UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN
Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abt. Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik
Regelungstechnik 13. Februar 2018

---

90 Minuten

Einlesezeit

Für die Durchsicht der Klausur wird eine „Einlesezeit" von **10 Minuten** gewährt. Während dieser Zeitdauer ist es Ihnen **nicht** gestattet, mit der Bearbeitung der Aufgaben zu beginnen. Dies bedeutet konkret, dass sich während der gesamten Dauer der Einlesezeit keinerlei Schreibgeräte (Stifte, Füller, etc.) auf dem Tisch befinden dürfen sowie die Nutzung von mitgeführten Unterlagen respektive (elektronischer) Wörterbücher bzw. tragbarer Translater strengstens untersagt ist. Nehmen Sie Ihre Schreibgeräte erst zur Hand, wenn die Prüfungsaufsicht auf das Ende der Einlesezeit hingewiesen hat und füllen Sie zunächst das Deckblatt **vollständig** aus.

Viel Erfolg!

NAME	
VORNAME	ML
MATRIKEL-NR.	
TISCH-NR.	

Klausurunterlagen

Ich versichere hiermit, dass ich sämtliche für die Durchführung der Klausur vorgesehenen Unterlagen erhalten, und dass ich meine Arbeit ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung unerlaubter Hilfsmittel und sonstiger unlauterer Mittel angefertigt habe. Ich weiß, dass ein Bekanntwerden solcher Umstände auch nachträglich zum Ausschluss von der Prüfung führt. Ich versichere weiter, dass ich sämtliche mir überlassenen Arbeitsunterlagen sowie meine Lösung vollständig zurückgegeben habe. Die Abgabe meiner Arbeit wurde in der Teilnehmerliste von Aufsichtsführenden schriftlich vermerkt.
Durch die Teilnahme versichere ich, dass ich prüfungsfähig bin. Bei Krankheit werde ich die Klausur vorzeitig beenden und unmittelbar eine Ärztin/einen Arzt aufsuchen.

DIE OBIGEN ANGABEN SOWIE DIE UNTERSCHRIFT
SIND ZWINGEND ZU KLAUSURBEGINN ZU LEISTEN.

Duisburg, den ______________ (Datum) ______________________________ (Unterschrift der/des Studierenden)

Falls Klausurunterlagen vorzeitig abgegeben: ____________ Uhr

Bewertungstabelle

Aufgabe 1	
Aufgabe 2	
Aufgabe 3	
Die Bewertung gem. PO in Ziffern ist der xls-Tabelle bzw. dem Papierausdruck zu entnehmen.	

____
(Datum und Unterschrift 1. Prüfer, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker)

____
(Datum und Unterschrift 2. Prüfer, Prof. Dr.-Ing. Mohieddine Jelali, Priv.-Doz.)

____
(Datum und Unterschrift des für die Prüfung verantwortlichen Prüfers, Söffker)

Fachnote gemäß Prüfungsordnung: (alternativ: siehe xls-Tabelle bzw. beigefügter Papierausdruck)

☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
1,0	1,3	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,7	4,0	5,0
sehr gut		gut			befriedigend			ausreichend		mangelhaft

Bemerkung: ____

Achtung: Schreiben Sie Ihre Antwort für ALLE Aufgaben direkt unter die entsprechende Aufgabe in den Aufgabenbogen!

Verwenden Sie KEINE Bleistifte oder roten Stifte für die Beantwortung von Fragen oder für Zeichnungen! (Rote Stifte werden bei der Korrektur verwendet.)

Diese Prüfung lege ich ab als

☐ Pflichtfach
☐ Wahlfach
☐ Auflage

(Bitte EINES ankreuzen).

Maximal erreichbare Punktzahl:	**60**
Mindestprozentzahl für die Note 1,0:	**95%**
Mindestprozentzahl für die Note 4,0:	**50%**

Allgemeine Hinweise:

1) Für die Multiple-Choice und multiple-choice-ähnlichen Fragen gilt:
   i) Bei Aufgaben mit Einzelbewertung von Teilaufgaben gilt: Nur korrekte Teilantworten werden mit der vorgesehenen Teilpunktzahl bewertet.
   ii) Die in einer Teilaufgabe anfallenden Punkte werden aufsummiert.
   iii) Sofern nicht explizit anders dargestellt ist nur eine der angegebenen Lösungsoptionen korrekt.
   iv) Falls Teilaufgaben mehr als zwei Antwortoptionen beinhalten und nur eine Lösung existiert: Das Ankreuzen von mehreren Antwortoptionen wird auf Grund der nicht eindeutigen Willensäußerung als NICHTantwort interpretiert. Hieraus resultiert, dass in diesem Fall keine Punkte gegeben werden können.
2) Sollten im Einzelfall keine zulässigen Zahlenbereiche für Zeitkonstanten, Massen etc. angegeben sein, gehen Sie immer von positiven Zahlenwerten für die Zeit und für Massen aus.
3) Sollte im Einzelfall keine Angabe zu positiver oder negativer Rückführung angegeben sein, gehen Sie immer von der üblichen negativen Rückführung aus.

