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

24. Juli 2014

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 und Unterlagen 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	
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 zurück gegeben habe. Die Abgabe meiner Arbeit wurde in der Teilnehmerliste von Aufsichtsführenden schriftlich vermerkt.

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	
Gesamtpunktzahl	
Angepasste Punktzahl	
%	
Bewertung gem. PO in Ziffern	

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

(Datum und Unterschrift 2. Prüfer, Prof. Dr.-Ing. Yan Liu)

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

Fachnote gemäß Prüfungsordnung:

☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
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:	**80**
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) Korrekte Teilantworten werden mit der vorgesehenen Teilpunktzahl bewertet.
    ii) Nichtkorrekte Teilantworten werden mit der vorgesehenen Teilpunktzahl negativ bewertet.
    iii) Keine Willensäußerung führt weder zu einer negativen noch zu einer positiven Anrechnung.
    iv) Die in einer Aufgabe anfallenden positiven wie negativen Punkte werden aufsummiert. Eine negative Gesamtpunktzahl gibt es nicht.

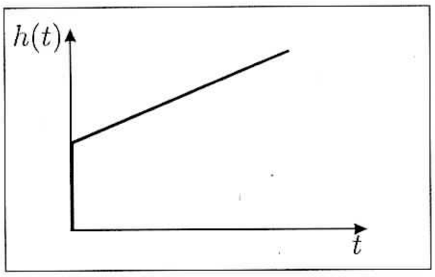
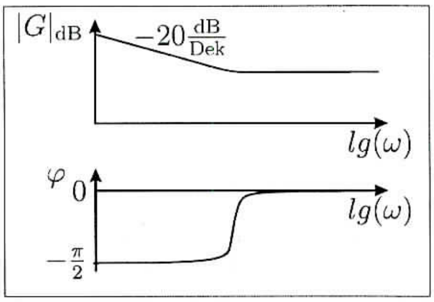
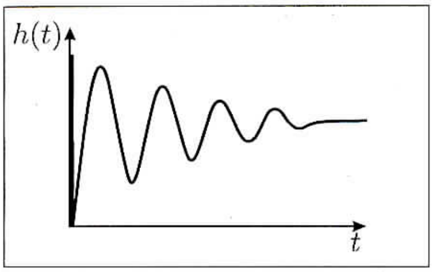
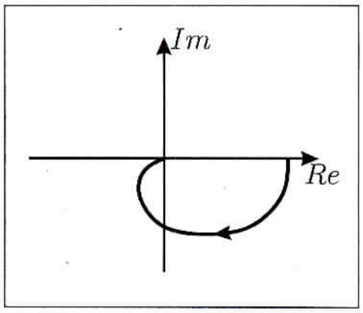
2) Sollten im Einzelfall keine zulässigen Zahlenbereiche für Zeitkonstanten, Massen etc. angegeben sein, gehen Sie immer von positiven Zahlenwerten für die Zeit und für Massen aus.

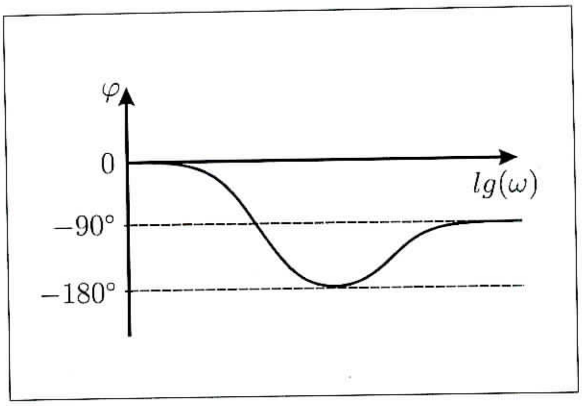
3) Sollte im Einzelfall keine Angabe zu positiver oder negativer Rückführung angegeben sein, gehen Sie immer von der üblichen negativen Rückführung aus.

Aufgabe 1 (36 Punkte)

1a) (3 × 5 × 1 Punkt, 15 Punkte)
Welche der folgenden Aussagen sind wahr und welche sind falsch? (Alle zugrundeliegenden Zusammenhänge werden im Rahmen der Veranstaltung Regelungstechnik vermittelt.)

