} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}$.

5. Lösen Sie folgendes lineares Gleichungssystem auf zwei verschiedene Arten.

$$\begin{array}{rcrcrcl} x_1 & & & + & 2x_3 & = & 1 \\ 3x_1 & + & 2x_2 & + & x_3 & = & 1 \\ 4x_1 & + & x_2 & + & 3x_3 & = & 7 \end{array}$$

Benennen Sie die beiden Möglichkeiten, die MATLAB bietet, um den Lösungsvektor zu bestimmen und geben Sie die Lösung an. Welche der Möglichkeiten sollte bevorzugt werden?

6. Gegeben seien die komplexen Zahlen $z_1 = 1-\mathrm{j}$, $z_2 = -1+\sqrt{3}\mathrm{j}$ und $z_3 = \frac{3}{1-\mathrm{j}}$. Geben Sie Realteil, Imaginärteil und Argument der Zahlen an und berechnen Sie

- $\frac{(z_1+z_2)^2}{2\cdot(z_1+z_2^2)+4\sqrt{3}\mathrm{j}}$
- $\overline{z_1 z_2}\cdot(3+\mathrm{j})\cdot\left|z_1 z_2^2\right|$

Hinweis: `help imag`, `help abs`, `help real`, `help angle`

	z_1	z_2	z_3
Realteil			
Imagimärteil			
Argument			

$$\frac{\left(z_1+z_2\right)^2}{2\cdot\left(z_1+z_2^2\right)+4\sqrt{3}\mathrm{j}} =$$

$$\overline{z_1 z_2}\cdot\left(3+\mathrm{j}\right)\cdot\left|z_1 z_2^2\right| =$$

7. Gegeben sei die Matrix

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 7 \\ 2 & 4 & 1 \\ 2 & 8 & 0 \end{bmatrix}.$$

- Bestimmen Sie das charakteristische Polynom von **F** und dessen Nullstellen.
- Bestimmen Sie alle Eigenwerte und Eigenvektoren von **F**.
- Vergleichen Sie die Ergebnisse.

Charakteristisches Polynom:

Nullstellen:

Eigenwerte:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \quad \\ \quad \\ \quad \end{bmatrix}$$

Eigenvektoren:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \quad \\ \quad \\ \quad \end{bmatrix}$$

Vergleichen Sie die Ergebnisse:

8. Erzeugen Sie eine 3-dimensionale $(3 \times 3 \times 3)$-Matrix `A(i,j,k)`, die für $k = 1$ nur Einsen, für $k = 2$ die Einheitsmatrix und für $k = 3$ Dreien in der oberen Dreiecksmatrix (Rest Nullen) enthält.
   Hinweis: `help tril`
   Fügen Sie hier Ihren MATLAB-Code zur Erzeugung der $(3 \times 3 \times 3)$-Matrix ein:

9. Gegeben sind folgende Vektoren:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 6j \\ 3 \\ -7j \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 9j \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} -3j \\ -2j \\ j \end{bmatrix}$$

   a) Berechnen Sie $\mathbf{x}^{\mathrm{H}}$, $\mathbf{y}\mathbf{z}^{\mathrm{H}}$, $\mathbf{y}^{\mathrm{H}}\mathbf{z}$ und $\mathbf{y}^{\mathrm{T}}\mathbf{z}$.

$$\mathbf{x}^{\mathrm{H}} = \begin{bmatrix} \quad \end{bmatrix} \qquad \mathbf{y}\mathbf{z}^{\mathrm{H}} = \begin{bmatrix} \quad \end{bmatrix}$$

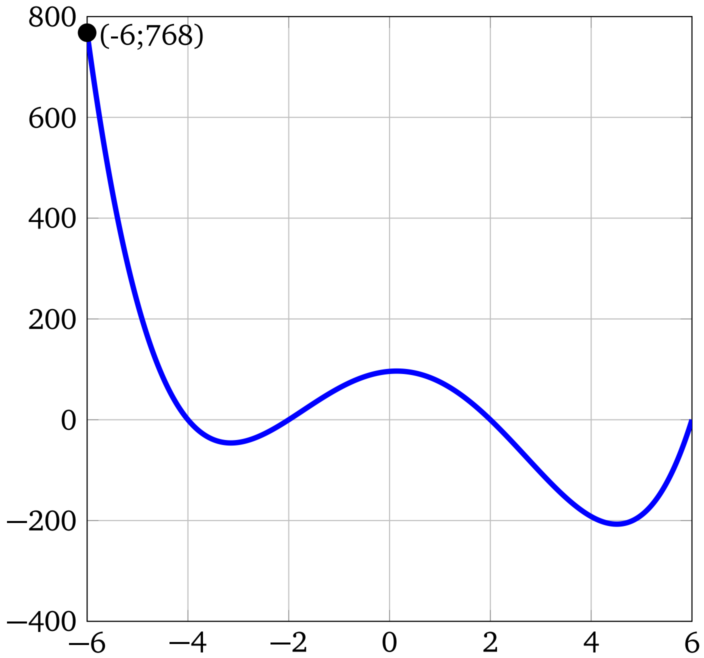
$$\mathbf{y}^{\mathrm{H}}\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \quad \end{bmatrix} \qquad \mathbf{y}^{\mathrm{T}}\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \quad \end{bmatrix}$$

   b) Geben Sie den Befehl an, mit welchem für einen beliebigen Vektor $\mathbf{y}$ dessen Transponierte berechnet wird.

   c) Geben Sie den Befehl an, mit welchem die konjugiert-komplexe Matrix berechnet wird.
   Hinweis: Es ist *nicht* die konjugiert-komplex *transponierte* Matrix gemeint.

1.2 Polynome

1. Fitten Sie mit `polyfit` in folgenden Grafen.



Gehen Sie dabei wie folgt vor:

Wählen Sie die Ordnung des Polynoms(Begründung der Wahl):

Wählen Sie eine geeignete Anzahl von Stützstellen:

Berechnen Sie die Koeffizienten des Polynoms:

Geben Sie die Polynomgleichung an:

2. Gegeben sei folgendes Polynom:

$$y = -x^2 + 10x^3 - 7 + 3x$$

Berechnen Sie die Nullstellen, die erste und zweite Ableitung und lösen Sie alle drei Polynome im Bereich von $x = -5, \ldots, 5$.

Nullstellen:

Erste Ableitung:

Zweite Ableitung:

Stützpunkte:

	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Polynom 1											
Polynom 2											
Polynom 3											

3. Berechnen Sie die Zerlegung der folgenden Partialbrüche:
   - $\frac{3x+9}{6x^2+3x+4}$
   - $\frac{5x+9}{6x^3+3x+4x^4}$

- $$\frac{3x+9}{6x^2+3x+4} =$$

mit

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \\ \\ \end{bmatrix} \qquad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \\ \\ \end{bmatrix} \qquad \mathbf{k} = \begin{bmatrix} \\ \\ \end{bmatrix}$$

- $$\frac{5x+9}{6x^3+3x+4x^4} =$$

mit

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \end{bmatrix} \qquad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \end{bmatrix} \qquad \mathbf{k} = \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \end{bmatrix}$$

4. Berechnen Sie die Polynomdivision der folgenden Polynome:
   - $\frac{6x^2+3x+4}{3x+9}$
   - $\frac{6x^3+3x+4x^4}{5x+9}$

- $$\frac{6x^2+3x+4}{3x+9} =$$

- $\frac{6x^3+3x+4x^4}{5x+9} =$

1.3 Eigenwertproblem

Hinweis: Verwenden Sie die Ergebnisse der Hausaufgabe für die Versuchsdurchführung.

1. Lösen Sie nun mit MATLAB das spezielle Eigenwertproblem und ermitteln Sie daraus die Eigenwerte und die dazugehörigen Eigenvektoren des Systems. Bestimmen Sie durch Rücksubstitution die mechanischen Eigenwerte.

   Eigenwerte und Eigenvektoren des speziellen Eigenwertproblems:

   Mechanische Eigenwerte (Frequenzen des Systems) und Eigenvektoren:

2. Welche Eigenbewegungsformen hat das System? Erläutern Sie kurz!

Protokoll Versuch 2

2.1 Grafiken

1. Schreiben Sie einen MATLAB-Code, der die Sprungantworten in ein Figure gemäß Abbildung 2.1 plottet. Berücksichtigen Sie dabei die Anordnung, Linienart und -stärke (Stärke = 2), Beschriftung und die Legende. Die Achsenskalierung kann vernachlässigt werden.
   Die Funktionen lauten:

$$y_1 = 2 - \mathrm{e}^{-t}\cos(2\pi t)$$
$$y_2 = 1 - \mathrm{e}^{-3t}\sin(1{,}7\pi t)$$

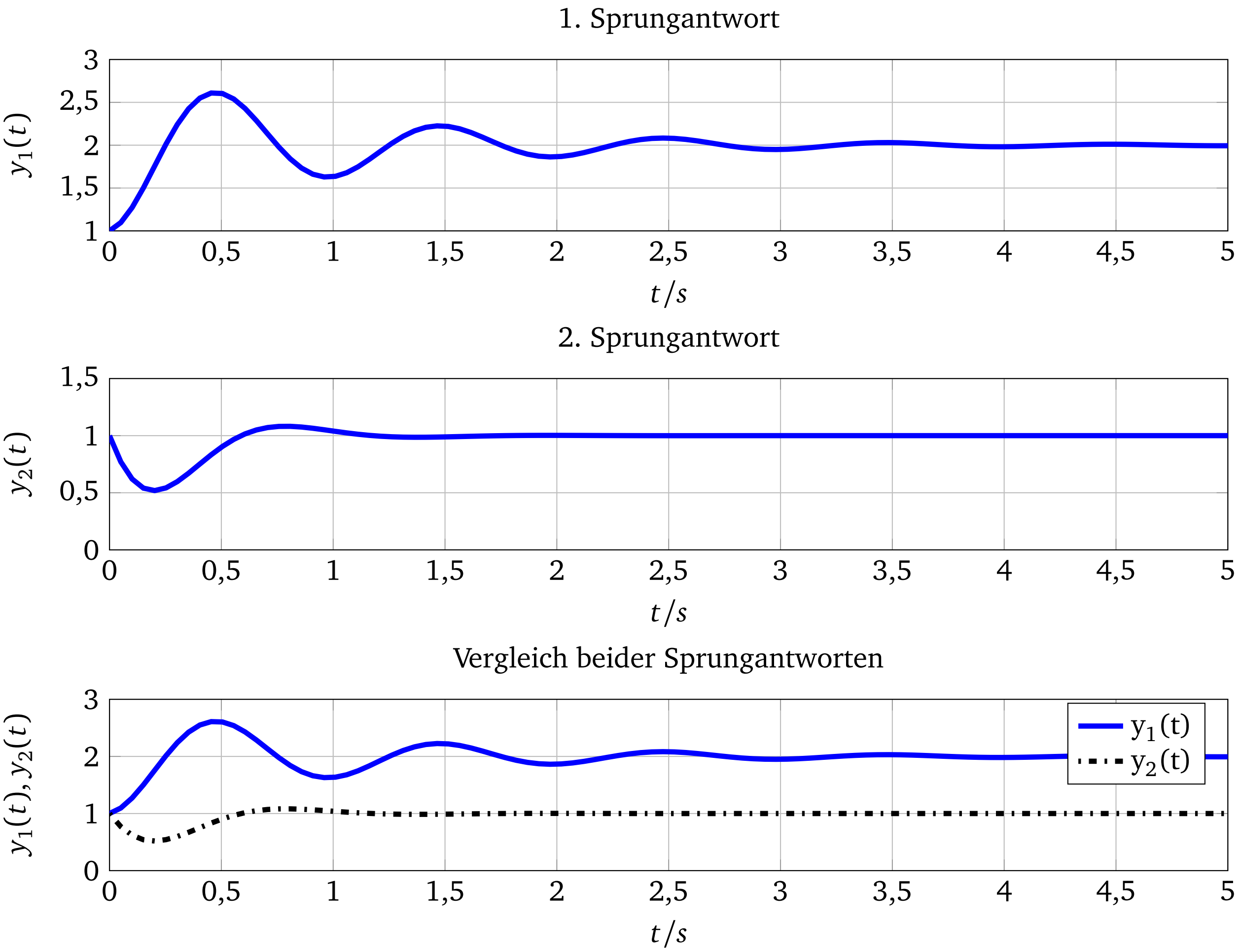


Abbildung 2.1: Sprungantworten

Geben Sie den Code zum Plotten der Sprungantworten hier an:

2. Plotten Sie den Einheitskreis wie in Abbildung 2.2. Überlegen Sie sich dazu, wie Sie aus einer Sinus- und Cosinusfunktion einen Kreis erzeugen können. Denken Sie an die Achsenbeschriftung und den Titel.

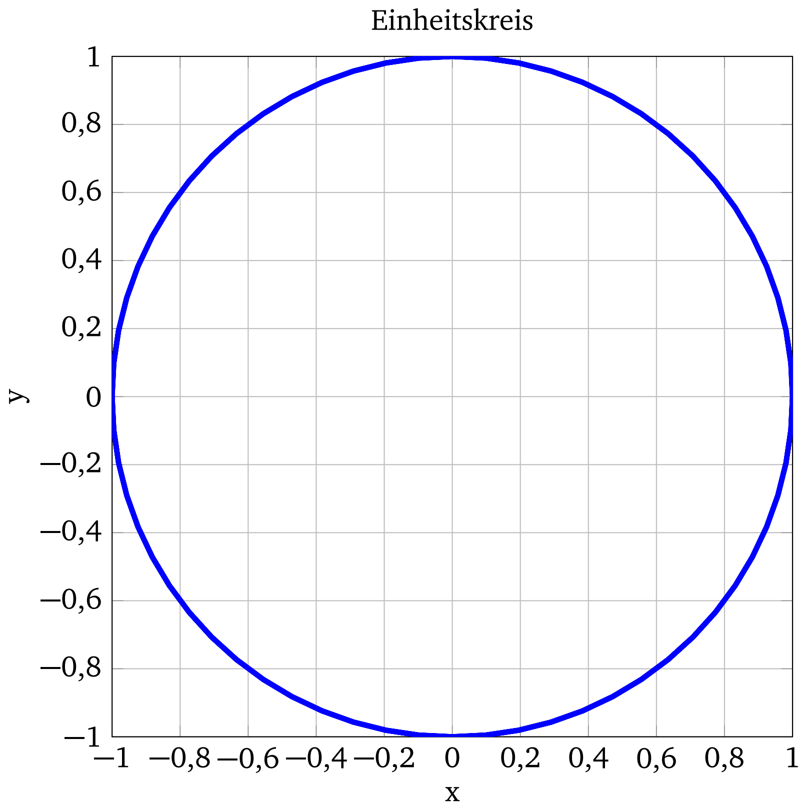


Abbildung 2.2: Einheitskreis

Geben Sie den Code zum Plotten des Einheitskreises hier an:

3. Erzeugen Sie mit Hilfe des Befehls `mesh` oder `surfc` eine Einheitskugel gemäß Abbildung 2.3. Verwenden Sie **nicht** den Befehl `sphere`.