Aufgabe 1 (27 Punkte)

1a) (3 × 5 × 1 Punkt, 15 Punkte)
Markieren Sie in den folgenden Aussagen die richtige Lösung.

A1) (1 Punkt)
Bei der Laplacetransformation handelt es sich um eine spezielle Fouriertransformation. Neben der „Vorbehandlung des Signals" mit einem Dämpfungsterm $e^{-\delta t}$, so dass $\tilde{f}(t) = f(t)e^{-\delta t}$, führt die einseitige Transformation von $f(t)$ auf

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = \mathcal{F}_{spez}(j\omega) = \int\limits_{t=0}^{t=\infty} \tilde{f}(t)e^{-j\omega t}\,dt$$

welche als $\mathcal{L}\{f(t)\}$

- ○ im Moment t der Betrachtung
- ☒ als Beschreibung für das gesamte Signal
- ○ nach Abschluss der Ausführung der Integration (für das Ende der Integration)

zur Verfügung steht.

A2) (1 Punkt)
Das Signal $u(t) = 1(t-15) + 2\delta(t)$ lässt sich im Frequenzbereich durch

- ○ $u(s) = \frac{-15}{s}(e^{-s} + 2s)$
- ○ $u(s) = \frac{1}{s}(e^{-15s} + 2)$
- ☒ $u(s) = \frac{1}{s}(e^{-15s} + 2s)$

abbilden.

A3) (1 Punkt)
Übertragungsfunktionen sind Beschreibungsmittel

- ○ des Zeitbereiches.
- ☒ des Frequenzbereiches.
- ○ des Zeit-Frequenzbereiches.

A4) (1 Punkt)

Das Signal $y(s) = G(s)u(s)$ mit $G(s) = T_\mathrm{D}s+1$ und $u(s) = \frac{1}{s}$ beschreibt mit $y(s) = T_\mathrm{D}+\frac{1}{s}$ das Übergangsverhalten eines

- ○ PI-Systems.
- ☒ PD-Systems.
- ○ PID-Systems.

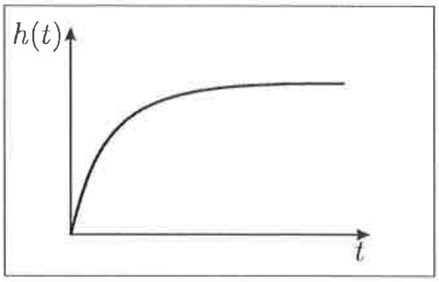
A5) (1 Punkt)

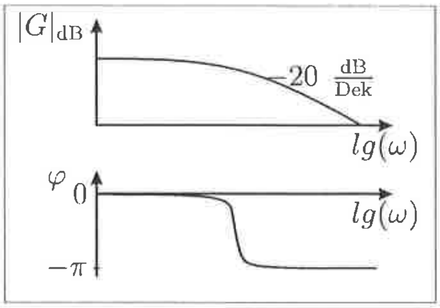
Die Wurzelortskurve beschreibt die Lage

- ○ der stabilen Pole in Abhängigkeit von der Verstärkung des Systems. Der Verlauf der instabilen Pole wird hierbei nicht beschrieben.
- ☒ aller Pole in Abhängigkeit von der Verstärkung des Systems. Der Verlauf der instabilen Pole wird hierbei auch beschrieben.
- ○ der instabilen Pole in Abhängigkeit von der Verstärkung des Systems. Der Verlauf der stabilen Pole wird hierbei nicht beschrieben.

B1) (1 Punkt)

Folgende Darstellungen beschreiben ein prinzipiell identisches Übertragungsverhalten:

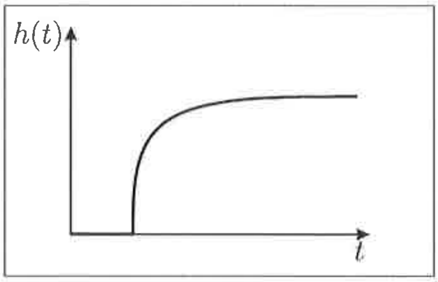


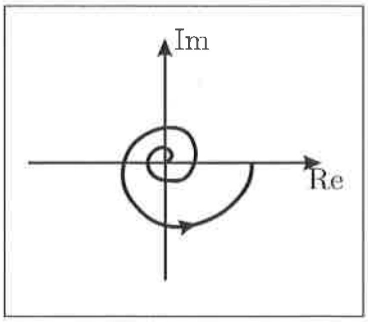


- ○ Nein, weil die Steigung keine $-20\ \frac{\text{dB}}{\text{Dek}}$ betragen muss.
- ⊗ Nein, weil die Phase für große Frequenzen mit $-\pi$ nicht korrekt ist.
- ○ Ja, weil alles korrekt ist und es sich um ein PT_1-System handelt.
- ○ Ja, weil alles korrekt ist und es sich um ein PT_2- System handelt.