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
A.1)	Zeitvariante Vorgänge lassen sich nur im Frequenzbereich genau beschreiben.	○	⊗
A.2)	Mit Hilfe des Anfangs- und Endwertsatzes der Laplacetransformation lassen sich die Grenzwerte der Phasenverschiebung im Zeitbereich für $s \to 0$ bzw. $s \to \infty$ bestimmen.	○	⊗
A.3)	Zustandsraummodelle sind Beschreibungsmittel ausschließlich für den Zeitbereich.	○	⊗
A.4)	Die allgemeine Berechnungsvorschrift der Laplacetransformation für eine Funktion $f(t)$ ist $\mathcal{L}\{f(t)\} = \int\limits_0^\infty f(t)e^{-st}\,dt$ mit $s \in \mathbb{C}$.	⊗	○
A.5)	Das Signal $u(t) = 2 \cdot 1(t-3) + \delta(t) + e^{-5t} \cdot 1(t)$ lässt sich im Frequenzbereich durch $u(s) = \frac{2}{s} \cdot e^{-3s} + 1 + \frac{1}{s+5}$ abbilden.	⊗	○

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
B.1)	Folgende Darstellungen beschreiben ein prinzipiell identisches Übertragungsverhalten:  	☒	○
B.2)	Folgende Darstellungen beschreiben ein prinzipiell identisches Übertragungsverhalten:  	○	☒
B.3)	Das System mit der Übertragungsfunktion $G(s) = \dfrac{3s+1}{(s^2+2s+1)(s+1)}$ lässt sich im Zeitbereich durch $\dddot{y} + 3\ddot{y} + 3\dot{y} + y = 3\dot{u} + u$ beschreiben.	☒	○
B.4)	Der Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzbereich ist durch $h(t) = \mathcal{L}\{H(s)\}$ gegeben.	○	☒
B.5)	Verzögerungen des Übertragungsverhaltens von Systemen werden im Frequenzbereich durch Nullstellen und gleichbedeutend im Zeitbereich durch Ableitungen höherer Ordnung der Eingangsvariablen beschrieben.	○	☒

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
C.1)	Ein System mit der Übertragungsfunktion $G(s) = \frac{K(s+2)}{s^2+2s+1}$ kann folgenden Phasengang aufweisen: 	☒	○
C.2)	Anhand der Pollage lässt sich die Zustandsstabilität eines linearen, zeitinvarianten SISO-Systems bewerten.	○	☒
C.3)	Die Pole eines Systems sind immer auch Eigenwerte des Systems.	☒	○
C.4)	Das Anregen mit bestimmten Frequenzen führt bei einem System mit einem konjugiert komplexen Polpaar immer zu einer Resonanz.	○	☒
C.5)	Für ein stabiles Verhalten eines Systems gilt: Der Phasengang muss für $\omega \to \infty$ größer 0° sein.	○	☒

1b) (16 Punkte)
Ein technisches System wird durch das in Abbildung 1.1 dargestellte Blockschaltbild beschrieben.

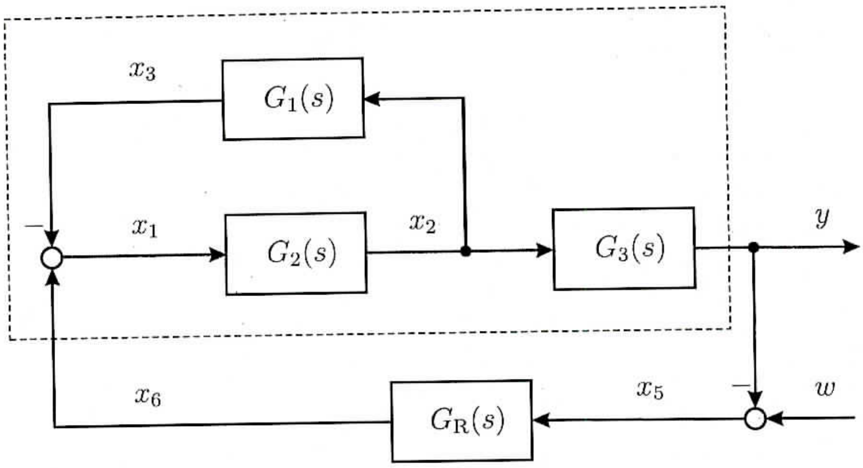


Abbildung 1.1: Blockschaltbild eines technischen Systems

Die Elemente werden durch die Übertragungsfunktionen

$$G_1(s) = \frac{1}{2},$$
$$G_2(s) = 1 + s,$$
$$G_3(s) = \frac{1}{s^2 + s + 1} \text{ und}$$
$$G_R(s) = \frac{1}{s}.$$

beschrieben.

i) (6 Punkte)

Stellen Sie die Übertragungsfunktion der Regelstrecke $G_S(s) = \frac{y(s)}{x_6(s)}$ auf und klassifizieren Sie das Übertragungsverhalten.

$$y = G_3 \cdot x_2$$

$$x_2 = G_2 x_1$$

$$x_1 = x_6 - x_3$$

$$x_3 = G_1 x_2$$

$$x_2 = \frac{1}{G_3} y$$

$$y = G_3 \left(G_2 \left(x_6 - G_1 \cdot \frac{1}{G_3} y \right) \right)$$

$$y = G_3 \cdot G_2 x_6 - G_2 G_1 \cdot y$$

$$\frac{y}{x_6} = \frac{G_3 \cdot G_2}{1 + G_2 G_1}$$

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

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

$$\Rightarrow PDT_3$$

Nehmen Sie für die Aufgabenteile ii) und iii) für die Führungsübertragungsfunktion des Regelkreises

$$G_W(s) = \frac{K_P(\tilde{T} + s)}{5s^3 + 10s^2 + 3s + 1 + K_P}$$

mit K_P, $\tilde{T} > 0$ an.

ii) (5 Punkte)
Bestimmen Sie unter Zuhilfenahme des Hurwitzkriteriums den zulässigen Wertebereich der Reglerverstärkung K_P, für den der geschlossene Regelkreis asymptotisch stabil ist.