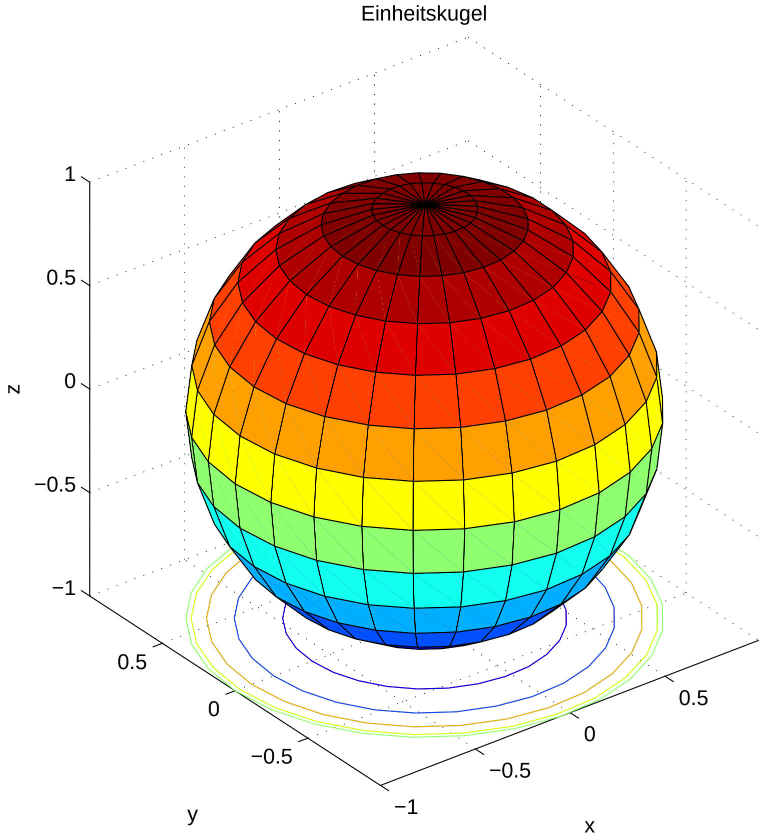


Abbildung 2.3: Einheitskugel

Geben Sie den Code zum Plotten der Einheitskugel hier an:

2.2 Schleifen und Funktionen

1. Schreiben Sie ein Skript, welches als Input den Vornamen eines Gruppenmitglieds erwartet und Ihnen, je nach eingegebenem Namen, die zugehörige Heimatstadt ausgibt. Geben Sie eine Fehlermeldung aus, wenn der Input nicht einem Vornamen eines Gruppenmitglieds entspricht.

   Verwenden Sie hierfür ein `Switch-case`-Konstrukt.

   Beispiel:
   Nach Programmstart erscheint:

   ```
   Vorname:|
   ```

   Eingabe von `Martin` und Bestätigung mit Return ergibt:

   ```
   Vorname:Martin
   Karlsruhe
   >>|
   ```

   Geben Sie hier Ihren Code an:

2. Schreiben Sie aufbauend auf der Hausaufgabe ein Skript, welches die Mittelwerte von k beliebigen $(1 \times n)$-Vektoren berechnet. Erzeugen Sie diese Vektoren mit `rand`. Schreiben Sie die jeweils berechneten Mittelwerte in tabellarischer Form (arithmetrischer Mittelwert in die erste Spalte und geometrischer Mittelwert in die zweiten Spalte) in ein externes File „Mittelwerte.m“. Achten Sie darauf, dass bei der Berechnung von neuen Mittelwerten die alten Mittelwerte im m-File nicht gelöscht werden!

   Erweitern Sie anschließend ihr Skript derart, dass die Daten aus „Mittelwerte.m“ gelesen und anschließend in die $(k \times 2)$-Matrix `Mittelwerte` geschrieben werden.

Geben Sie hier Ihren Code an:

3. Schreiben Sie eine Funktion `Determinate()`, die die Determinante einer beliebigen $(n \times n)$-Matrix berechnet. Die Berechnungsvorschrift lautet:

$$n = 2: \qquad \det \mathbf{A} = a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}$$
$$n > 2: \qquad \det \mathbf{A} = \sum_{j=1}^{n} (-1)^{i+j} a_{ij} \det \mathbf{A}_{ij}$$

wobei $\mathbf{A}_{ij}$ durch Wegstreichen der i-ten Zeile und j-ten Spalte von $\mathbf{A}$ erzeugt wird. Die Determinante soll hier immer nach der ersten Zeile entwickelt werden $(i = 1)$.

Verwenden Sie **nicht** den `det`-Befehl von MATLAB.

Geben Sie hier Ihren Code an:

4. Schreiben Sie ein Skript, welches eine zufällige $(n \times n)$-Matrix (Elementwerte zwischen $0, \ldots, 10$) erzeugt.

   Berechnen Sie die Determinate dieser Matrix anhand Ihrer Funktion `Determinante()` und des MATLAB-Befehls `det()`.

   Geben Sie hier Ihren Code an:

5. Ergänzen Sie den Code um den folgenden Vergleich:

```
fprintf('Unsere Berechnung liefert:\t det(A)=%g\n', det_A)
fprintf('Matlab-Befehl:\t\t\t\t det(A)=%g\n', det_Matlab)
fprintf('\n')

if (abs(det_A) >= 0.99 * abs(det_Matlab))
            && (abs(det_A) <= 1.01 * abs(det_Matlab))
    disp('Die Determinante wurde richtig berechnet');
else
    disp('Die Determinante wurde falsch berechnet') ;
end
```

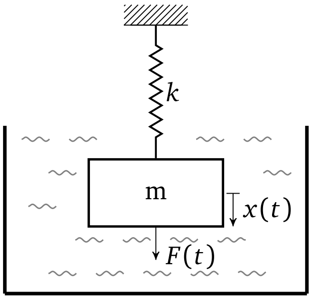
   Wie groß ist die zulässige Fehlertoleranz?

Protokoll Versuch 3

3.1 Feder-Masse-Dämpfer-System

Gegeben ist ein Federpendel, dessen Masse ($m = 4\,\mathrm{kg}$) sich in einer viskosen Flüssigkeit befindet. Angeregt wird das System (siehe Abbildung) durch die Kraft F:

$$F(t) = \hat{F}\cos(\omega t)$$



mit $\hat{F} = 2\,\mathrm{N}$ und $\omega = 0{,}5\,\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}}$. Beachten Sie, dass die Auslenkung $x(t)$ um die stationäre Ruhelage betrachtet wird und daher die Gewichtskraft nicht in die Gleichung mit eingeht. Die durch die Flüssigkeit erzeugte Reibung kann als viskose (geschwindigkeitsproportionale) Dämpfung angenommen werden. Für die Dämpfungskonstante gilt $d = 3\,\mathrm{N/(m/s)}$ und für die Federkonstante $k = 1\,\mathrm{N/m}$. Die Anfangsauslenkung $x(t = 0)$ sowie die Anfangsgeschwindigkeit $\dot{x}(t = 0)$ sind gleich Null.
Hinweis: Führen Sie die Rechnungen mit den Variablennamen durch und setzen Sie die Zahlenwerte wo verlangt erst am Ende ein.

1. Schreiben Sie ein Skript `Variablen.m`, das den Variablen `d`, `k`, `m`, `F` und `omega` Zahlenwerte übergibt und einen Vektor `Parameter` anlegt:

```
d = 3;
k = 1;
m = 4;
F = 2;
Parameter = [k, d, m, F];

omega = 0.5;
```

Analytische Lösung

2. Schreiben Sie ein MATLAB-Skript `Partialbruchzerlegung.m` zur Berechnung der Partialbruchzerlegung von $X(s)$. Bringen Sie ihr Ergebnis in die folgende Form und speichern Sie die Zähler Ihrer Ergebnisse in den Variablen `P1` und `P2`:

$$\frac{P_1}{s^2+\omega^2}+\frac{P_2}{s^2+\frac{d}{m}s+\frac{k}{m}}$$

Berechnen Sie auch die Nenner.

Hinweis: Arbeiten Sie mit den Variablennamen. Benutzen Sie den Befehl `residue` und die Ergebnisse der Hausaufgabe.

Geben Sie hier Ihren Code zur Partialbruchzerlegung an:

Die Partialbruchzerlegung liefert:

$$X(s) = \frac{2/3}{s^2 + 0{,}25} + \frac{-2/3}{s^2 + 0{,}75s + 0{,}25}$$

Bestimmen Sie jetzt durch Rücktransformation die analytische Lösung.

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\omega}\sin\omega t &= \mathfrak{L}^{-1}\left(\frac{1}{s^2+\omega^2}\right)\\
\frac{\omega_0^2}{\omega_\mathrm{e}}\mathrm{e}^{-D\omega_0 t}\sin(\omega_e t) &= \mathfrak{L}^{-1}\left(\frac{\omega_0^2}{s^2+2D\omega_0 s+\omega_0^2}\right)\\
\text{mit}\quad \omega_\mathrm{e} &= \omega_0\sqrt{1-D^2}
\end{aligned}$$

3. Schreiben Sie eine Funktion, die die analytische Lösung auswertet.

```
function [x, t] = AnalytischeLoesung(Parameter, omega, T, P1, P2)
```

`T` = Zeitpunkt, bis zu dem die Lösung bestimmt werden soll.

Hinweis: Arbeiten Sie mit den Variablennamen. Übernehmen Sie die Variablen `P1` und `P2` aus der Partialbruchzerlegung.

Geben Sie hier Ihren Code zur Bestimmung der analytischen Lösung an:

Numerische Lösung

4. Schreiben Sie eine Funktion, die das DGL-System numerisch löst. Zur Wahl stehen die Solver `ode23s` und `ode23`.

   ```
   function [x, t] = NumerischeLoesung(T, x0, Wahl)
   ```

   Parameter:

   - `T` = Zeitpunkt, bis zu dem die Lösung bestimmt werden soll.
   - `x0` = Anfangsbedingungen
   - `Wahl` = Auswahl Solver (1→ `ode23s`; 2→ `ode23`)

   Hinweis: Nicht alle Zustände sind von Interesse, daher entsprechend bei der Ausgabe berücksichtigen. Verwenden Sie die Ergebnisse der Hausaufgabe.

Geben Sie hier Ihren Code an, der das DGL-System numerisch löst:

Diskrete Lösung

5. Schreiben Sie eine Funktion, die die Differenzengleichung auswertet:

```
function [x, t] = DiskreteLoesung(Parameter, omega, N, T0)
```

Parameter:

- `N` = Anzahl Rechenschritte
- `T0` = Schrittweite

Hinweis: Verwenden Sie die Ergebnisse der Hausaufgabe.

Geben Sie hier Ihren Code an, der die Differenzengleichung auswertet:

Vergleich der Berechnungen

6. Nutzen Sie das folgende Skript zur Auswertung Ihrer Berechnungen. Vergleichen Sie die Ergebnisse. Zoomen Sie hierzu in den Plot. Erhöhen Sie Anzahl der Messpunkte für die diskrete Berechnung und führen Sie den Plot erneut aus. Beachten Sie, dass Sie die Abtastzeit T_0 entsprechend anpassen.
   Hinweis: Skript steht zum Download bereit.

```matlab
%% Definition der Konstanten
Variablen; Partialbruchzerlegung;
%% Analytische Lösung   (Teil I) %%
T = 15; % max. Zeit
[x_ana_1, t_ana_1] = AnalytischeLoesung(Parameter, omega, T(1), P1, P2);
%% Numerische Lösung    (Teil II) %%
x0 = [0, 0].';  T = 15; % Anfangsbedingungen; max. Zeit
[x_num_11, t_num_11] = NumerischeLoesung(T, x0, 1);
[x_num_21, t_num_21] = NumerischeLoesung(T, x0, 2);
%% Diskrete Lösung      (Teil III) %%
N = 30;     T0 = 0.5; % 30 Schritte; Definition der Schrittweiten
[x_dis_1, t_dis_1] = DiskreteLoesung(Parameter, omega, N, T0);
%% Plotten der Ergebnisse %%
figure();
plot(t_ana_1, x_ana_1, t_dis_1, x_dis_1, 'k', ...
        t_num_11, x_num_11, '-r', t_num_21, x_num_21, '-.g')
legend('Analytisch', 'Diskret', ...
        'Numerisch; Explizit', 'Numerisch; Implizit');
xlabel('t / s'); ylabel('x(t) / m');
grid on
```

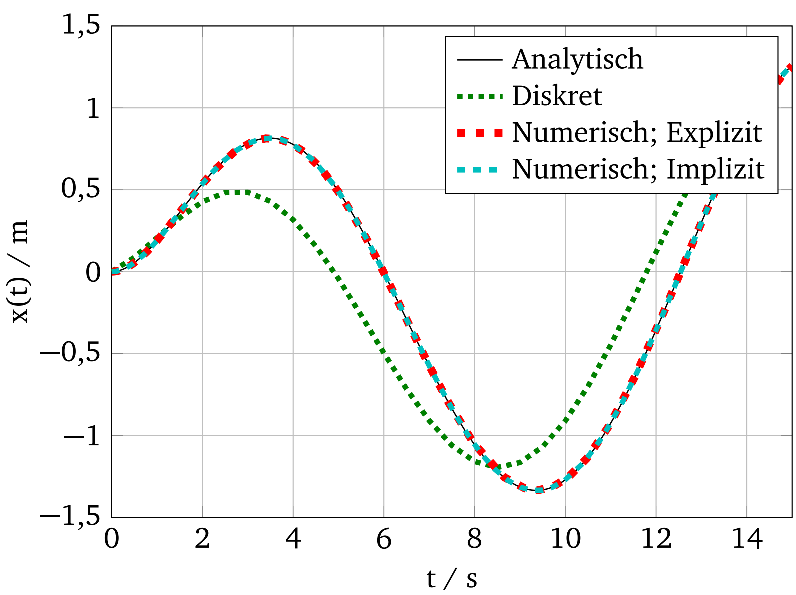
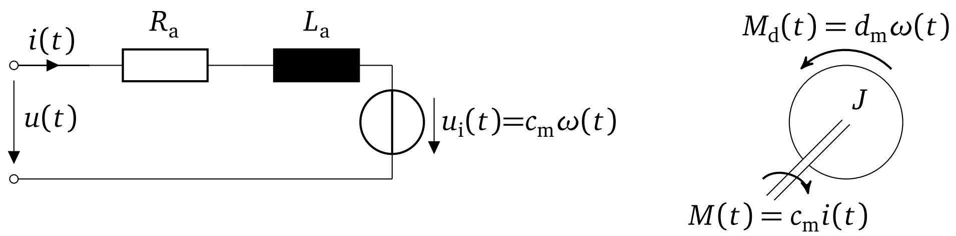


Abbildung 3.1: Vergleich

Wie verändert sich die diskrete Lösung bei größerem N und entsprechend kleinerem T_0?

3.2 Gleichstrommotor

Gegeben ist ein Gleichstrommotor mit einer Schwungscheibe als Last. Das System kann durch folgendes Ersatzschaltbild dargestellt werden:



Die Parameterwerte sind $J = 10{,}5\,\mathrm{kg\,m^2}$, $L_a = 100\,\mathrm{mH}$, $R_a = 100\,\Omega$, $c_m = 0{,}5\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{rad}}$, $d_m = 0{,}5\,\mathrm{Nm}\cdot\mathrm{s/rad}$.

Das dynamische Verhalten des Systems lässt sich durch folgendes Differentialgleichungssystem erster Ordnung beschreiben.