B2) (1 Punkt)

Folgende Darstellungen beschreiben ein prinzipiell identisches Übertragungsverhalten:





- ○ Ja, weil das gezeigte Totzeitverhalten sich exakt mit der Ortskurve abbilden lässt.
- ○ Nein, weil es derartige Kringel als Ortskurve nicht gibt.
- ⊗ Nein, weil die angegebene Richtung (auf dem Kringel) nicht korrekt ist.
- ○ Nein, weil der gezeigte unendliche Phasenverzug nicht durch die gezeigte endliche Totzeit abgebildet werden kann.

B3) (1 Punkt)

Die Nyquistkurve beschreibt

- ○ in einer zum Bode-Diagramm ähnlichen Weise das frequenzabhängige Amplituden- (Verstärkungs-) und Phasenverhalten.
- ○ im Kontext des allgemeinen bzw. speziellen Nyquistkriterium das Stabilitätsverhalten eines offenen Regelkreises in Abhängigkeit von der Verstärkung K.
- ☒ im Kontext des allgemeinen bzw. speziellen Nyquistkriterium das Stabilitätsverhalten eines geschlossenen Regelkreis in Abhängigkeit von der Verstärkung K.

B4) (1 Punkt)

Für die Bestimmung der Übertragungsfunktion ist die Kenntnis der Anfangswerte für $f(t=0)$ bis $f^{(n-1)}(t=0)$ mit n als höchster Ausgangsableitungsordnung

- ☒ nicht notwendig.
- ○ notwendig.
- ○ in spezifischen Fällen notwendig.

B5) (1 Punkt)

Die Laplacetransformierte $y(s)$ des Systemverhaltens beschrieben durch $\dot{y}(t)+y(t)=1(t)$ ist für die beiden Fälle $\dot{y}(t=0)=0$ und $\dot{y}(t=0)=1$ mit $y(t=0)=0$

- ○ nicht identisch.
- ☒ identisch.
- ○ generell numerisch nicht bestimmbar.

☐

C1) (1 Punkt)
Anhand der

- ◯ Eigenvektororientierung
- ⊗ Eigenwertlage
- ◯ Eigenwerte nur in Kombination mit den Eigenvektoren

lässt sich die Zustandsstabilität eines linearen, zeitinvarianten Systems bewerten.

C2) (1 Punkt)
Ein geschlossener Regelkreis beschrieben durch die Übertragungsfunktion $G(s) = \frac{s+5}{s^2+2s+5}$ wird mit einer Führungsgröße $w(t) = 1(t)$ beaufschlagt. Das System ist für $t \to \infty$

- ⊗ stationär genau.
- ◯ nicht beschränkt.
- ◯ nicht stationär genau.

C3) (1 Punkt)
Das E/A-Verhalten eines PD-Reglers wird im Frequenzbereich durch

- ◯ $G(s) = KT_{\mathrm{D}}s$
- ◯ $G(s) = K[1 + \frac{1}{T_{\mathrm{I}}s}]$
- ⊗ $G(s) = K[1 + T_{\mathrm{D}}s]$

beschrieben.

C4) (1 Punkt)
Der Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzbereich ist gegeben durch

- ○ $G(s) = \mathcal{L}\{h(t)\}$.
- ☒ $G(s) = \mathcal{L}\{g(t)\}$.
- ○ $H(s) = \mathcal{L}\{g(t)\}$.

C5) (1 Punkt)
Für Anfangsbedingungen $\neq 0$ und ein beschränktes Eingangssignal $\neq 0$ liegt

- ☒ instabiles
- ○ grenzstabiles
- ○ asymptotisch stabiles

Systemverhalten vor, wenn ein exponentielles Ansteigen des Ausgangsverhaltens sichtbar wird.

1b) (3,5 Punkte)
Gegeben sei die Übertragungsfunktion einer Regelstrecke

$$G_S(s) = \frac{12(s+24)}{(s^2-4s+20)(s+3)s},$$

die mit einem Regler mit der Übertragungsfunktion

$$G_R(s) = \frac{K}{s+T_1}$$

mit $T_1 > 0$ in Gegenkopplung geregelt werden soll.