$p(s) = 5s^3 + 10s^2 + 3s + 1 + K_p$

$a_3 = 5 > 0$

$a_2 = 10 > 0$

$a_1 = 3 > 0$

$a_0 = 1 + K_p > 0 \Rightarrow K_p > -1$

alle $a_i > 0$

$$H = \begin{bmatrix} 10 & 1+K_p & 0 \\ 5 & 3 & 0 \\ 0 & 10 & 1+K_p \end{bmatrix}$$

$D_2 = 30 - 5 - 5K_p > 0$

$-5K_p > -25$

$K_p < 5$

für $0 < K_p < 5$ asymptotisch stabil

iii) (5 Punkte)
Beurteilen Sie, ob der gegebene Regler mit den Parametern $K_P = 1$ und $\tilde{T} = 2$ zur stationär genauen Regelung geeignet ist. Berechnen Sie hierzu zunächst den stationären Endwert für die Führungsgröße $w(t) = 1(t)$.

$$y(t \to \infty) = \lim_{s \to 0} s \cdot W(s) \cdot G_W(s)$$

$$= \lim_{s \to 0} \cancel{s} \cdot \frac{1}{\cancel{s}} \cdot \frac{s+2}{5s^3 + 10s^2 + 3s + 2}$$

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

$w(t \to \infty) = 1$ und $y(t \to \infty) = 1$

$e(t \to \infty) = w(t \to \infty) - y(t \to \infty) = 0$

=> keine bleibende Regelabweichung

=> stationär genaue Regelung

=> Ja, Regler ist geeignet.

1c) (1 × 5 × 1 Punkt, 5 Punkte)
Ein System mit der Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{K(s+1)}{s^2+s+1} \text{ mit } K > 0$$

soll durch einen P-Regler mit dem Verstärkungsfaktor K_R in Gegenkopplung geregelt werden. Bewerten Sie die Aussagen in der folgenden Tabelle.

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
1)	Das geregelte System weist einen stationären Endwert für das Führungsverhalten von $y(t \to \infty) = \frac{1}{1+KK_\mathrm{R}}$ mit dem Eingangssignal $w(t) = 1(t)$ auf.	○	X
2)	Für $KK_\mathrm{R} \to \infty$ ist die bleibende Regelabweichung $e(t \to \infty) = \infty$ mit dem Eingangssignal $w(t) = 1(t)$.	○	X
3)	Für eine Reglerverstärkung von $K_\mathrm{R} > -\frac{1}{K}$ ist der geschlossene Regelkreis asymptotisch stabil.	X	○
4)	Mit dem Reglerparameter K_R lässt sich das Schwingungsverhalten des geschlossenen Regelkreises beeinflussen.	X	○
5)	Angenommen die Parameter $K = 5$ und $K_\mathrm{R} = 5$ sind gegeben. Das geregelte System weist einen konjugiert komplexen Pol auf.	○	X

Σ

Aufgabe 2 (29 Punkte)

2a) (1 × 3 × 1 Punkt, 3 Punkte)
Beurteilen Sie die Aussagen in der nachstehenden Tabelle.

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
1)	In einer Reihenschaltung mit anderen Übertragungselementen führt ein Totzeitglied zu einer Ortskurve, die den Ursprung der komplexen Ebene häufig umrundet.	☒	○
2)	Ein System mit proportionalem Verhalten soll mit dem Ziel einer möglichst schnellen Reaktion geregelt werden. Für dieses Ziel kann beispielsweise problemlos ein differentieller Anteil in die Rückführung integriert werden.	☒	○
3)	Minimalphasensysteme sind Systeme, die keine Totzeit sowie ausschließlich Pole und Nullstellen mit nichtnegativem Realteil haben.	○	☒

2b) (16 Punkte)
Die Übertragungsfunktion einer Regelstrecke wird durch

$$G_S(s) = \frac{K_{\text{Strecke}}(T_{D_1}s+1)}{\frac{1}{\omega_0^2}s^2 + \frac{2D}{\omega_0}s + 1}$$

mit $K_{\text{Strecke}} = 20$, $T_{D_1} = \frac{1}{6}$, $\omega_0 = 3$ und $D = \frac{1}{3}$ beschrieben. Zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens ist ein Regler mit der Übertragungsfunktion

$$G_R(s) = \frac{K_R(T_{D_2}s+1)\cdot e^{-T_t s}}{T_1 s + 1}$$

mit $T_{D_2} = 1$, $T_1 = \frac{1}{5}$ und $T_t = 0.1$ in Gegenkopplung vorgesehen.