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}\omega(t)\\ i(t)\end{bmatrix} &= \begin{bmatrix}-\frac{d_m}{J} & \frac{c_m}{J}\\ -\frac{c_m}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\omega(t)\\ i(t)\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ \frac{1}{L_a}\end{bmatrix}\cdot u(t)\\ &\Downarrow\\ \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}\cdot u(t) \end{aligned}$$

Es wird folgende elektrische Spannung angelegt:

$$u(t) = \begin{cases} 10\,\mathrm{V} & 0 \le t \le t_0,\\ 20\,\mathrm{V} & t_0 < t \le t_1\\ 0\,\mathrm{V} & t > t_1 \end{cases}$$

1. Schreiben Sie ein Skript, welches den Verlauf von $i(t)$ und $\omega(t)$ für $t = t_0, \ldots, t_0{+}40\,\mathrm{s}$ berechnet (Sie können davon ausgehen, dass $t_1 - t_0 > 40\,\mathrm{s}$). Verwenden Sie hierfür die Solver `ode15s` und `ode113` und schreiben die Ergebnisse in die Matrizen `[t_im, x_im]` bzw. `[t_ex, x_ex]`.

   Hinweis: Nehmen Sie Zeittransformation $t^* = t - t_0$ vor, so dass Ihre Zeitlösung für $t^* = 0, \ldots, 40\,\mathrm{s}$ berechnet wird, da t_0 unbekannt ist. Verwenden Sie die Ergebnisse aus der Hausaufgabe.

   Schreiben Sie zum Erzeugen des DGL-Systems zunächst die Funktion:

   ```
   function dx = DGL_System_Aufgabe2(t, x)
   ```

Geben Sie hier Ihren Code der Funktion `DGL_System_Aufgabe2(t, x)` an:

Geben Sie hier Ihr Skript an:

Sie wollen den Verlauf von $i(t)$ und ω(t) für $t = t_1, \ldots, t_1 + 40\,\mathrm{s}$ ebenfalls berechnen.

2. Welche Annahmen müssen Sie treffen, um analog zur Berechnung des Zeitintervalls $t = t_0, \ldots, t_0 + 40\,\mathrm{s}$ die Systemantwort zu berechnen?

3. Welche Änderungen müssen Sie in ihrer Funktion vornehmen? Was unterscheidet den Typ der DGL aus 1. mit dem Typ hier?

4. Was müssen Sie bei der Ausführung des Skripts beachten? Was hat sich im Vergleich zur DGL aus 1. geändert?

Das folgende Skript plottet den Ankerstrom und die Winkelgeschwindigkeit der ersten DGL, wie in Abbildung 3.2 dargestellt.
Hinweis: Skript steht zum Download bereit.

```
%Simulationszeit
T =
figure
subplot(2, 1, 1)
plot(t_im, x_im(:,1), t_ex, x_ex(:,1), '-.')
legend('Implizit', 'Explizit')
axis([0, T, x_st(1), 0.2])
xlabel('t*␣/␣s')
ylabel('\omega(t*)␣/␣1/s')
title('Verlauf␣Winkelgeschwindigkeit')
grid on
xlabel('t*␣/␣s')
subplot(2,1,2)
plot(t_im, x_im(:,2), t_ex, x_ex(:,2), '-.')
legend('Implizit', 'Explizit')
axis([0, 0.005, x_st(2), 0.2])
grid on
xlabel('t*␣/␣s')
ylabel('i(t*)␣/␣A')
title('Verlauf␣Ankerstrom')
grid on
```

Es ist erkennbar, dass beide Solvertypen nahezu identische Ergebnisse liefern.

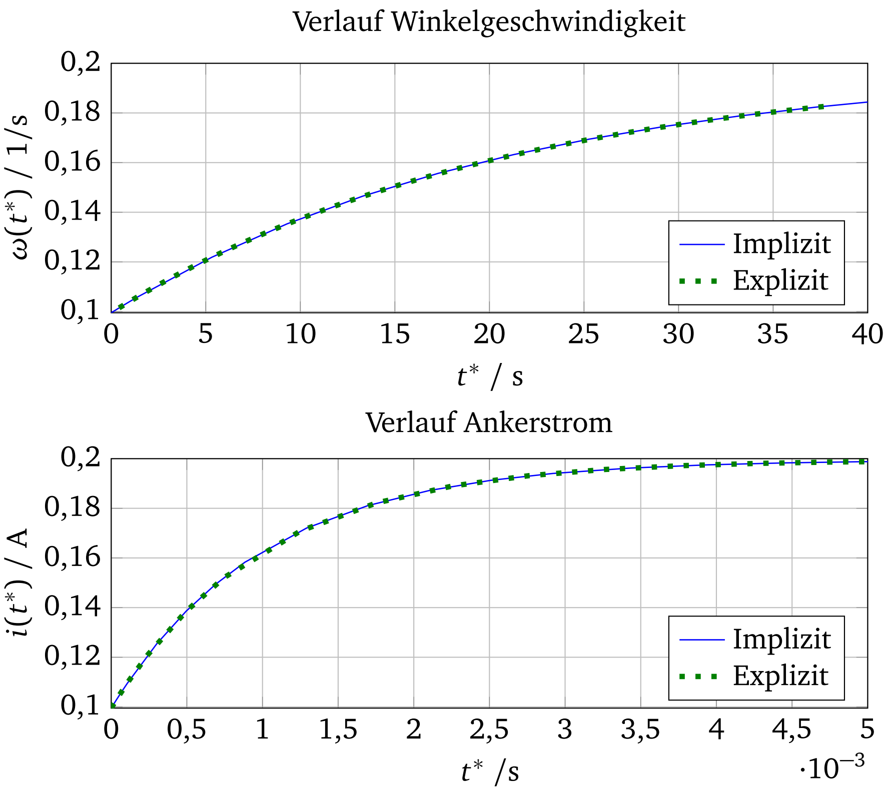


Abbildung 3.2: Ankerstrom und Winkelgeschwindigkeit

5. Vergleichen Sie mit dem Befehl `length` die Ausgabe (`x_im`, `x_ex`) beider Solver. Was fällt Ihnen auf?

6. Geben Sie die Eigenwerte des Systems an und begründen Sie, warum `ode15s` gegenüber `ode113` vorzuziehen ist.

Protokoll Versuch 4

4.1 Analyse des Systemverhaltens der Strecke

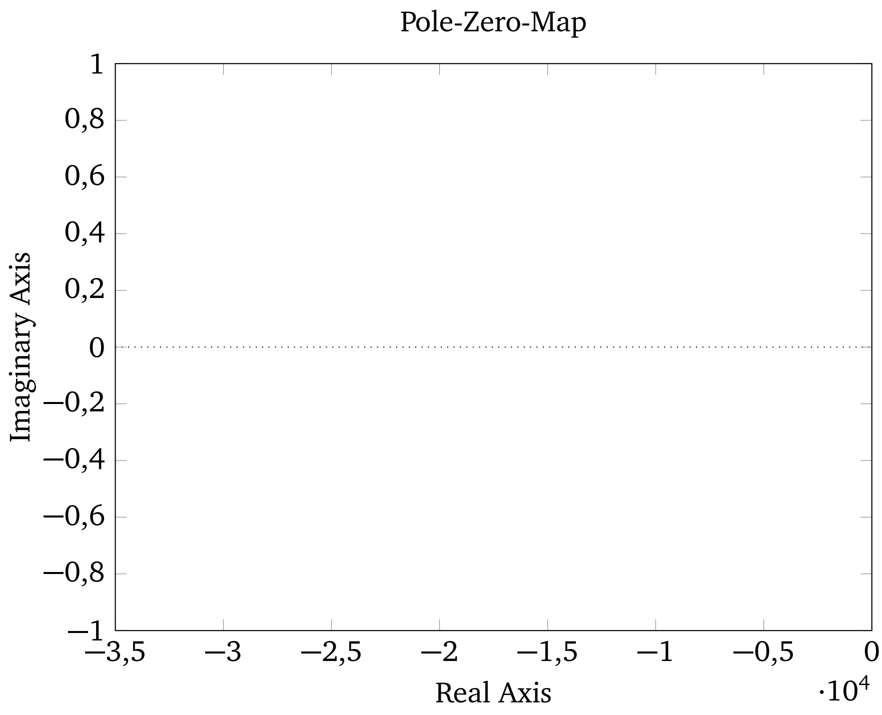
1. Speichern Sie die Übertragungsfunktion des Ventilators in die Variable sys (MATLAB-Befehl angeben).

   Hinweis: Sie werden die Übertragungsfunktion sys im Laufe des Versuchs wiederholt benötigen. Speichern Sie bitte Zwischenergebnisse / Regler, da diese in aufbauenden Aufgaben / Versuchen noch verwendet werden. Runden Sie diese auch bitte nicht, dadurch verlieren die Folgeberechnungen an Genauigkeit, was zu fehlerhaften Verhalten der Regelstrecke führen kann.

2. Bestimmen Sie mit Hilfe von MATLAB die Pole der Strecke (Ventilator).

   $s_1 =$ $s_2 =$

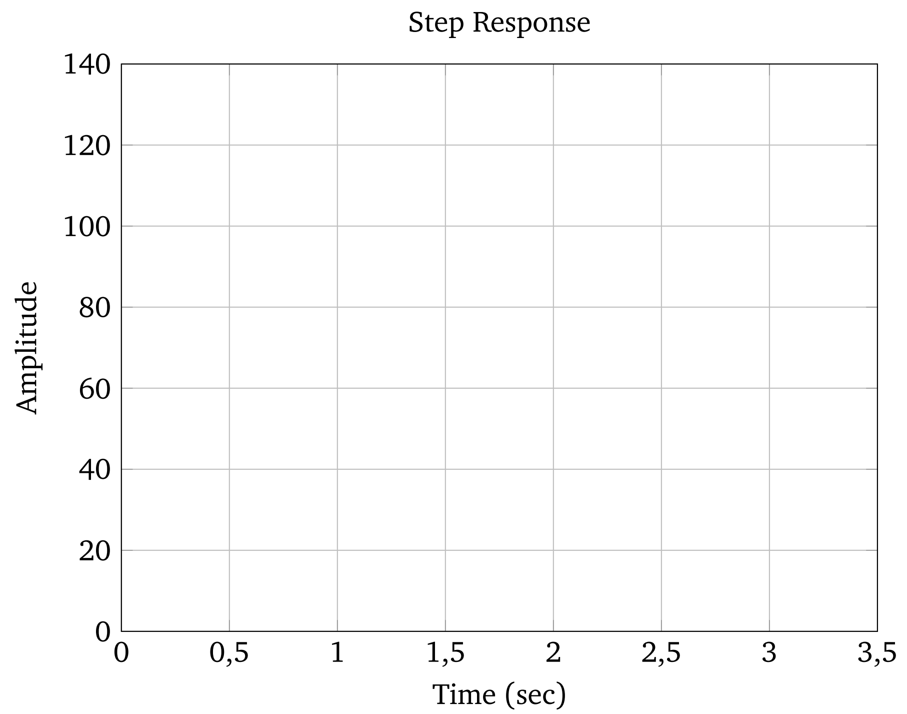
3. Lassen Sie sich die Nullstellen und Pole in der komplexen Ebene zeichnen.

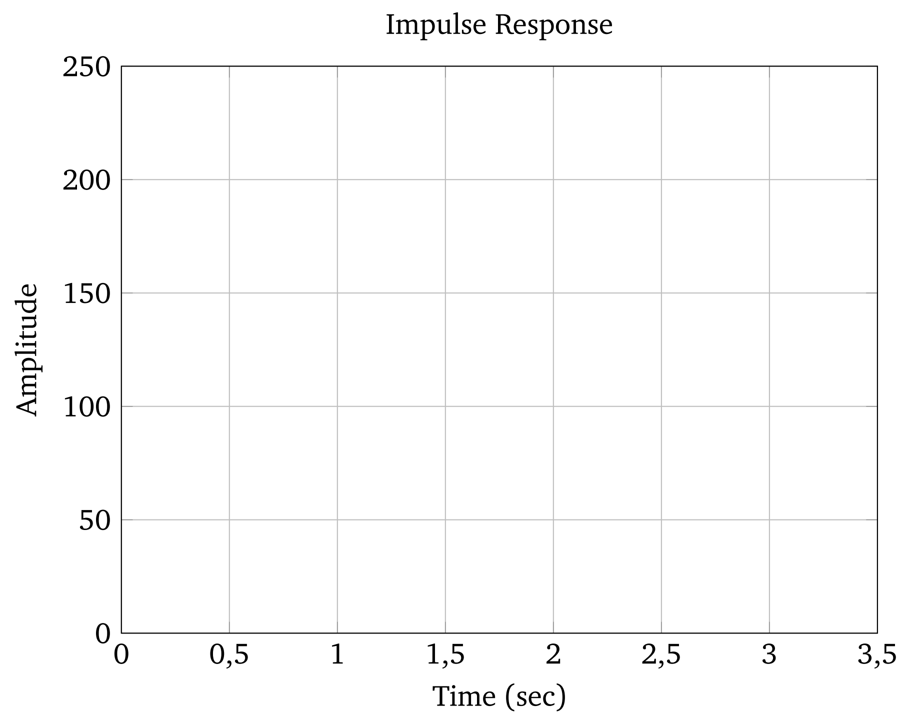


4. Bestimmen Sie die stationäre Verstärkung der Strecke.

   $k_{\text{stat}} =$

5. Lassen Sie die Sprung- und Impulsantwort der Strecke (Ventilator) zeichnen.
   Hinweis: In den folgenden Aufgaben benötigen Sie die Befehle aus der Hausaufgabe.