1b) i) (2,5 Punkte)
Bestimmen Sie die Pole und Nullstellen von Strecke und Regler.

Strecke:

Pole: $s_1 = 0$, $s_2 = -3$, $s_{3/4} = 2 \pm 4j$

Nullstellen: $s_n = -24$

Regler:

Pole: $s_1 = -T_1$

Nullstellen: /

1b) ii) (1 Punkt)
Weisen Strecke und Regler asymptotisch stabiles Verhalten auf? Begründen Sie jeweils (also 2 mal) Ihre Antwort.

Strecke:
Ist nicht asymptotisch stabil, weil
$Re\{2 \pm 4j\} > 0$.

Regler:
Ist asymptotisch stabil, weil $Re\{-T_1\} < 0$.

1c) (5 Punkte)
Nehmen Sie für die Führungsübertragungsfunktion

$$\tilde{G}_{\mathrm{W}}(s) = \frac{3K(s+1)}{s^4 + s^3 + (T_1 + K)s^2 + (T_1 - 2)s + K}$$

an.

1c) i) (3 Punkte)
Geben Sie das charakteristische Polynom der Führungsübertragungsfunktion für $T_1 = 4$ in Abhängigkeit von K an. Bestimmen Sie mit Hilfe des Hurwitz-Kriteriums für welche Werte von K der Regelkreis asymptotisch stabil ist.

Der geschlossene Regelkreis
ist für alle $K > 0$ asymptotisch stabil.

1c) ii) (2 Punkte)
Die Eingangsgröße des geschlossenen Regelkreises sei eine Sprungfunktion. Ist ein stationärer Endwert für die Regelgröße zu erwarten? Begründen Sie ihre Antwort mit einer mathematischen Berechnung. Nehmen Sie für K positive Werte an.

Für den geschlossenen Regelkreis ist für $t \to \infty$ der stationäre Endwert $y(t \to \infty) = 3$ zu erwarten.

1d) (3,5 Punkte)

Für die Übertragungsfunktion des offenen Kreises ergibt sich durch Systemmodifikation

$$\tilde{G}(s) = \frac{\tilde{K}(s-4)(s-3)(s+1)}{(s-a+j)(s-a-j)(s+5)(s+4)}.$$

1d) i) (1,5 Punkte)

Ist der offene Regelkreis für $a = 0$ asymptotisch stabil? Begründen Sie Ihre Antwort.

Nein der offene Regelkreis ist für $a=0$ nicht asymptotisch stabil, da $Re\{\pm j\} = 0$.

1d) ii) (2 Punkte)
Existiert ein K, für das der geschlossene Regelkreis mit $a = -5$ ein instabiles Verhalten aufweist? Begründen Sie Ihre Antwort.

Ja, es existiert ein K für $a = -5$, sodass der geschlossene Regelkreis instabil ist.

$\sum$

Aufgabe 2 (15 Punkte)

Das menschliche Verhalten für Reiz-Reaktionsinteraktionen wird mit

$$G_{\mathrm{R1}}(s) = \frac{V_{\mathrm{M}}(1 + T_{\mathrm{D}}s)}{(1 + T_{\mathrm{I}}s)} e^{-s(\tau_1 - T_{\mathrm{P}})}$$

angenommen. Das dynamische Verhalten des menschlich geregelten Systems wird mit

$$G_{\mathrm{S}}(s) = \frac{1}{(s + 10)(s + 4)}$$

angenommen.

2a) (2 Punkte)
Geben Sie für die energiefreien Systeme das E/A-Verhalten von $G_{\mathrm{R1}}(s) = \frac{u(s)}{e(s)}$ und $G_{\mathrm{S}}(s) = \frac{y(s)}{u(s)}$ in Normalform im Zeitbereich an.

Regler:

$$T_I \dot{u}(t) + u(t) = V_M \left(T_D \dot{e}(t - (\tau_1 - T_P)) + e(t - (\tau_1 - T_P))\right)$$

Strecke:

$$\frac{1}{40} \ddot{y}(t) + \frac{14}{40} \dot{y}(t) + y(t) = \frac{1}{40} u(t)$$

2b) (1 Punkt)
Bestimmen Sie unter Verwendung der Werte $V_M = 1000$, $T_D = 0,5$, $T_I = 10$, $\tau_1 = 1$ und $T_P = 0$ die Phase des Reglers $G_{R1}(j\omega)$ für $\omega = 0$ und $\omega = +\infty$.