i) (2 Punkte)
Welche Pole und Nullstellen weist die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises auf?

$$G_0(s) = \frac{20(\frac{1}{6}s+1)\cdot K_R(s+1)\cdot e^{-0{,}1s}}{(\frac{1}{3^2}s^2 + \frac{2\cdot\frac{1}{3}}{3}s+1)(\frac{1}{5}s+1)}$$

$$G_0(s) = \frac{20K_R(\frac{1}{6}s+1)(s+1)e^{-0{,}1s}}{(\frac{1}{9}s^2 + \frac{2}{9}s+1)(\frac{1}{5}s+1)}$$

Pole: $s^2 + 2s + 9 = 0$

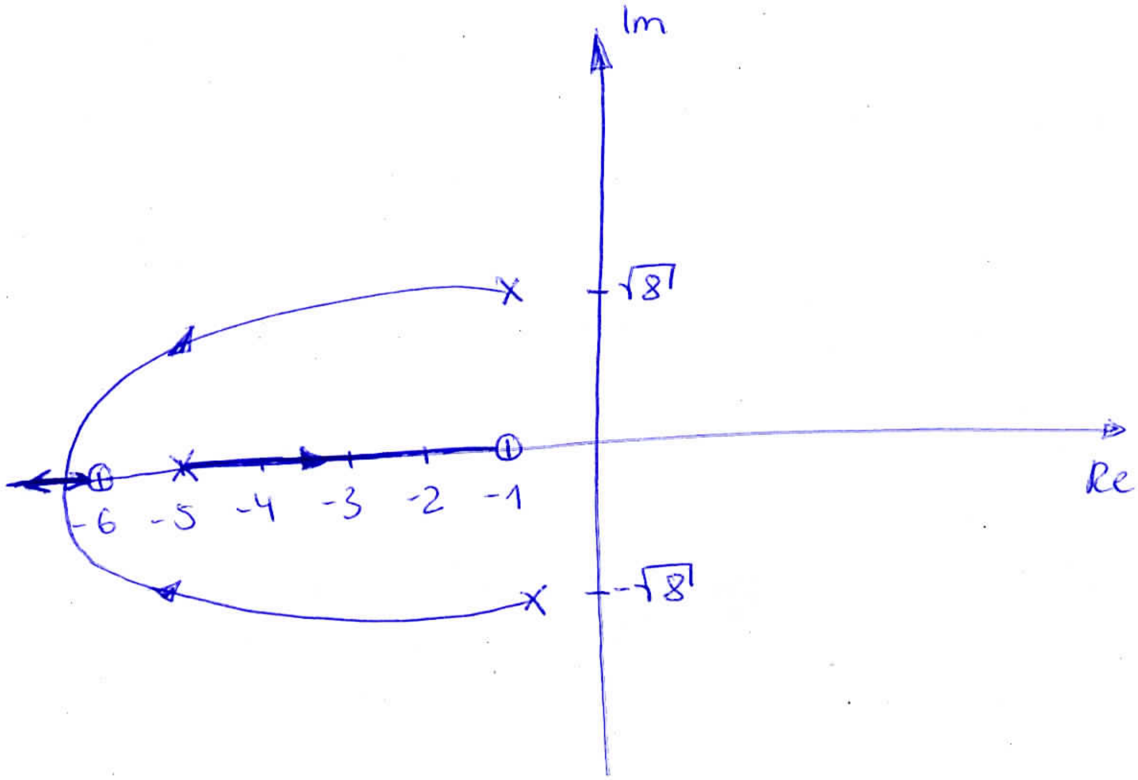
$$s_{1/2} = -1 \pm \sqrt{1-9}$$
$$= -1 \pm \sqrt{8}\,j$$