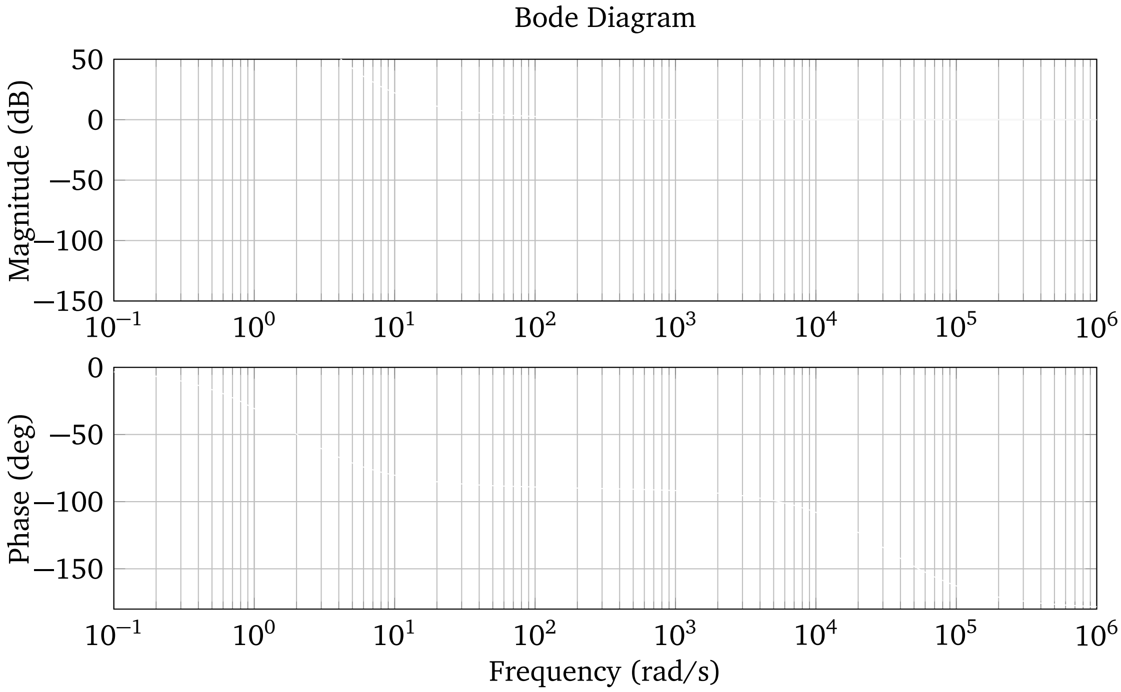


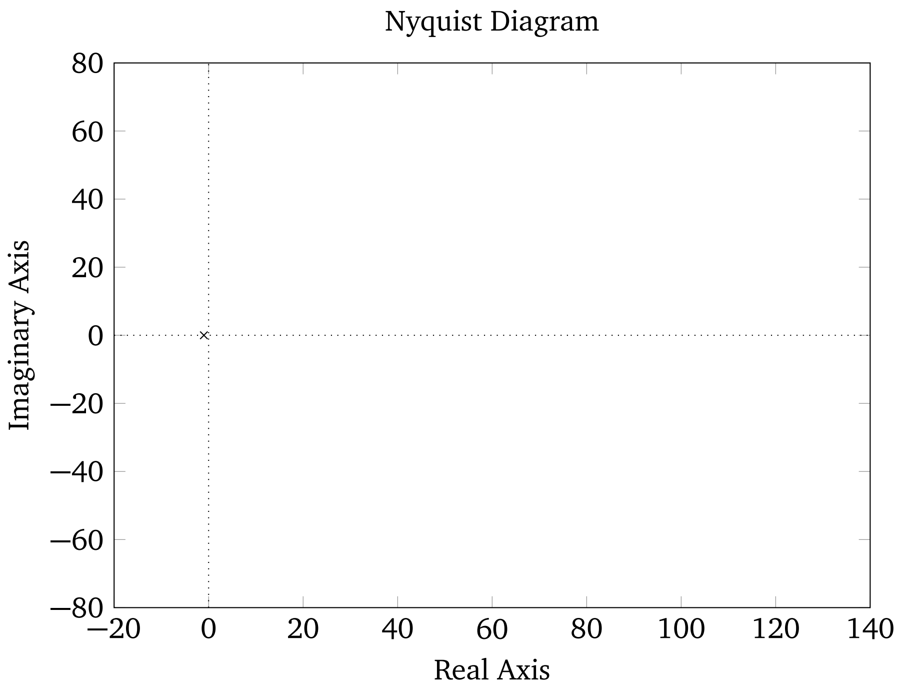


6. Bestimmen Sie die Werte für Δh, t_ε und t_{an} für $\varepsilon = 5\%$.

$\Delta h =$ $t_\varepsilon =$ $t_{\text{an}} =$

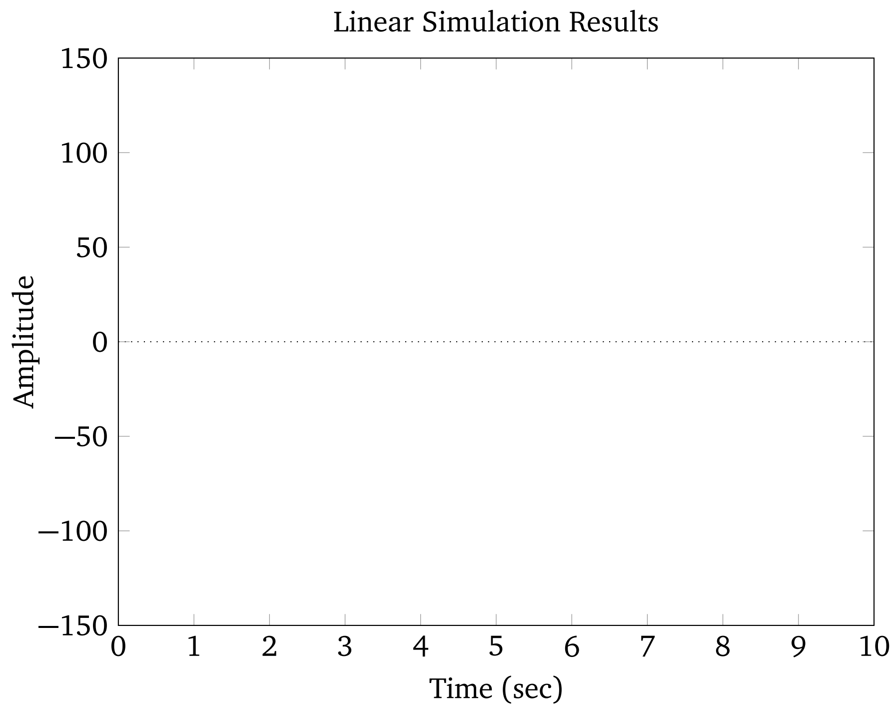
7. Zeichnen Sie das Bode-Diagramm und die Ortskurve der Strecke (Ventilator) und geben Sie die Durchtrittsfrequenz ω_D sowie den Amplitudenrand A_{rd} und Phasenrand φ_R an.





$\omega_D =$ $A_{rd} =$ $\varphi_R =$

8. Lassen Sie die Reaktion der Strecke (Ventilator) auf ein Sinussignal, mit Amplitude A = 1 und einer Frequenz von $\omega \approx 1\,\frac{\text{rad}}{\text{s}}$, für eine Dauer von 10 Sekunden zeichnen.



9. Verändern Sie die Verstärkung der Strecke und führen Sie die Punkte (5) und (7) erneut aus. Was beobachten Sie als Veränderung von Sprungantwort, Bodediagramm und Ortskurve?

10. Verschieben Sie die Pole der Strecke und führen Sie die Punkte (5) und (7) erneut aus. Was fällt ihnen in der Veränderung der Sprungantwort und der Veränderung im Verlauf des Bodediagramms auf, wenn Sie die Pole weiter links oder weiter rechts platzieren?

4.2 Reglerentwurf mit dem Frequenzkennlinienverfahren

4.2.1 Entwurf eines P-Reglers

Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion eines P-Reglers, welcher im geschlossenen Regelkreis mit der Strecke (Ventilator) eine maximale Überschwingweite von $\Delta h = 0{,}3$ erzeugt. Nutzen Sie dafür die Ergebnisse Ihrer Hausaufgabe.

1. Bestimmen Sie die Durchtrittsfrequenz ω_D.

   $\omega_\mathrm{D} =$

2. Bestimmen Sie die Absenkung / Anhebung durch den Regler (**nicht in dB!**).

   $K_\mathrm{R} =$

3. Geben Sie die Übertragungsfunktion des Reglers $G_\mathrm{R}(s)$ an.
   Hinweis: Speichern Sie die Übertragungsfunktion in die Variable „regler_P".

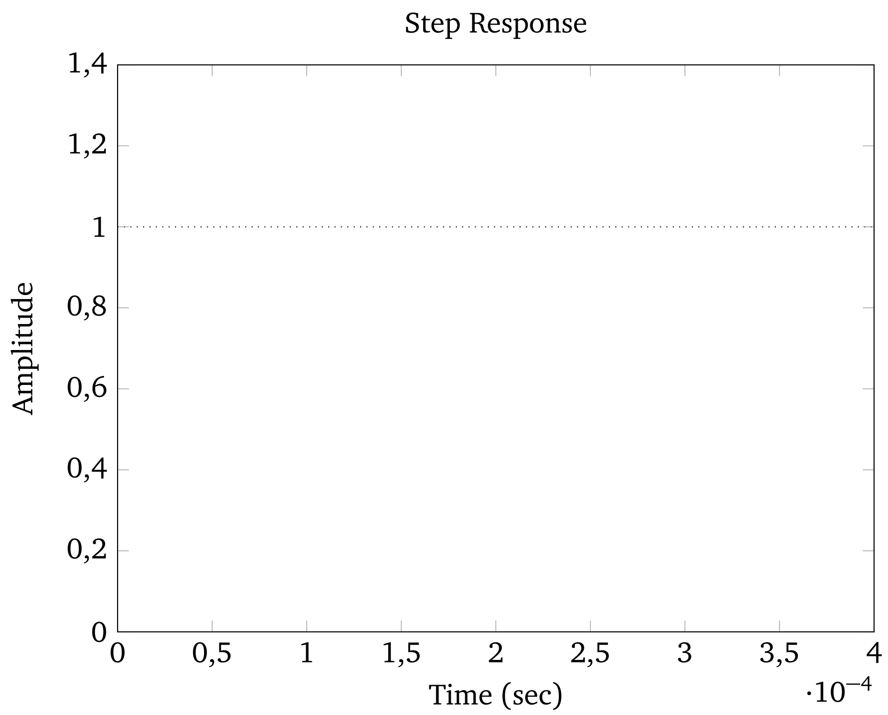
   $G_\mathrm{R}(s) =$

   Befehl: `regler_P =`

4. Bestimmen Sie die Pole des geschlossenen Regelkreises.
   Hinweis: Der geschlossene Regelkreis setzt sich aus dem Regler und der Strecke zusammen.

$s_1 =$ $\qquad\qquad\qquad$ $s_2 =$

5. Testen Sie den Regler, indem Sie sich die Reaktion des geschlossenen Regelkreises auf einen Einheitssprung plotten lassen.



Entspricht das Ergebnis in Bezug auf stationäre Genauigkeit und Überschwingung Ihren Erwartungen?

6. Variieren Sie die soeben gefundene Übertragungsfunktion des Reglers und führen Sie die Schritte (5) und (4) erneut durch. Was fällt Ihnen in Bezug auf stationäre Genauigkeit und Überschwingung auf?

   Hinweis: Versuchen Sie auch sehr kleine K_R, z. B. $0 \leq K_\mathrm{R} \leq 0{,}5$.

7. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit denen der ungeregelten Strecke.

8. Welche Aussage können Sie über die stationäre Genauigkeit des über den P-Regler geschlossenen Regelkreis treffen. Wie kann die Genauigkeit mit einem P-Regler verbessert werden?

4.2.2 Entwurf eines PI-Reglers

Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion eines PI-Reglers, welcher im geschlossenen Regelkreis mit der Strecke (Ventilator) eine maximale Überschwingweite von $\Delta h = 0{,}3$ erzeugt. Nutzen Sie dafür die Ergebnisse Ihrer Hausaufgabe.

1. Geben Sie die Zeitkonstante T_R des Reglers an (siehe Aufgabe 4.1.2).
   Hinweis: Speichern Sie die Übertragungsfunktion in die Variable „regler_PI_1".

   $T_R =$

   Befehl: `regler_PI_1 =`

2. Bestimmen Sie die Durchtrittsfrequenz ω_D.

   $\omega_\mathrm{D} =$

3. Bestimmen Sie die Absenkung / Anhebung durch den Regler (**nicht in dB!**).

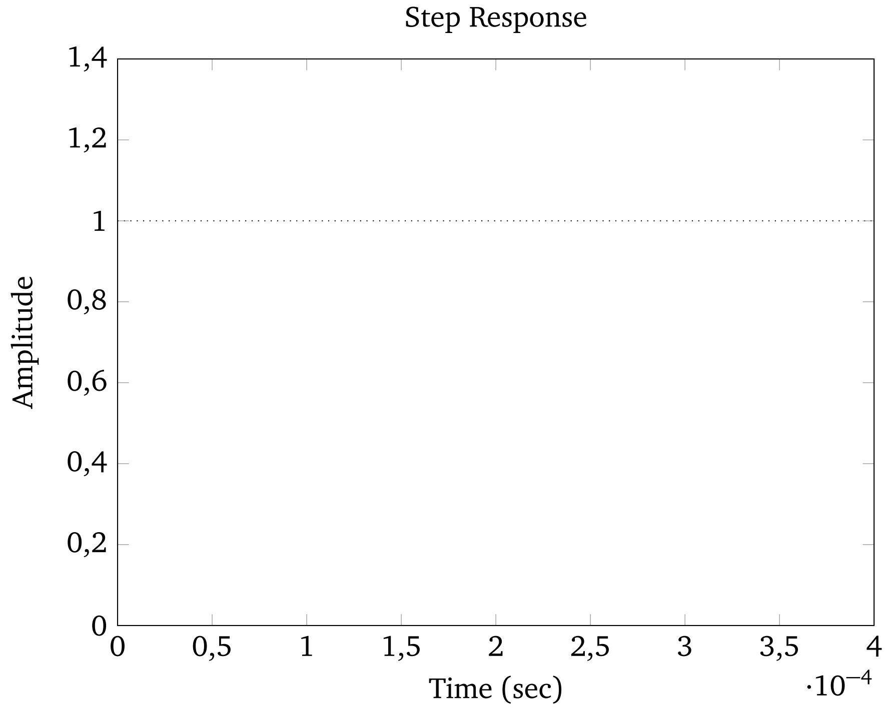
   $K_\mathrm{R} =$

4. Geben Sie die Übertragungsfunktion $G_{\mathrm{R,PI\_1}}(s)$ des Reglers an.
   Hinweis: Speichern Sie die Übertragungsfunktion in die Variable „regler_PI_1".

   $G_{\mathrm{R,PI\_1}}(s) =$

   Befehl: `regler_PI_1 =`

5. Testen Sie den Regler, indem Sie sich die Reaktion des geschlossenen Regelkreises auf einen Einheitssprung plotten lassen.

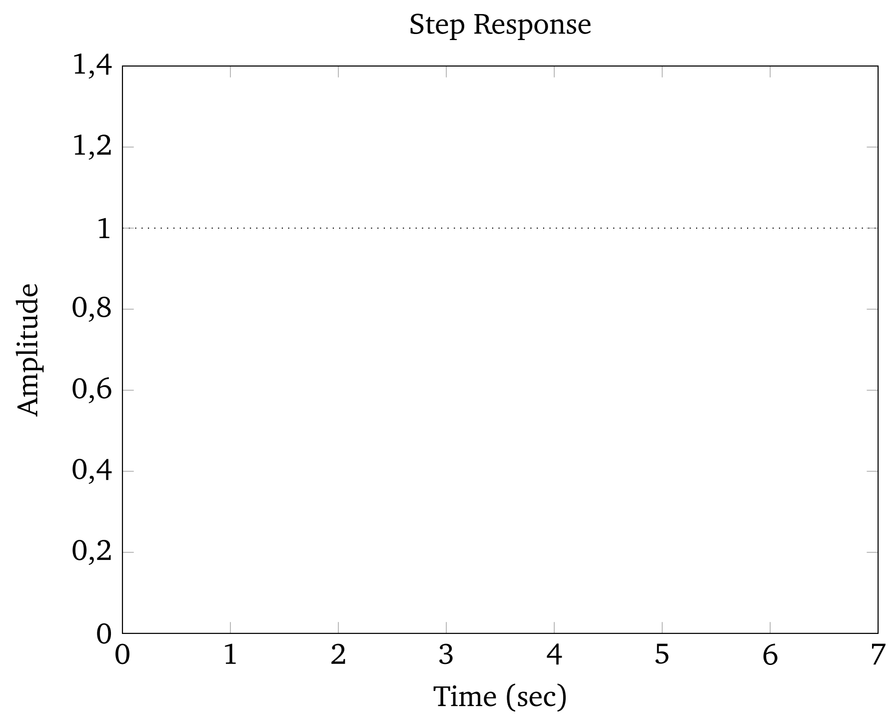


6. Wo liegen die Pole des geschlossenen Regelkreises? Vergleichen Sie mit den Ergebnissen der Strecke und des P-geregelten Systems.