$\omega = 0 \Rightarrow \varphi = 0^\circ$

$\omega = \infty \Rightarrow \varphi = -\infty^\circ$

2c) (6 Punkte)
Zeichnen Sie für die in Teilaufgabe 2b) gegebenen Werte von V_M, T_D, T_I, τ_1 und T_P quantitativ das Bode-Diagramm (realer und approximierter Verlauf) des offenen Regelkreises $G_{O1}(s)$ in die Abbildung 2.1 ein und kennzeichnen Sie alle Steigungen (dB/Dek.) im Amplitudengang sowie alle Eckfrequenzen. Hinweis: $20\lg(25) \approx 28$ dB.

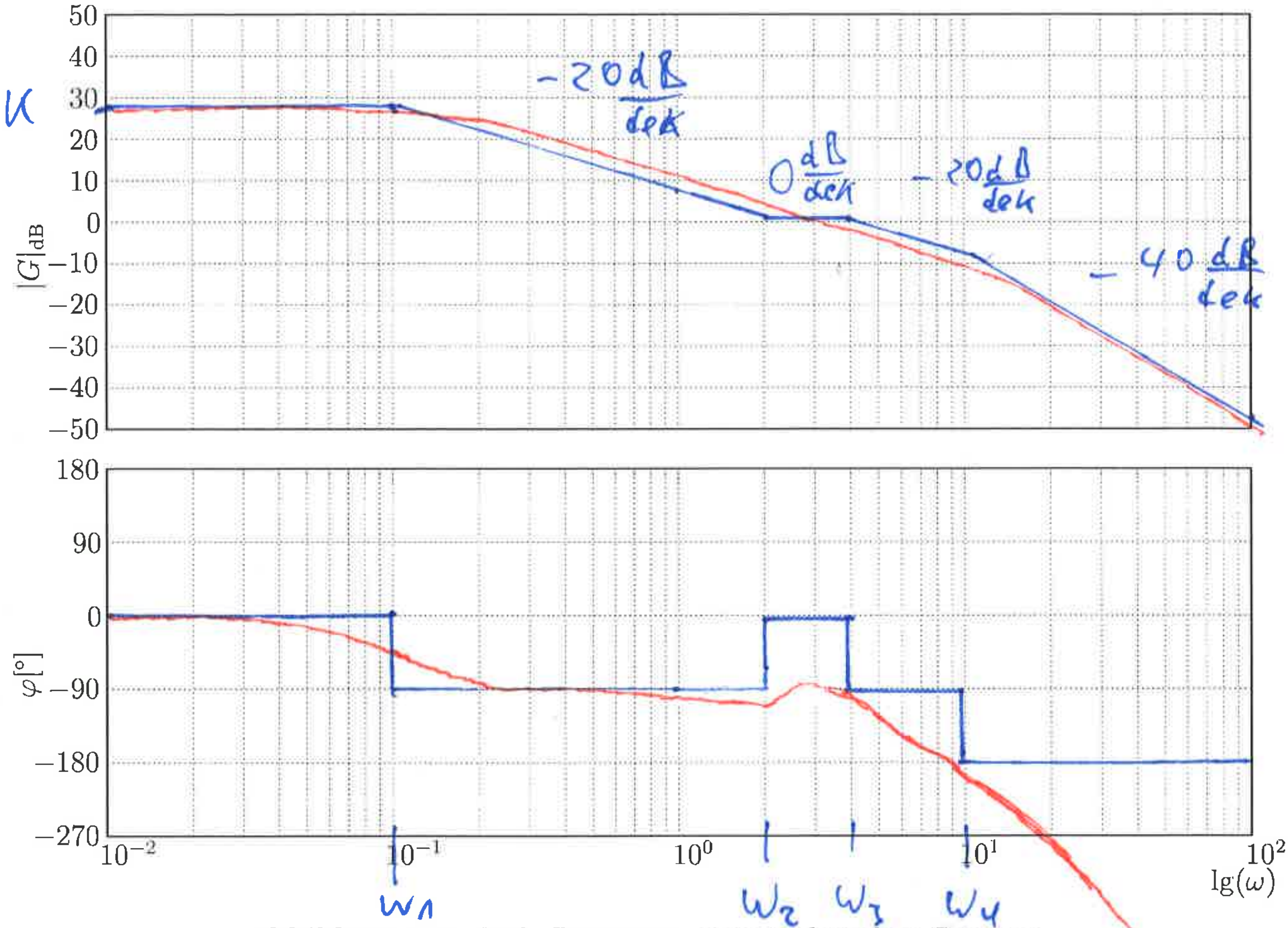
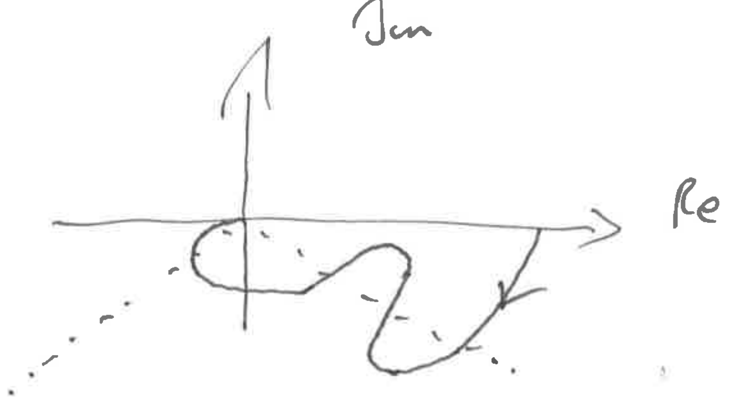
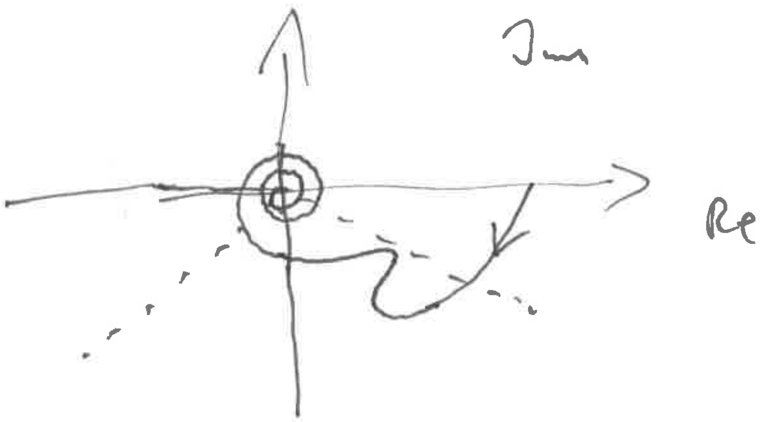