$$s_3 = -5$$

Nullstellen: $s_{01} = -6$

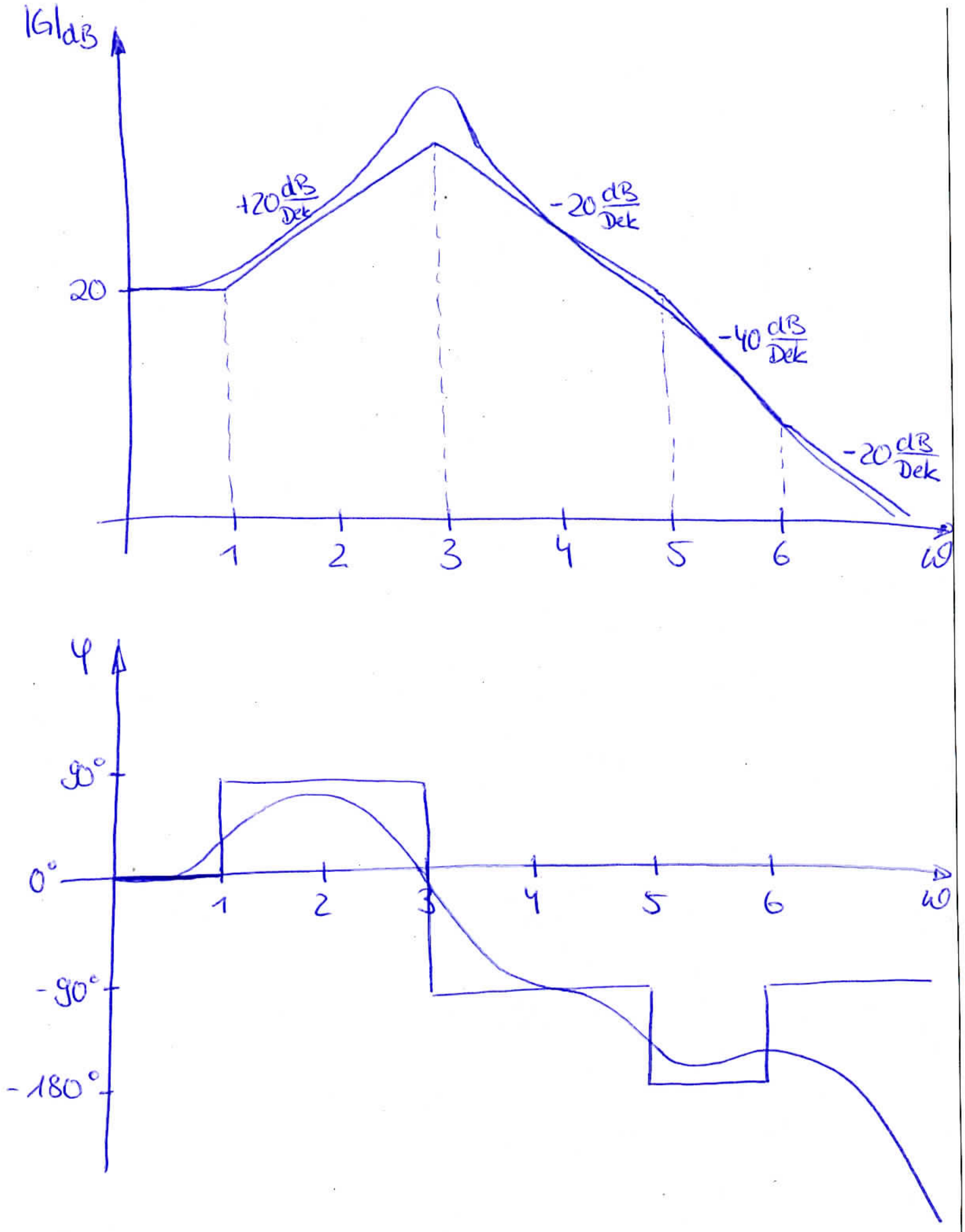
$$s_{02} = -1$$

ii) (4 Punkte)
Beurteilen Sie die Stabilität des geschlossenen Regelkreises in Abhängigkeit von K mit Hilfe einer Wurzelortskurve.