$s_1 =$ $s_2 =$ $s_3 =$

Vergleich:

7. Kompensieren Sie durch den Regler jetzt den anderen Pol (siehe Aufgabe 4.1.2) und führen Sie den Schritt (5) erneut durch. Geben Sie T_R und K_R und die neuen Pole an. Vergleichen Sie das Zeitverhalten der Sprungantwort und die Lage der Polstellen mit obigen Ergebnissen.



8. Welche Aussage können Sie über die stationäre Genauigkeit des Regelkreises mittels eines PI-Reglers treffen.

4.3 Reglerentwurf und Synthese nach dem Betragsoptimum

Bestimmen Sie einen PI-Regler zur Regelung des Ventilators mittels der Synthese nach Betragsoptimum. Gehen Sie hierbei wie folgt vor:

1. Geben Sie die Parameter a_0, a_1, a_2 und a_3 an.

   $a_0 =$ $a_1 =$

   $a_2 =$ $a_3 =$

2. Bestimmen Sie anhand der Gleichungen der Synthese nach dem Betragsoptimum die Parameter r_0 und r_1.

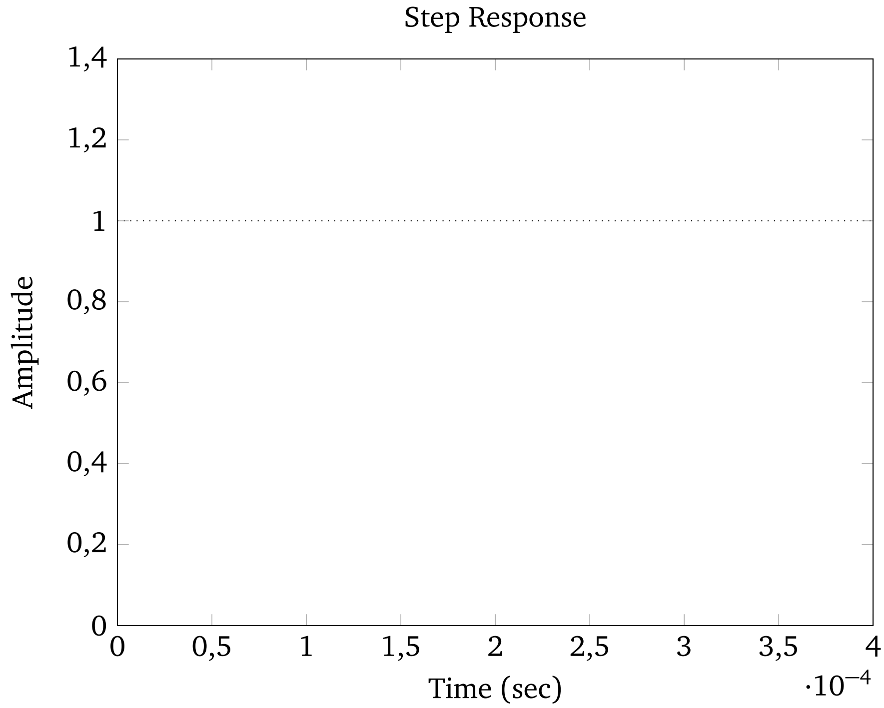
   $r_0 =$ $r_1 =$

3. Geben Sie die Übertragungsfunktion des PI-Reglers an.
   Hinweis: Speichern Sie die Übertragungsfunktion in die Variable „regler_PI_2".

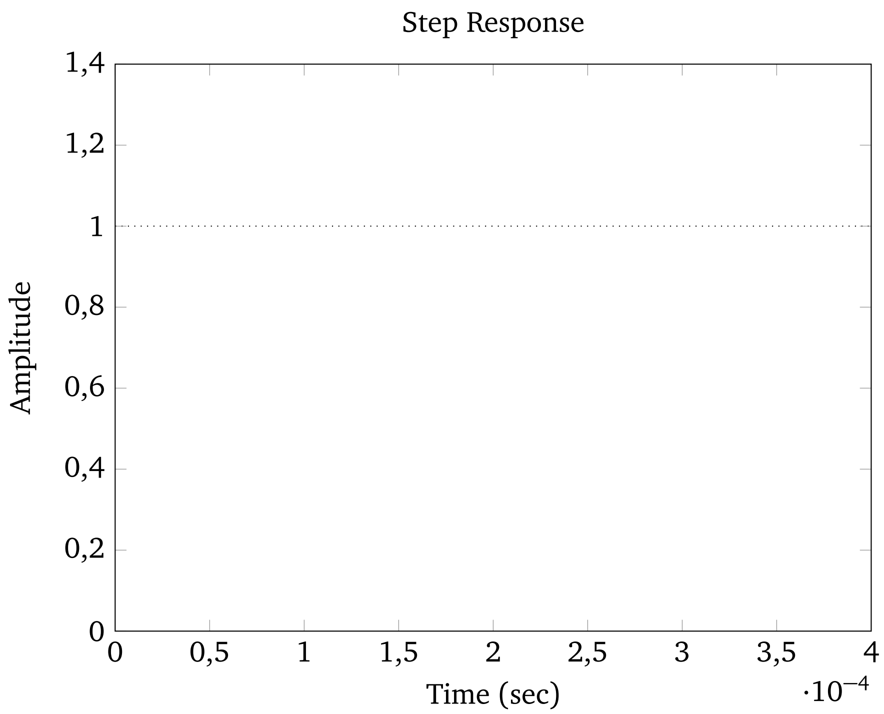
   $G_{\mathrm{R,PI\_2}}(s) =$

   Befehl: `regler_PI_2 =`

4. Testen Sie den Regler, indem Sie die Reaktion des geschlossenen Regelkreises auf einen Einheitssprung plotten lassen.



Variieren Sie die soeben gefundene Übertragungsfunktion des Reglers, indem Sie den Wert r_0 verdoppeln. Geben Sie die Übertragungsfunktion und die Sprungfunktion des geschlossen Regelkreises an. Vergleichen Sie die Lage der Polstellen.



4.4 Vergleich der Reglerentwurfsverfahren

1. Welche Aussage können Sie hinsichtlich der Dämpfung eines Regelkreises mittels der beiden Verfahren treffen?

2. Welche Aussage können Sie hinsichtlich der Einflussnahme auf die Ergebnisse mittels der beiden Verfahren treffen?

3. Statt eines optimalen Messgliedes soll jetzt ein PT_1-Glied mit der Zeitkonstanten $T_t = 0{,}00001$ s und der stationären Verstärkung $K = 1$ verwendet werden. Vergleichen Sie die drei entworfenen Regelungen ($G_{R,P}(s)$, $G_{R,PI\_1}(s)$, $G_{R,PI\_2}(s)$) für diesen Fall miteinander. Arbeiten diese besser oder schlechter? Geben Sie jeweils die neuen Überschwingweiten Δh an.
Hinweis: Skript steht zum Download bereit.

```
mess =
```

Protokoll Versuch 5

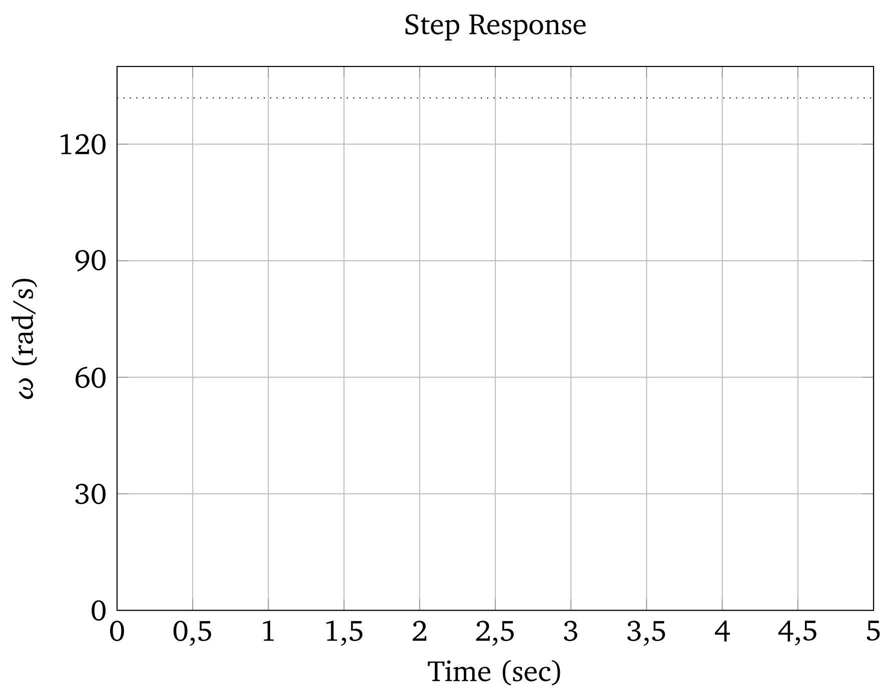
5.1 Regelung des Ventilators in Simulink

1. Erstellen Sie ein Simulink-Modell des linearisierten Ventilators.

   Hinweis: Verwenden Sie im Simulink-Modell die Parameternamen und nutzen Sie die Möglichkeit einer Übergabe der Parameterwerte an das Modell mittels m-File. Das m-File steht zum Download bereit.

2. Regen Sie die Strecke mit einem Einheitssprung an und zeichnen Sie die Sprungantwort.

   Hinweis: Beachten Sie die Einstellungen der „Data history" im Scope.

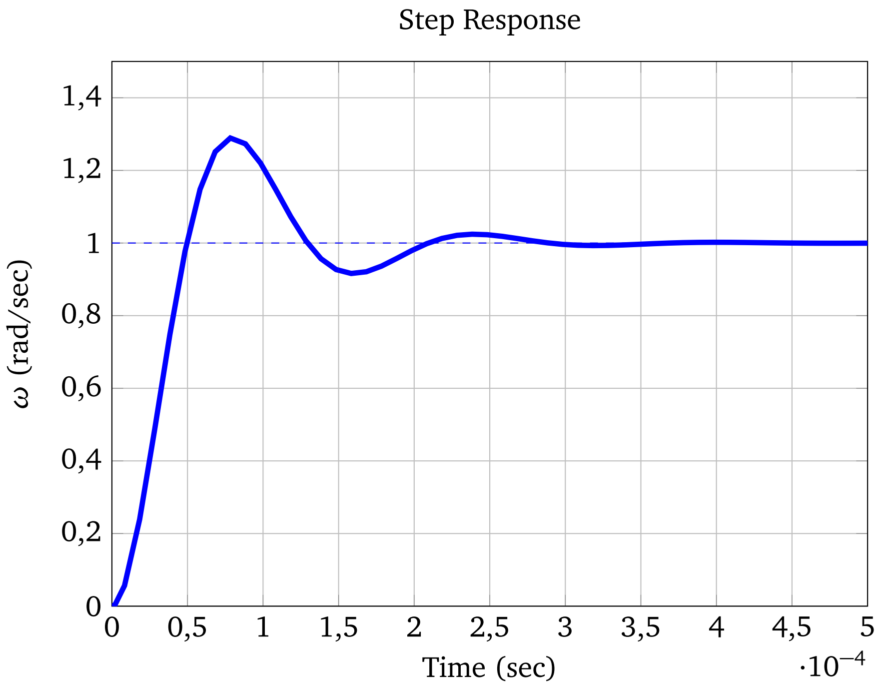


3. Erweitern Sie Ihr Simulink-Modell zu einem Regelkreis. Fassen sie hierzu das System zum Subsystem zusammen. Verwenden Sie als Regler die drei in Versuch 4 entworfenen Regler ($P_{\text{Freq.}}$, $PI_{\text{Freq.}}$ und $PI_{\text{Betragsopt.}}$).

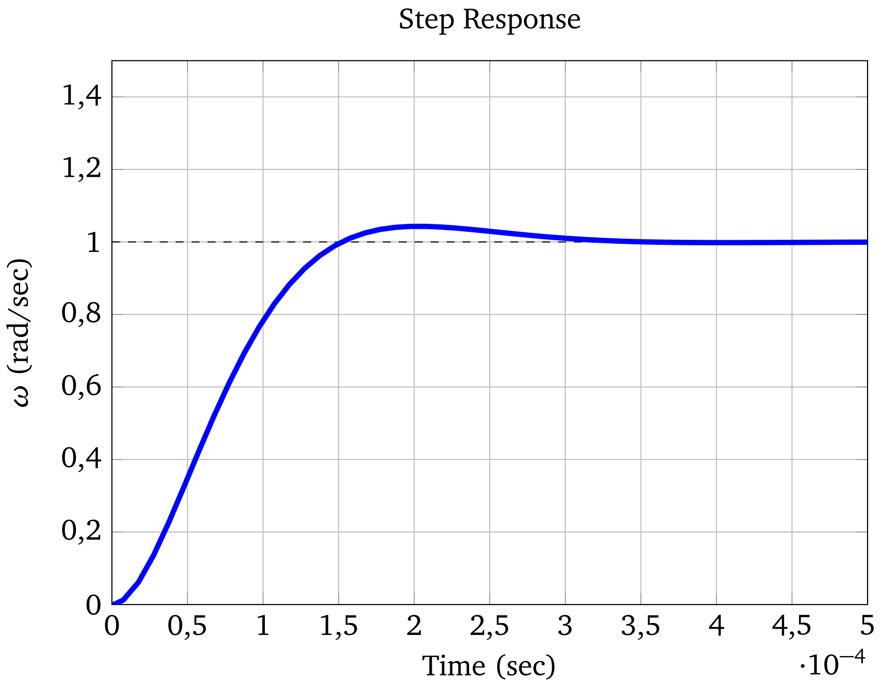
   Hinweis: Wählen Sie eine geeignete Simulationszeit. Die Ergebnisse werden erst im Millisekunden-Bereich sichtbar!

Ordnen Sie die Sprungantworten den jeweiligen Reglern zu:

Regler:



Regler:



4. Führen Sie nun die letzten Schritte mit der nichtlinearen Strecke aus und vergleichen Sie die Ergebnisse mit denen des linearisierten Modells.

   Hinweis: Kopieren Sie zunächst das Modell in eine neue Datei und nehmen Sie dann die nötigen Veränderungen vor.

   a) Geben Sie an, welche Modeländerungen sich ergeben.

   b) Beschreiben Sie die Veränderungen zu den Ergebnissen zum linearen Streckenmodell.

   c) Erklären Sie das beobachtete Simulationsverhalten. Fügen Sie hierzu Scopes in die Rückführung des Lastmoments M_L im linearen und nichtlinearen Modell und im Pfad des Motormoments M ein.

zu a: Modelländerungen

zu b: Simulationsergebnisse:

zu c: Erläuterung:

5.2 Regelung des Pendelschraubers in Simulink

1. Erstellen Sie ein Simulink-Modell des linearisierten Pendels. Fassen Sie auch das Pendelmodell zu einem Subsystem zusammen. Fügen Sie dann das erstellte Modell an das linearisierte Modell des Ventilators an, um das Modell des vollständigen Pendelschraubers zu erhalten.
2. Bestimmen Sie mittels des Frequenzkennlinienverfahrens aus Versuch 4 und der Faustformeln einen idealen PID-Regler mit dem ein maximales Überschwingen von $\Delta h = 0{,}3$ erreicht wird.