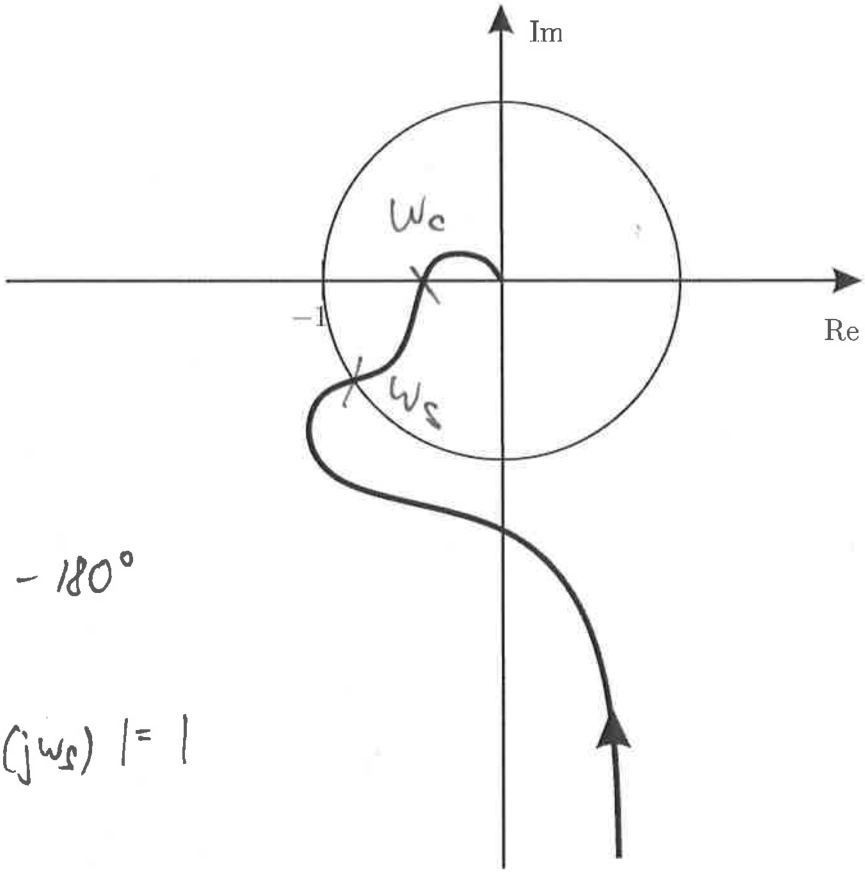
Abbildung 2.1: Bode-Diagramm eines technischen Systems

2d) (4 Punkte)
Zeichnen Sie die Ortskurve des in 2c) ermittelten offenen Regelkreises einmal ohne und einmal mit Totzeit.