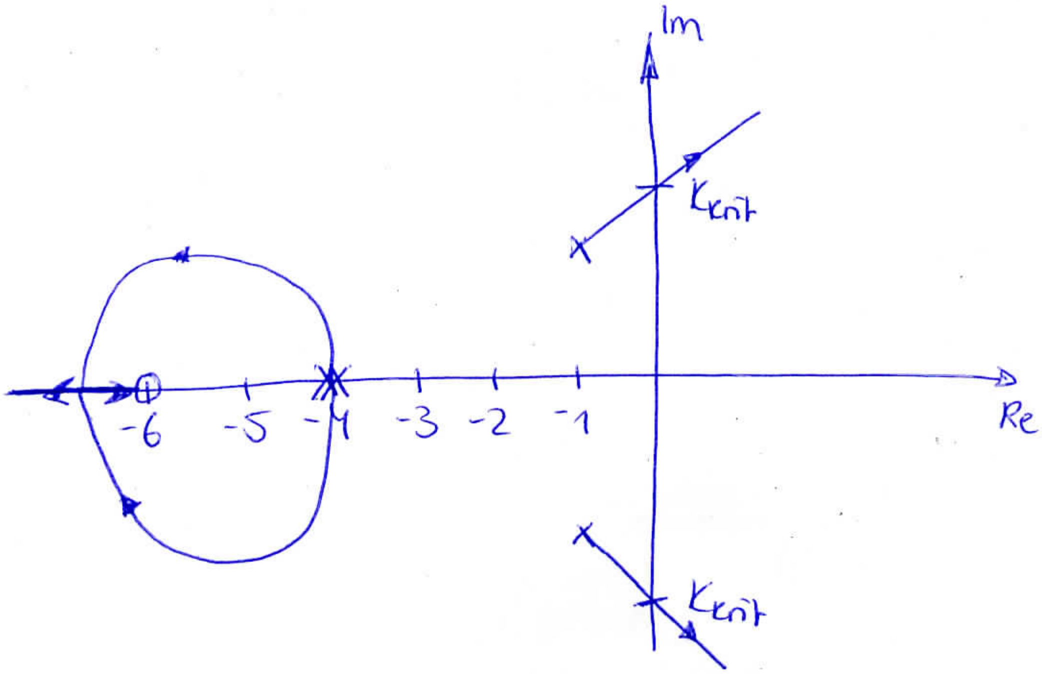


Für alle K >0 asymptotisch stabil.

iii) (6 Punkte)
Bestimmen Sie qualitativ das Bode-Diagramm (realer und approximierter Verlauf) des offenen Systems für $K_R = 0,5$ (Hinweis: $\log_{10}(10) = 1$).



iv) (4 Punkte)
Der gegebene Regler wird durch den Menschen ersetzt, dessen Verhalten sich mit einem PT_2-Element beschreiben lässt. Dieses Element hat einen doppelten reellen Pol mit negativem Realteil. Beurteilen Sie die Stabilität des geschlossenen Regelkreises mit dem Menschen als Regler in Abhängigkeit von K.



Für $0 < K < K_{krit}$: asymptotisch stabil,

für $K = K_{krit}$: grenzstabil,

für $K > K_{krit}$: instabil.

2c) (2 × 5 × 1 Punkt, 10 Punkte)
Die Messung des Übertragungsverhaltens eines technischen Systems ist in Abbildung 2.1 als Bode-Diagramm dargestellt. Das System wird mit einem P-Regler ($K_R = 1$) in Gegenkopplung geregelt.

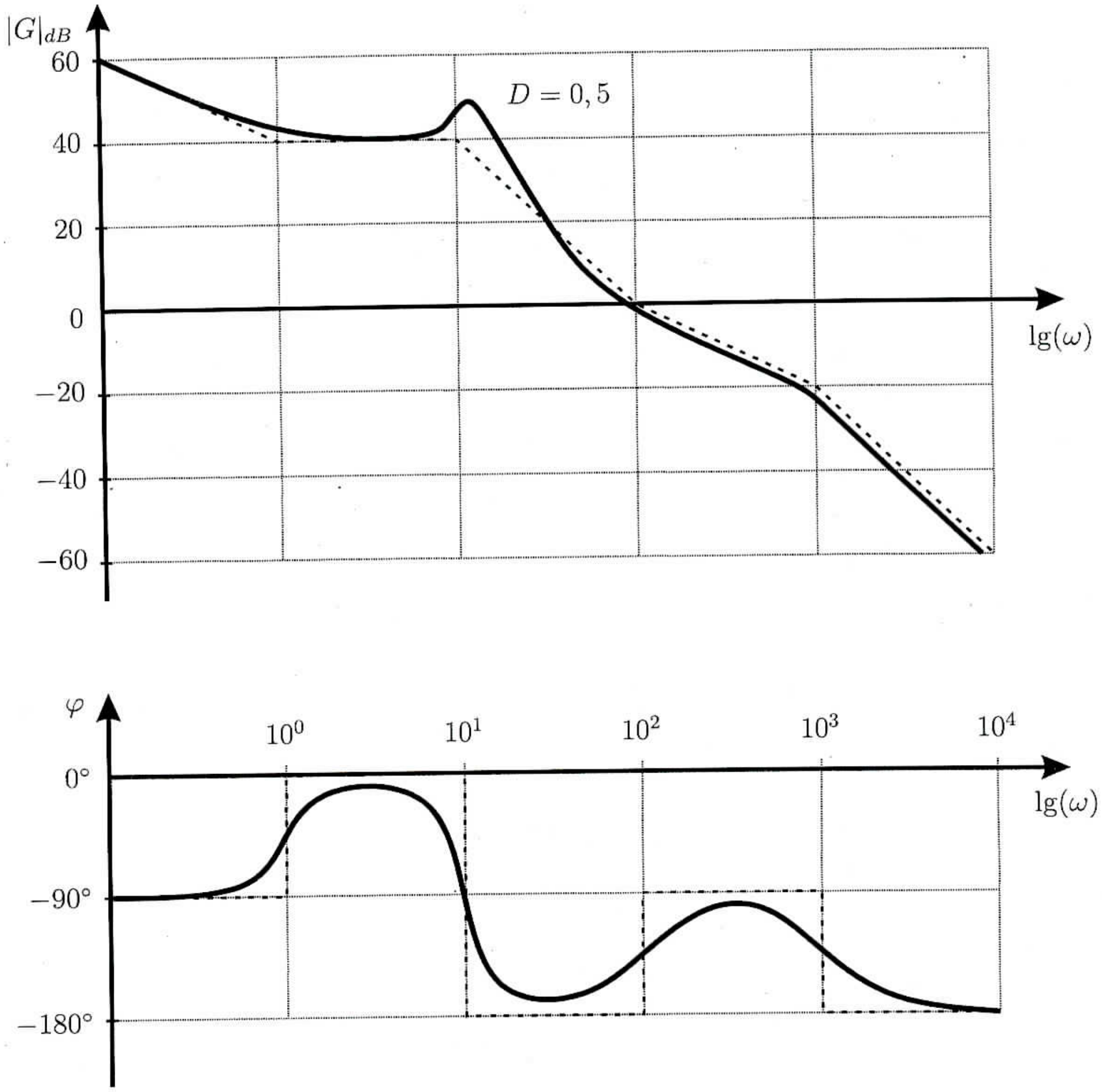
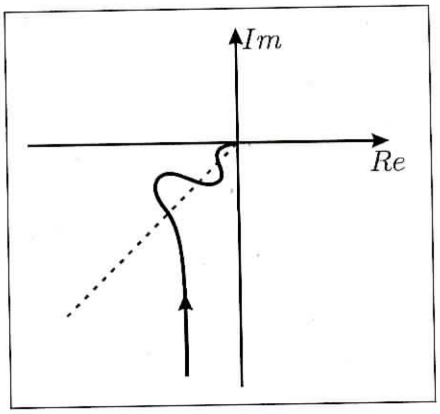