   Hinweis: Die folgenden Aufgaben bis einschließlich 5.3.4 sind in MATLAB zu bearbeiten. Nutzen Sie die Koeffizientendarstellung zum Reglerentwurf.

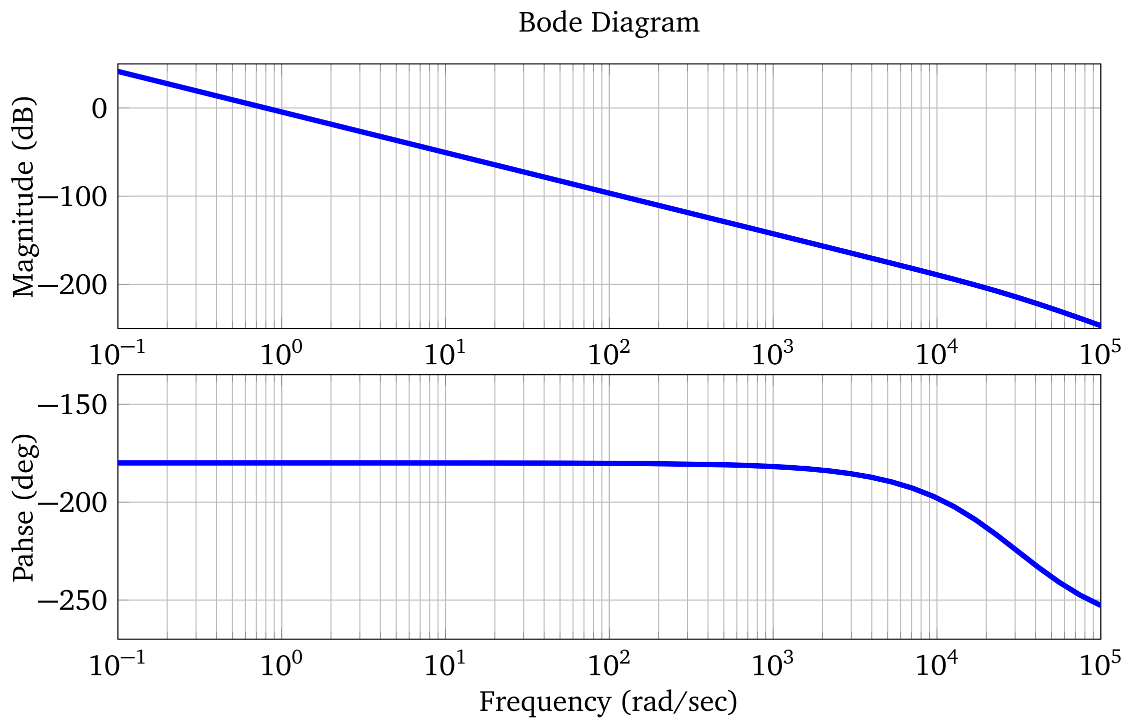
   Berechnen Sie hier Dämpfung, Phasenreserve und geben Sie die Zeitkonstanten an:

   Hinweis: Vermeiden Sie im Folgenden das Programmieren im Workspace. Schreiben Sie Skripte für die einzelnen Versuchsteile. Auf diese Weise ist es einfacher für Sie, Ihr Vorgehen systematisch nachzuvollziehen.

3. Zeichen Sie das Bode-Diagramm des offenen Regelkreises für $0{,}1 \leq \omega \leq 10^5$.

Geben Sie hier den MATLAB-Befehl an:

Sie erhalten folgendes Diagramm:



Was fällt Ihnen auf? Warum können Sie den Reglerentwurf nicht fortsetzen?

4. Modifizieren Sie Ihren Regler, so dass Sie den Entwurf mittels des Frequenzkennlinienverfahrens fortsetzen können.

   Verschieben Sie dazu die Reglernullstelle bei $s = -1{,}691$ um eine Dekade nach links. Zeichnen Sie das zugehörige Bode-Diagramm und bestimmen Sie den PID-Regeler.
   Hinweis: Es sollte zwei Frequenzen mit der berechneten Phasenreserve geben. Verwenden Sie die kleinere.

   a) Warum wird der Entwurf jetzt möglich?

   b) Geben Sie hier die PID-Reglerübertragungsfunktion an:

5. Erproben Sie den ermittelten Regler in Simulink.

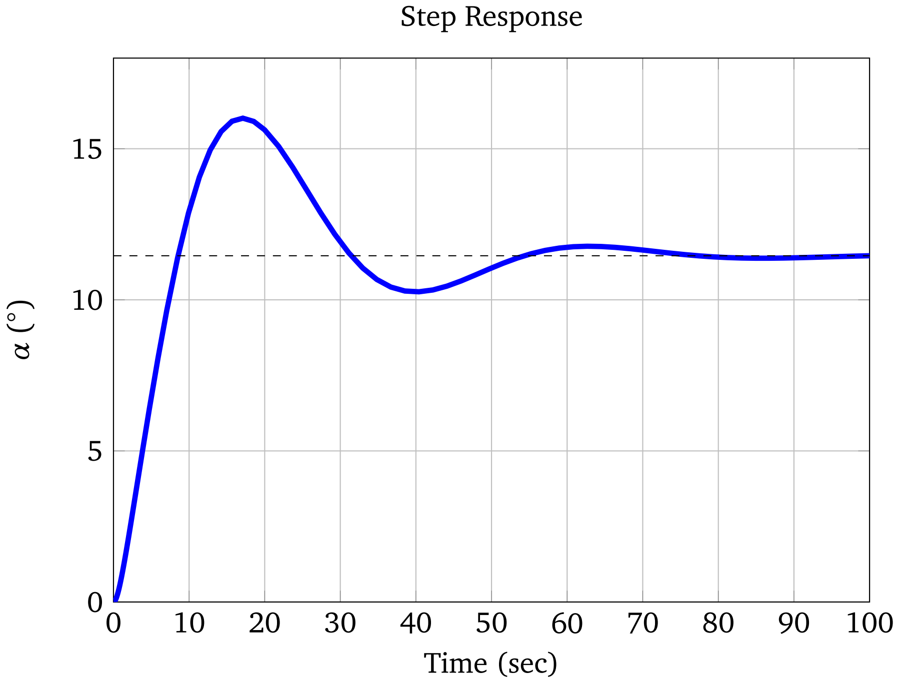
   Hinweis: Benutzen sie die Parameternamen in Ihrem Simulink-Modell und übergeben Sie die Werte aus Ihrem Skript.

   a) Warum müssen Sie Ihren Regler um einen Pol ergänzen? Welcher Regleranteil (P, I oder D) ist dafür verantwortlich?

   b) Wie muss dieser zusätzliche Pol $(s + \frac{1}{T_1})$ gewählt werden und warum?
   Hinweis: Bitte beachten sie, dass ein zusätzlicher Faktor in der Pol-Nullstellen-Form auch zu einer Veränderung des Zählers in der Koeffizientenform führen kann.

6. Setzen Sie $T_1 = 0{,}01$ und regen Sie den Regelkreis mit einem Sprung der Höhe $0{,}2\,\mathrm{rad}$ an.

   Sie sollten das folgende Ergebnis erhalten. Passen Sie hierzu die Skalierung der Ordinatenachse von rad auf Grad an.



Geben Sie die Umrechnung von rad auf Grad hier an:

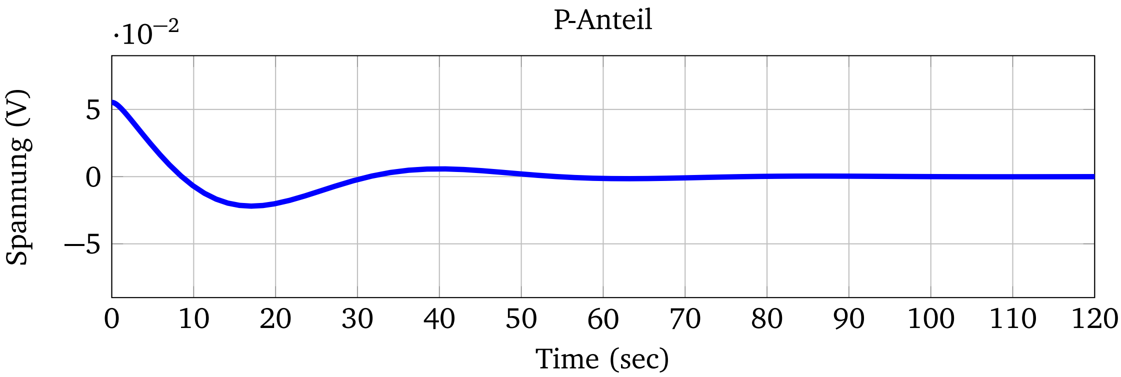
7. Simulieren Sie den gleichen Sprung nochmals. Stellen Sie diesmal den Solver ein, den Sie in der Hausaufgabe ausgewählt haben. Falls Sie den Solver bereits umgestellt haben, setzen Sie Ihn wieder zurück auf den Standard-Solver ode45.

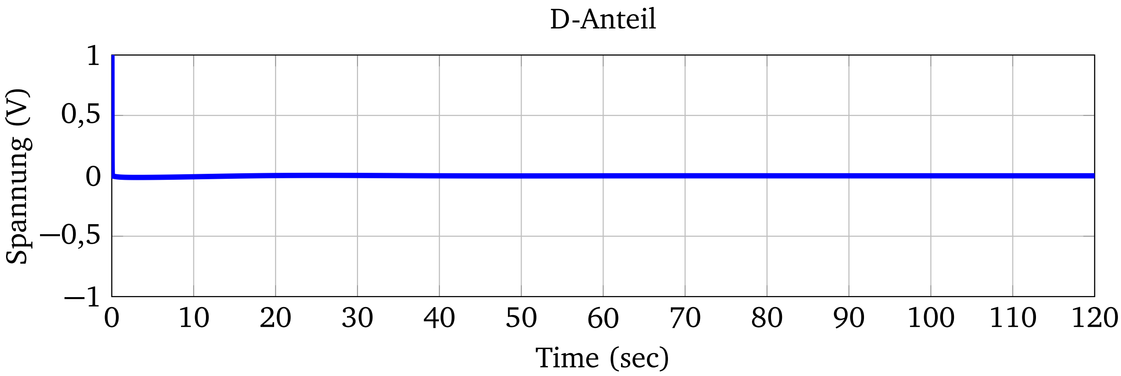
Warum ist es dringend empfohlen die Solvereinstellung zu berücksichtigen?

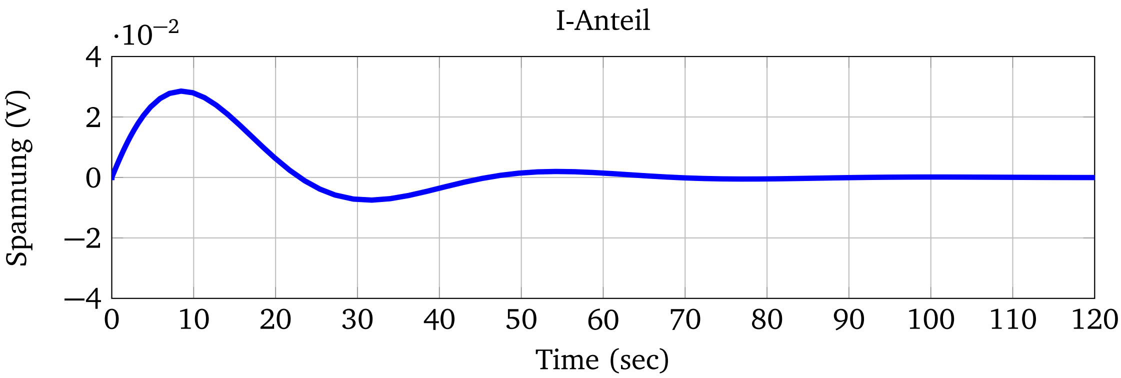
8. Verändern Sie den realen PID-Regler, so dass er durch eine Parallelschaltung aus einem proportionalen, einem integralen und einem differenzierenden Anteil aufgebaut ist.

   Fügen Sie jedem Anteil eine eigene Anzeige (Scope) hinzu und simulieren Sie den Regelkreis. Betrachten Sie die Verläufe der einzelnen Anteile des Reglers.

   Hinweis: Beachten Sie die Einstellungen der „Data history“ im Scope.
   Sie erhalten die folgenden Plots.







Geben Sie die Reglerparameter K_P, K_D und K_I für eine Verzögerung von $T_1 = 0{,}01s$ an:

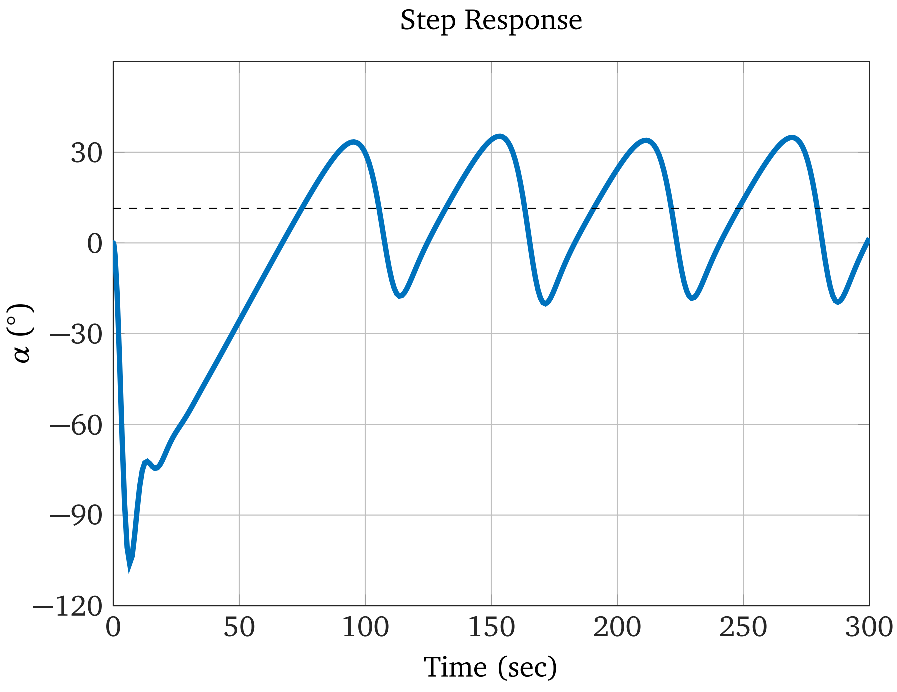
9. Erstellen Sie ein Simulink-Modell des nichtlinearen Modells mit dem am linearen Modell entworfenen Regler.

   Hinweis: Kopieren Sie hierzu das lineare Modell in ein neues Dokument und nehmen Sie die nötigen Veränderungen vor.

Geben Sie hier die Unterschiede des nichtlinearen zum linearem Modell an:

10. Simulieren Sie das nichtlineare Modell für einen Eingangssprung der Höhe 0,2 rad.

    Sie sollten folgendes Simulationsergebnis erhalten. Beachten Sie die Skalierung der Ordinatenachse in Grad.