2c) (2 Punkte)
Markieren Sie in eindeutiger Weise in der Abbildung 2.2 die Kenngrößen Amplitudendurchtrittsfrequenz ω_s und Phasendurchtrittsfrequenz ω_c. Geben Sie die zugehörigen mathematischen Definitionen an.



$\varphi(j\omega_c) = -180°$

$|G(j\omega_s)| = 1$

Abbildung 2.2: Ortskurve

Σ

Aufgabe 3 (18 Punkte)

Ein System mit der Übertragungsfunktion

$$G_S(s) = \frac{(s+6)}{(s+3)(s+4)}$$

wird mit einem Regler in Gegenkopplung mit der Übertragungsfunktion

$$G_R(s) = \frac{K(s+7)(s+1)}{s(s^2+6s+25)}$$

geregelt.

3a) (2 Punkte)
Der offene Regelkreis weist folgende Pol-/Nullstellenverteilung auf.

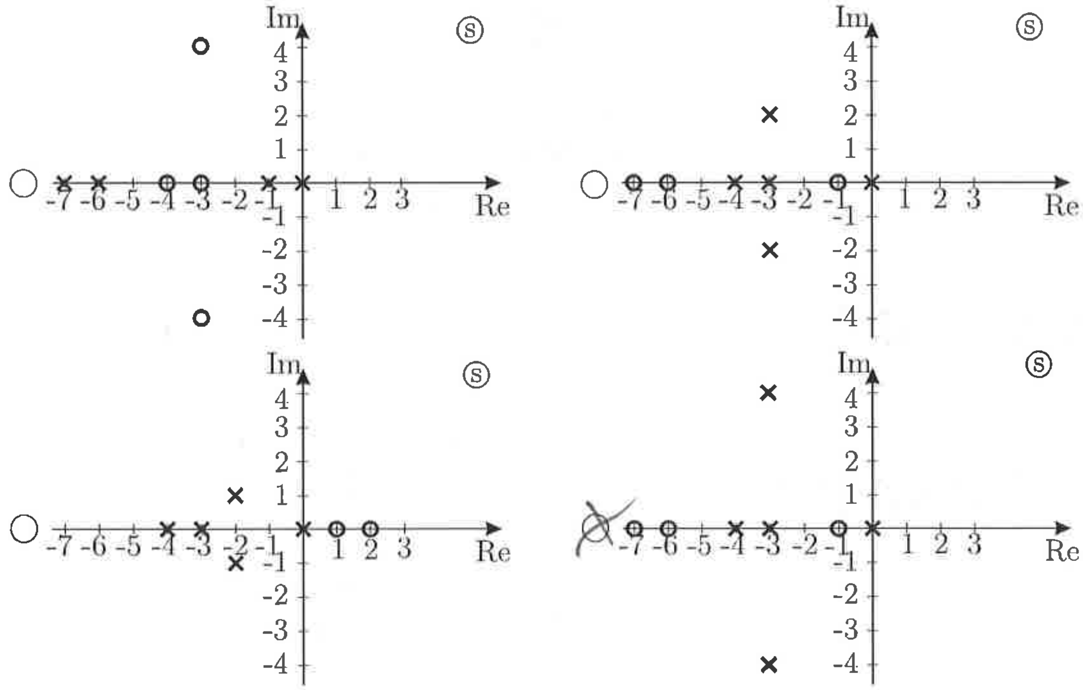


Abbildung 3.1: Pol-/Nullstellenverteilung

3b) (6 × 1 Punkt, 6 Punkte)
Markieren Sie in den folgenden Aussagen die richtige Lösung bezogen auf den gegebenen Regelkreis. (Nehmen Sie für den Wurzelschwerpunkt $\sigma_W = 0,5$ an.)

A1) (1 Punkt)
Das System weist immer Dämpfungswerte

- ○ $|D| > \frac{\sqrt{2}}{2}$
- ⊗ $|D| < \frac{\sqrt{2}}{2}$
- ○ $|D| = \frac{\sqrt{2}}{2}$

auf.

A2) (1 Punkt)
Der offene Regelkreis ist

- ○ instabil.
- ⊗ grenzstabil.
- ○ asymptotisch stabil.

A3) (1 Punkt)
Der geschlossene Regelkreis ist für die Verstärkung $K \to \infty$

- ⊗ instabil.
- ○ zustandsstabil.
- ○ E/A-stabil.

A4) (1 Punkt)
Durch eine Reglereinstellung lässt sich

- [x] ein instabiles wie auch ein asymptotisch stabiles
- [ ] kein instabiles
- [ ] kein asymptotisch stabiles

Verhalten einstellen.