Abbildung 2.1: Bode-Diagramm eines technischen Systems

Bewerten Sie die Aussagen in den nachstehenden Tabellen.

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
A.1)	Es handelt sich um ein integrales System.	⊗	○
A.2)	Es handelt sich um ein nichtlineares System.	○	⊗
A.3)	Der Phasenrand bei der Amplitudendurchdrittsfrequenz ω_S des Systems ist größer als 45°.	○	⊗
A.4)	Der geschlossene Regelkreis ist stabil.	⊗	○
A.5)	Die Ortskurve des Systems endet für $\omega \to \infty$ im Ursprung der s-Ebene.	⊗	○

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
B.1)	Die Übergangsfunktion des Systems hat eine Totzeit von $T_t = 0,1$ sec.	○	⊗
B.2)	Es handelt sich um ein minimalphasiges System.	⊗	○
B.3)	Die Pole des Systems sind $s_{1/2} = -5 \pm \sqrt{75}j$ und $s_3 = -1000$.	○	⊗
B.4)	Die Nullstellen des Systems sind $s_{01} = -1$ und $s_{02} = -100$.	⊗	○
B.5)	Der offene Regelkreis kann die folgende Ortskurve aufweisen. 	○	⊗

$\sum$

Aufgabe 3 (15 Punkte)

3a) (7 Punkte)
Ein System mit der Übertragungsfunktion

$$G_\mathrm{S}(s) = \frac{s+3}{s^2 - 3s + 2}$$

wird mit einem Regler in Gegenkopplung mit der Übertragungsfunktion

$$G_\mathrm{R}(s) = \frac{s}{s^2 + 4s + 5}$$

geregelt.