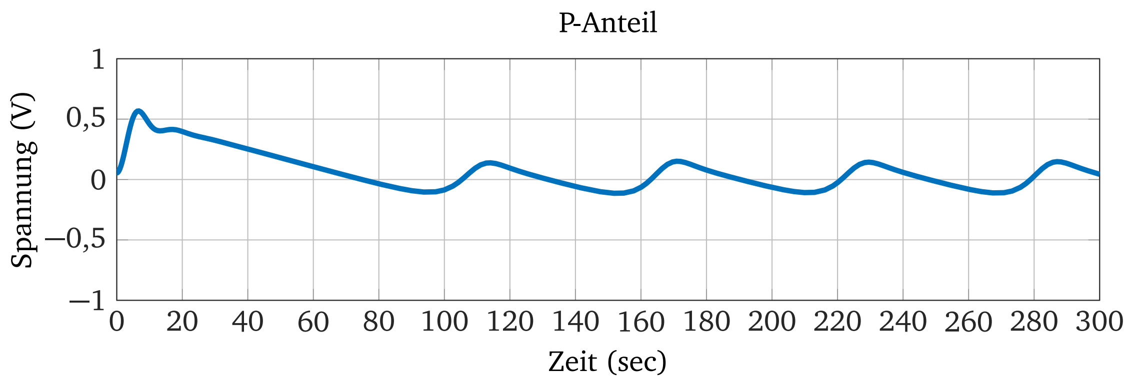
Hinweis: Beachten Sie die Einstellungen der „Data history“ im Scope.

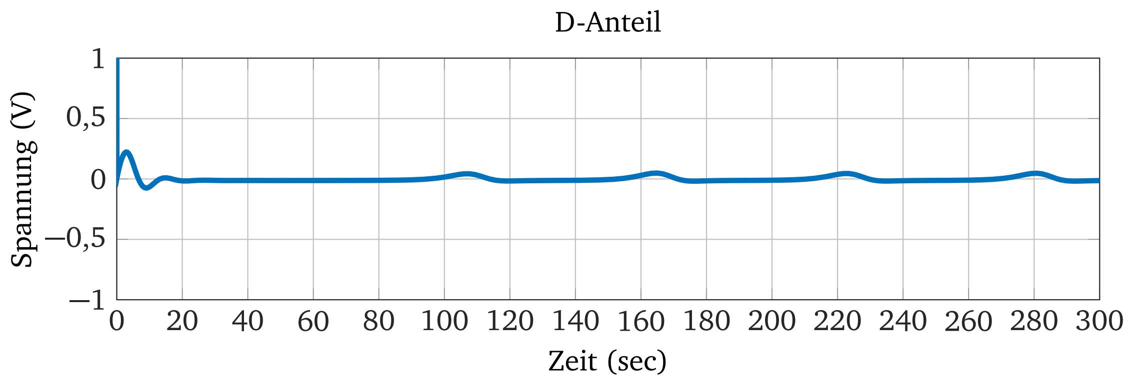
11. Welche zwei wesentlichen Unterschiede des Kurvenverlaufs fallen Ihnen im Vergleich zum linearen System auf? Erklären Sie diese soweit möglich!

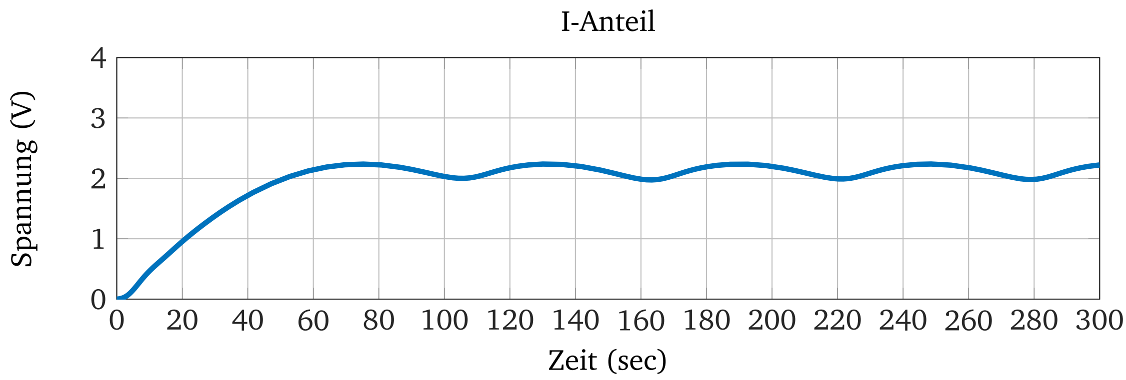
Führen Sie Unterschiede auf:

Geben Sie an, worauf sich die Unterschiede zurückführen lassen:

12. Betrachten Sie die Regleranteile (P, I und D).
Sie erhalten die folgenden Simulationsverläufe.



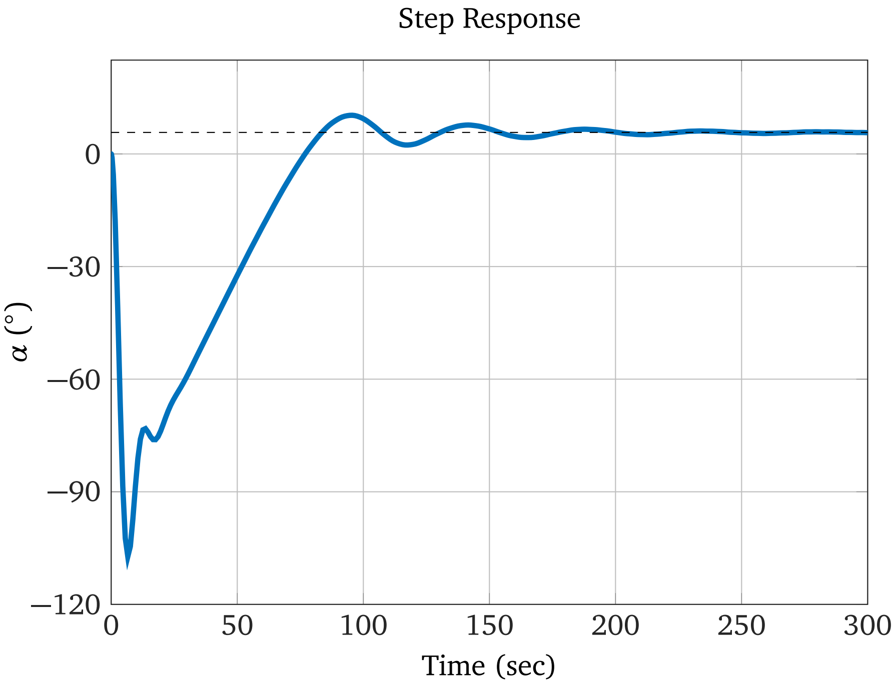




Beschreiben Sie Ihre Beobachtung und erläutern Sie das Verhalten:

13. Stellen Sie die Höhe des Eingangssprunges auf einen Wert von 0,1 rad. Was fällt Ihnen im Vergleich zum Sprung der Höhe 0,2 rad auf?

    Sie sollten folgendes Simulationsergebnis erhalten.



Führen Sie die Unterschiede auf:

14. Erklären Sie Ihre Simulationsergebnisse. Warum reagiert das nichtlineare Modell auf die beobachtete Art und Weise?

    Erläutern Sie zum einen den grundsätzlichen Kurvenverlauf und zum anderen das Erreichen des Endwertes. Simulieren Sie zur Veranschaulichung das Erreichen des Endwertes für Sprunghöhen kleiner 0,2 rad und größer 0,2 rad.

    Hinweis: Überlegen Sie, was ein Sprung in Höhe von 0,2 rad bzw. 0,1 rad physikalisch bedeutet.

Erläuterung:

15. Verändern Sie Ihr Simulink-Modell und schreiben Sie ein MATLAB-Skipt, so dass Sie das Modell aus dem Skript starten können und eine beliebige Sprunghöhe und Momentenstörung zu beliebigen Zeitpunkten vorgeben können. Die Ausgabe der Simulation soll in diesem Skript über den plot-Befehl erfolgen.

Geben Sie an, welche Änderungen Sie am Modell vornehmen müssen.

Geben Sie den Code Ihres Skriptes an:

Protokoll Versuch 6

6.1 Das SISO-Tool in MATLAB

Gegeben sei das System

$$G_S(s) = \frac{1}{s^3 + s^2}\,.$$

Dieses System soll mit Hilfe der WOK stabilisiert und mit höchstmöglicher Schnelligkeit geregelt werden.

1. Geben Sie $G_S(s)$ in MATLAB ein. Öffnen Sie das SISO-Tool und importieren Sie die Übertragungsfunktion der Strecke in den Standardregelkreis. Ist der geschlossene Regelkreis stabil? Wenn ja, für welche Verstärkungsfaktoren $k > 0$?

2. Fügen Sie im SISO-Tool eine Regler-Nullstelle bei $s = -2$ ein und betrachten Sie die WOK. Um was für einen Reglertyp handelt es sich? Verschieben Sie die Nullstelle auf der reellen Achse. In welchen Bereichen muss die Nullstelle auf der reellen Achse liegen, damit der geschlossene Regelkreis stabil ist?

Benutzen Sie nun den Regler

$G_\mathrm{R}(s) = k \cdot \frac{s+0,25}{s+0,5}$.

3. Berechnen Sie die Reglerverstärkung k_max, bei der der geschlossene Regelkreis gerade noch stabil ist (Schnittpunkt mit der imaginären Achse) und geben Sie diese an. Mit welcher Frequenz schwingt das System an der Stabilitätsgrenze?

4. Fügen Sie den Regler ins SISO-Tool ein. Gehen Sie hierbei so vor, dass der Regler als Compensator im Block C steht. Bei welcher Reglerverstärkung $\tilde{k}_\mathrm{max}$ ist der geschlossene Regelkreis gerade noch stabil?

   Hinweis: Öffnen Sie im SISO-Tool die Anzeige der Sprungantwort, um die Verstärkung exakt zu bestimmen.

   Erklären Sie den Unterschied zwischen dem berechneten k_max und dem im Compensatorfeld abgelesenen $\tilde{k}_\mathrm{max}$. Öffnen Sie hierzu das Compensatorfeld.

5. Lassen Sie sich die Sprungantwort des geschlossenen Reglerkreises für die Regelverstärkung $\tilde{k}_{\text{mittel}} = 0{,}5 \cdot \tilde{k}_{\text{max}}$ anzeigen. Geben Sie Anstiegs- und Ausregelzeit und das maximale Überschwingen, falls vorhanden, an. Nutzen Sie hierzu die Funktionen zur Analyse von Plots im SISO-Tool.

6. Die Wurzelortskurve für positive Verstärkungsfaktoren heißt *eigentliche WOK*, für negative Verstärkungsfaktoren *komplementäre WOK*. Lassen Sie sich von MATLAB die Wurzelortskurve für negative k anzeigen. Überlegen Sie, wie Sie die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises verändern müssen, um die komplementäre WOK mit dem SISO-Tool zeichnen zu lassen. Geben Sie die Übertragungsfunktion an.

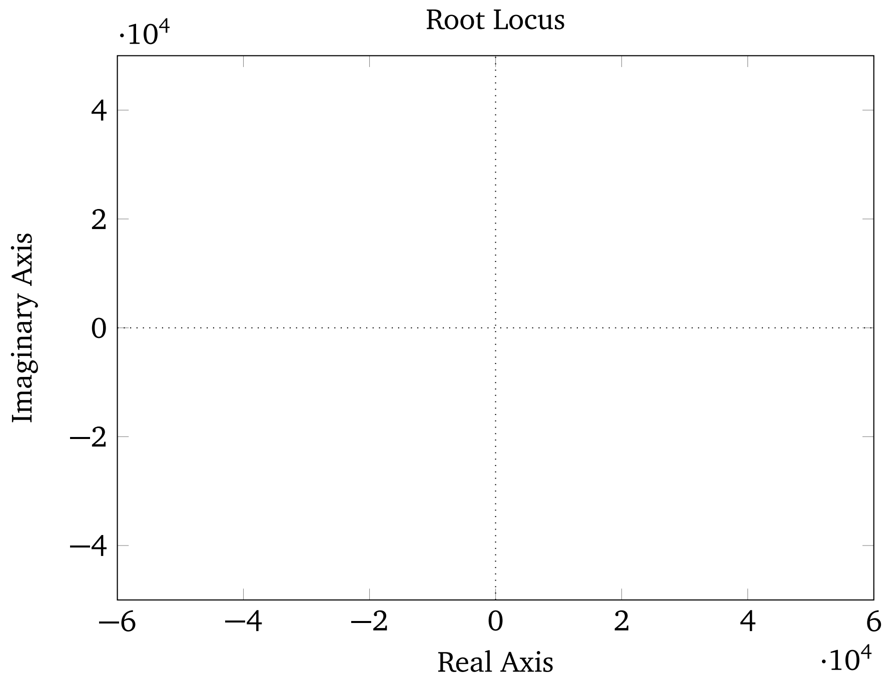
6.2 Analyse des Pendelschraubers mit Hilfe der WOK

Das Modell des Pendelschraubers ist nichtlinear. Wir betrachten an diesen Stellen die durch Linearisierung um den Arbeitspunkt $\alpha_s = 0°$ entstandene linearisierte Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{2{,}24 \cdot 10^{-5}}{1{,}72 \cdot 10^{-9} s^4 + 5{,}33 \cdot 10^{-5} s^3 + 1{,}11 \cdot 10^{-4} s^2 + 3{,}533 \cdot 10^{-5} s} \; .$$

1. Geben Sie die Übertragungsfunktion des Pendelschraubers in MATLAB ein und lassen Sie sich die Wurzelortskurve mit dem SISO-Tool anzeigen. Geben Sie, sofern möglich, den Bereich an, in dem die Verstärkung des P-Reglers $G_R(s) = k'$ liegen darf, damit der geschlossene Regelkreis stabil ist.

   Achtung: Verwechseln Sie nicht die Reglerverstärkung k' (die in den anderen Beispielen als k bezeichnet wurde) mit der Konstanten k aus der Modellbildung (Gleichung (A.17) im Skript).