A5) (1 Punkt)
Das geregelte System weist

- [x] einen
- [ ] keinen
- [ ] einen zweifelhaften

Polüberschuss auf.

A6) (1 Punkt)
Das Stabilitätsverhalten des geschlossenen Regelkreises lässt sich mit dem Verfahren der Wurzelortskurve beschreiben. Die kritischen Reglerverstärkungen K_{Krit} lassen sich

- [ ] direkt aus der Wurzelortskuve ablesen.
- [x] mithilfe abgelesener Werte aus der Wurzelortskurve numerisch bestimmen.
- [ ] ausschließlich numerisch bestimmen. Grafisch lässt sich nur eine prinzipielle Aussage zur Machbarkeit treffen.

3c) (2 × 5 × 1 Punkt, 10 Punkte)
Gegeben ist die in Abbildung 3.2 dargestellte Wurzelortskurve.

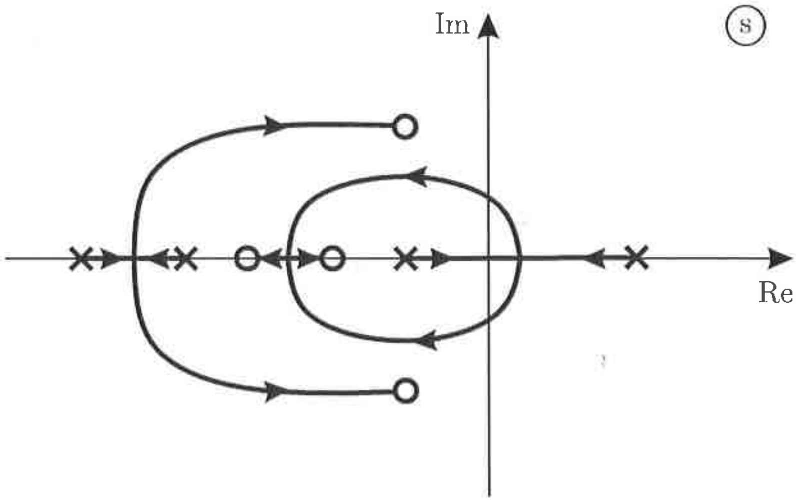


Abbildung 3.2: Wurzelortskurve

Markieren Sie in den folgenden Aussagen die richtige Lösung.

A1) (1 Punkt)
Der offene Regelkreis ist

- ⊗ instabil.
- ○ grenzstabil.
- ○ asymptotisch stabil.

A2) (1 Punkt)
Der geschlossene Regelkreis ist für kleine K

- ⊗ instabil.
- ○ grenzstabil.
- ○ asymptotisch stabil.

A3) (1 Punkt)
Der geschlossene Regelkreis kann

- [x] mit Sicherheit stabilisiert werden.
- [ ] niemals stabilisiert werden.
- [ ] nur unter bestimmenten Umständen der Streckenmodifikation stabilisiert werden.

A4) (1 Punkt)
Es liegt

- [ ] ein Polüberschuss
- [ ] ein Nullstellenüberschuss
- [ ] ein Blattschuss
- [x] kein Polüberschuss

vor.

A5) (1 Punkt)
Die Zeichnung ist korrekt, wenn

- [ ] an einem Wurzelverlauf die Laufrichtung anders eingezeichnet wird.
- [x] sie so bleibt wie sie ist.
- [ ] die Pfeilrichtung zu den Nullstellen vertauscht wird.

B1) (1 Punkt)
Für sehr große Verstärkungen ist der geschlossene Regelkreis

- ○ instabil.
- ○ grenzstabil.
- ☒ asymptotisch stabil.

B2) (1 Punkt)
Für große K weisen alle Zweige der Wurzelortskurve

- ○ eine Dämpfung größer 1 auf.
- ○ eine unendliche Dämpfung auf.
- ☒ unterschiedliche Dämpfungen auf.

B3) (1 Punkt)
Die grafische Bestimmung kritischer Verstärkungen für den geschlossenen Regelkreis mit der Amplitutenbedingung würde für asymptotisch stabiles Verhalten ergeben:

- ☒ $K > K_{\text{krit1}}$.
- ○ $K < K_{\text{krit1}}$.
- ○ $K_{\text{krit1}} < K < K_{\text{krit2}}$.

B4) (1 Punkt)
Der offene Regelkreis weist eine

- [x] identische
- [ ] unterschiedliche
- [ ] kritische

Zahl von Polen und Nullstellen auf.

B5) (1 Punkt)
Der geschlossene Regelkreis hat

- [x] 4 Pole.
- [ ] 8 Pole.
- [ ] keine Pole, alle sind im Unendlichen verschwunden.

$\sum$