2. Regeln Sie den Pendelschrauber mit dem in Aufgabe 5.2.4 gefundenen PID-Regler

$$G_R(s) = k' \frac{(s + 0{,}3913) \cdot (s + 0{,}1696)}{s} \tag{6.1}$$

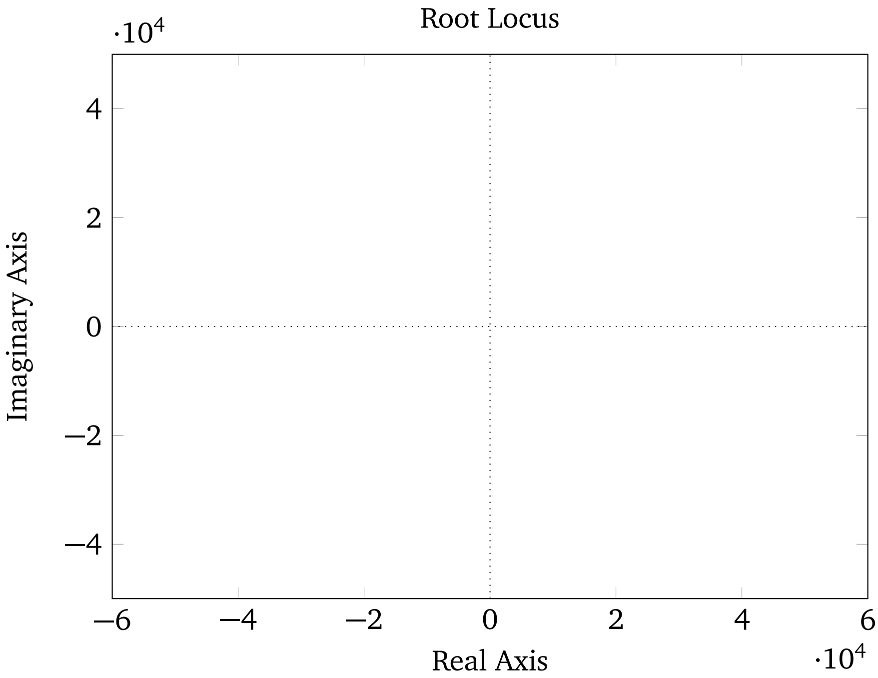
Lassen Sie sich die Wurzelortskurve mit dem SISO-Tool anzeigen. In welchem Bereich liegt die Verstärkung, damit das System stabil ist? Lesen Sie $\tilde{k}'$ ab und berechnen Sie k'.

Hinweis: Zoomen Sie in die WOK und öffnen Sie im SISO-Tool die Anzeige der Sprungantwort, um die Verstärkung exakt zu bestimmen.

3. Bei welcher Verstärkung ist der geschlossene Regelkreis schwingungsfrei und so schnell wie möglich?

4. Der geschlossene Regelkreis darf ein maximales Überschwingen von 5 % aufweisen. Zeichnen Sie den Bereich für 5 % Überschwingen in die komplexe Ebene ein. Fügen Sie die Anforderung in das SISO-Tool ein und analysieren Sie, ob der Regler aus Versuch 5 diese Anforderung erfüllen kann. Wenn ja, in welchem Bereich muss das abgelesene $\tilde{k}'$ und das für den Regler berechnete k' liegen.

   Verhält sich der geschlossene Regelkreis auch entsprechend? (Begründung)



5. Eine weitere Forderung an den Regler sei, dass die Ausregelzeit maximal 5 Sekunden betragen darf. Ist diese Anforderungen mit dem Regler erfüllbar? Wenn ja, für welche Verstärkungen k'?

6. Untersuchen Sie nun, wie gut der Regler aus Versuch 5 ist, wenn der Arbeitspunkt $\alpha_s = 0°$ verlassen wird. Verwenden Sie die angegebenen um α_s linearisierten Übertragungsfunktionen:

   $\alpha_s = 0{,}25 \cdot \pi$:

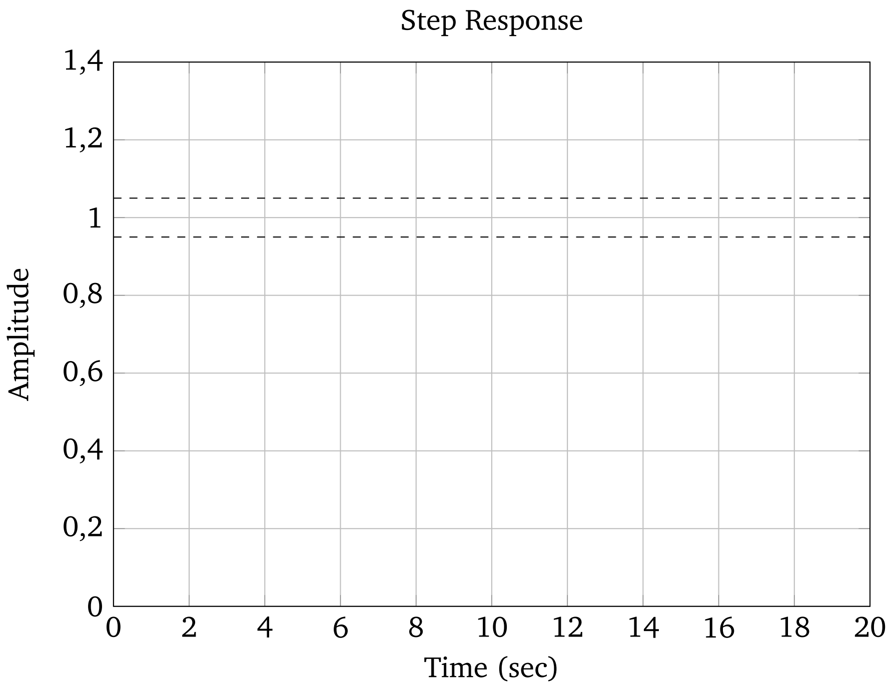
$$G_{0,25\pi}(s) = \frac{1{,}89 \cdot 10^{-5}}{1{,}72 \cdot 10^{-9} s^4 + 5{,}33 \cdot 10^{-5} s^3 + 1{,}08 \cdot 10^{-4} s^2 + 2{,}29 \cdot 10^{-5} s - 1{,}87 \cdot 10^{-5}}$$

   $\alpha_s = -0{,}25 \cdot \pi$:

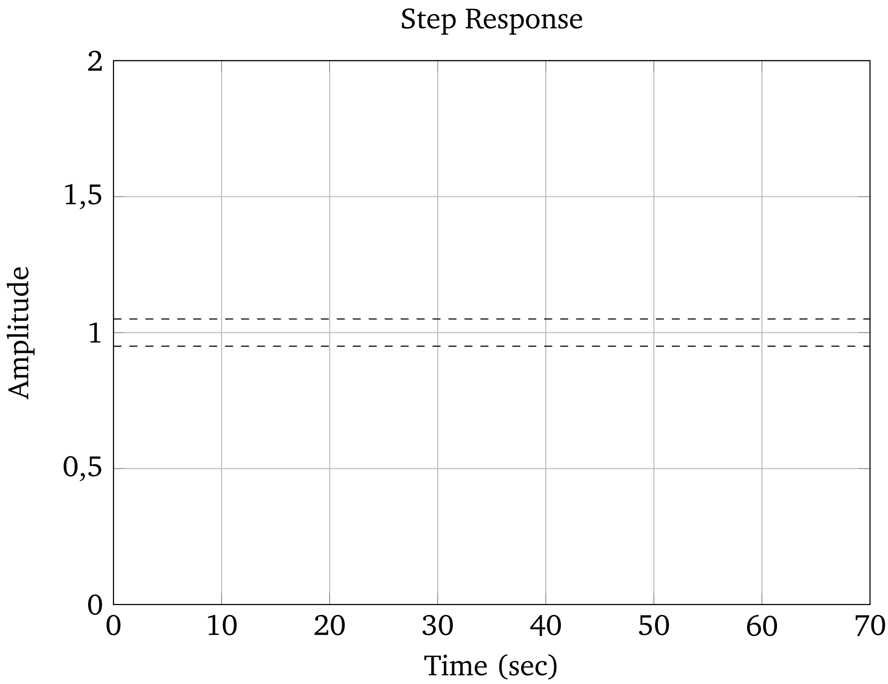
$$G_{-0,25\pi}(s) = \frac{1{,}89 \cdot 10^{-5}}{1{,}72 \cdot 10^{-9} s^4 + 5{,}33 \cdot 10^{-5} s^3 + 1{,}09 \cdot 10^{-4} s^2 + 4{,}57 \cdot 10^{-5} s + 1{,}87 \cdot 10^{-5}}.$$

   Untersuchen Sie die verschiedenen geschlossenen Regelkreise für den maximalen aus Aufgabe 6.2.4 ermittelten k'-Wert. Wie unterscheidet sich das Verhalten der Regelkreise von dem um $\alpha_s = 0°$ linearisierten?

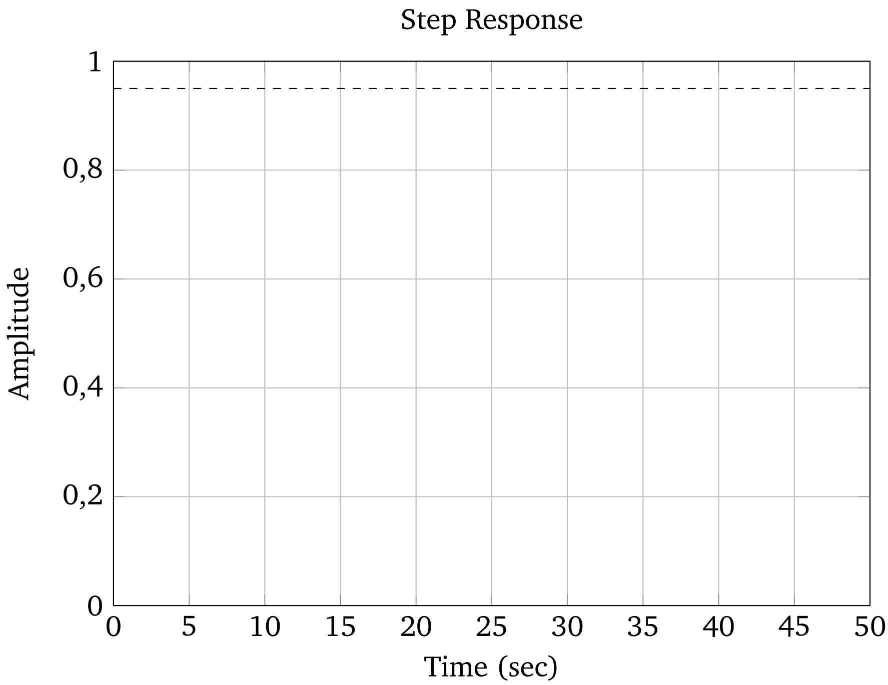
$\alpha_s = 0$:



$\alpha_s = 0{,}25 \cdot \pi$:



$\alpha_s = -0{,}25 \cdot \pi$:



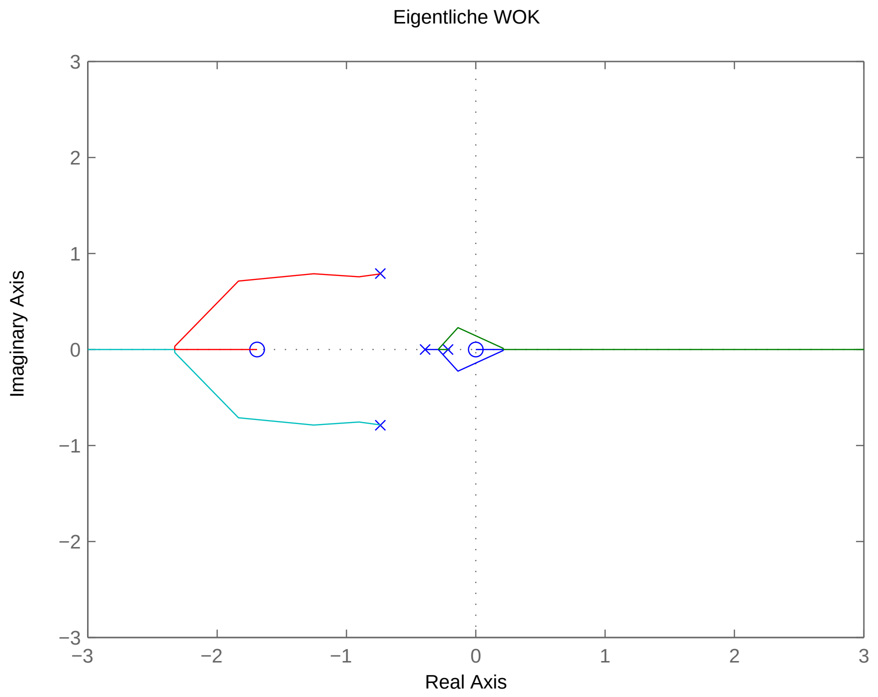
6.3 Analyse von Parameteränderungen mit Hilfe der WOK

1. Für welche α_s arbeitet der Regelkreis stabil? Formen Sie die Übertragungsfunktion analog zur Hausaufgabe unter Verwendung des Reglers aus Aufgabe 6.2.4 mit $k' = k'_{\text{max,5\%}}$ entsprechend um. Schreiben Sie hierzu zunächst ein Skript, das die Parameter enthält, so dass Sie mit den Variablen arbeiten können. Geben Sie zum Schluss die für das Erstellen der WOK relevante Gesamtübertragungsfunktion in Pol-/Nullstellenform an.

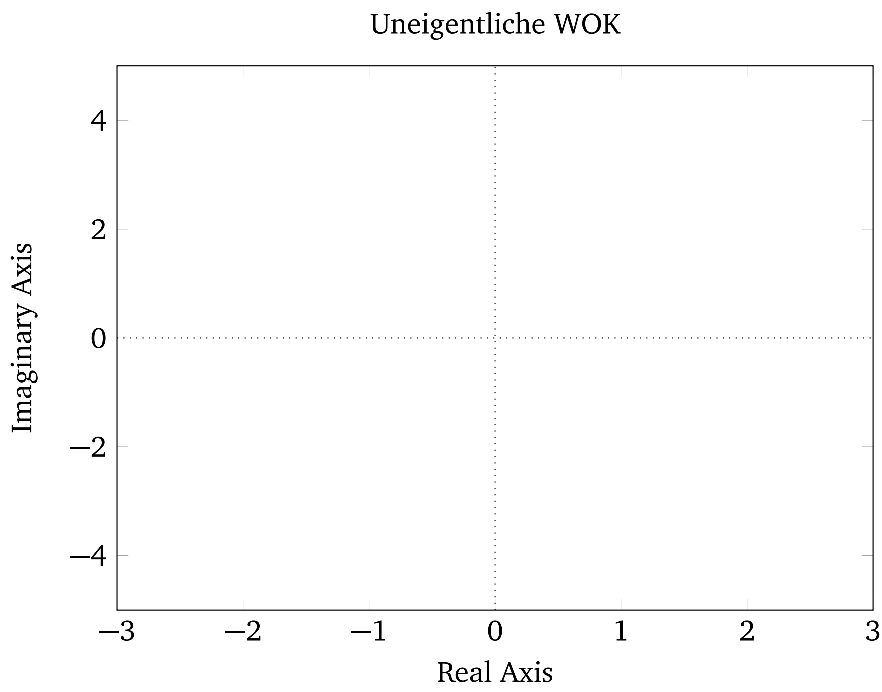
   Zeichnen Sie die Wurzelortskurven. Beachten Sie, dass α_s positiv und negativ sein kann. Entsprechen die Ergebnisse Ihren Erwartungen? Bitte geben Sie das Skript zum Plotten der WOKs an und erläutern Sie kurz die Ergebnisse.

   Hinweis: Verwenden Sie die Ergebnisse aus der Hausaufgabe.

Als Zwischenergebnis wird die eigentliche WOK angegeben.
$\alpha_s \geq 0$:



$\alpha_s \leq 0$:



2. Lesen Sie das α_s ab, bei dem der Regler nicht mehr stabil ist. Welchem Winkel in ° entspricht dieser Wert?

3. Entspricht dieser Wert Ihren Erwartungen (vgl. der Sprunghöhen aus Versuch 5)? Begründen Sie ggf. die Abweichung und Bewerten Sie das Ergebnis bzgl. der Eignung für die Systemanalyse.