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

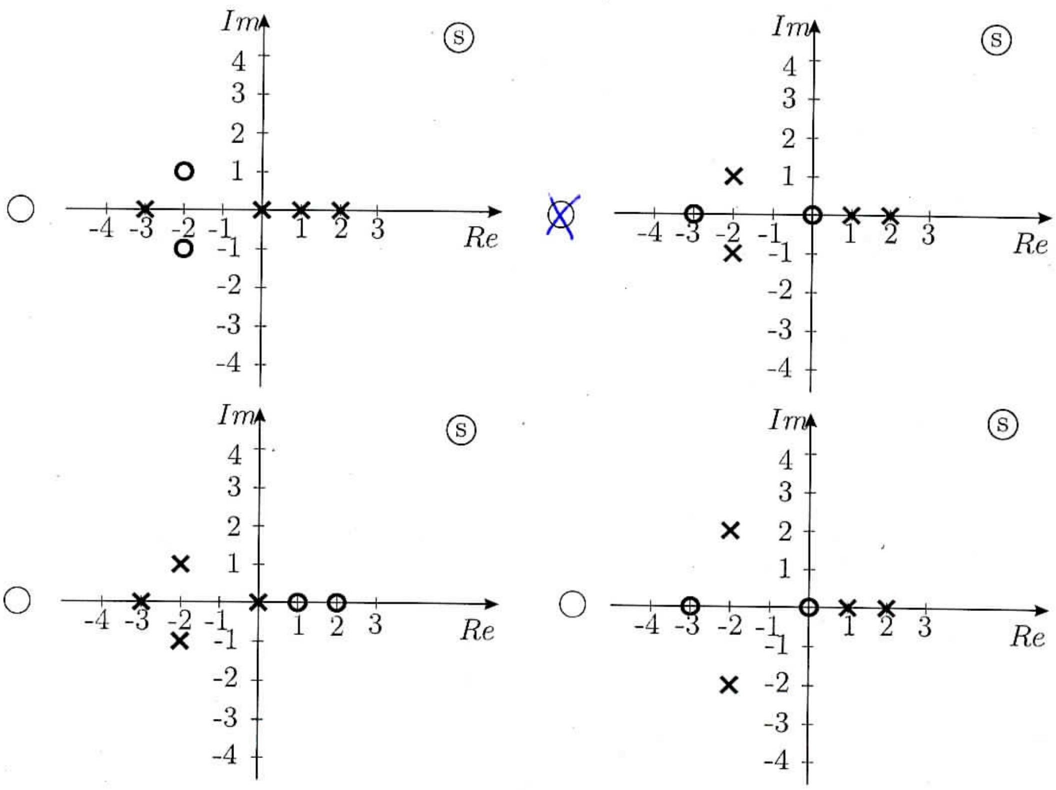


Abbildung 3.1: Pol-/Nullstellenverteilung

ii) (1 × 5 × 1 Punkt, 5 Punkte)
Bewerten Sie die Aussagen in der nachstehenden Tabelle bezogen auf den gegebenen Regelkreis. (Nehmen Sie für den Wurzelschwerpunkt $\sigma_W = -2$ an.)

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
1)	Das ungeregelte System ist schwingungsfähig.	○	⊗
2)	Der offene Regelkreis ist grenzstabil.	○	⊗
3)	Der geschlossene Regelkreis ist für die Verstärkung $K \to \infty$ grenzstabil.	⊗	○
4)	Durch eine geeignete Reglereinstellung lässt sich ein asymptotisch stabiles Verhalten einstellen.	⊗	○
5)	Durch eine geeignete Reglereinstellung lässt sich ein schwingungsfreies Verhalten einstellen.	○	⊗

3b) (1 × 5 × 1 Punkt, 5 Punkte)
Ein System mit der in Abbildung 3.2 dargestellten Pol-/Nullstellenverteilung wird mit einem Regler mit P-Verhalten und einer Reglerverstärkung K_R in Gegenkopplung geregelt.

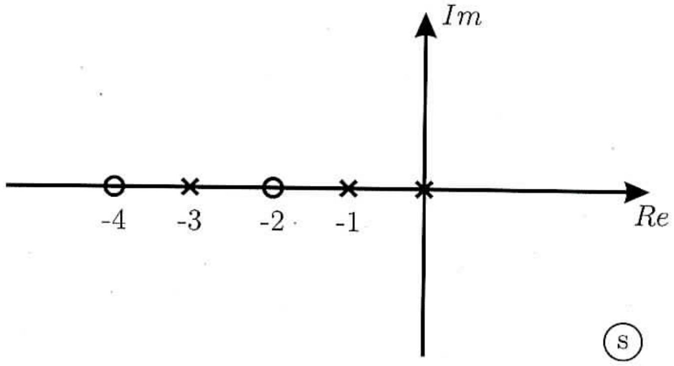


Abbildung 3.2: Pol-/Nullstellenverteilung

Bewerten Sie die Aussagen in der nachstehenden Tabelle.

Nr.	Aufgabe/Frage/Bewertung	Richtig	Falsch
1)	Der geschlossene Regelkreis ist für alle Verstärkungen $K > 0$ asymptotisch stabil.	⊗	○
2)	Die Dämpfungskonstante ist $D < 1$ für alle Reglerverstärkungen.	○	⊗
3)	Das Hinzufügen einer Nullstelle bei $s_n = -5$ ändert die Stabilitätseigenschaften des geschlossenen Regelkreises grundsätzlich.	○	⊗
4)	Anstelle der in 3b)3) hinzugefügten Nullstelle wird ein konjugiert komplexer Pol bei $s_{4/5} = -5 \pm \sqrt{3}j$ hinzugefügt. Das Gesamtsystemverhalten des geschlossenen Regelkreises verändert sich dadurch grundsätzlich.	⊗	○
5)	Der P-Regler wird durch einen PDT_1-Regler ersetzt, der eine Nullstelle $s_n = -6$ und einen instabilen Pol s_i aufweist. Der geschlossene Regelkreis ist für alle Reglerverstärkungen instabil.	○	⊗

3c) (3 Punkte)
Die Messung des Übetragungsverhaltens eines offenen Regelkreises ergibt das in Abbildung 3.3 dargestellte Bode-Diagramm.

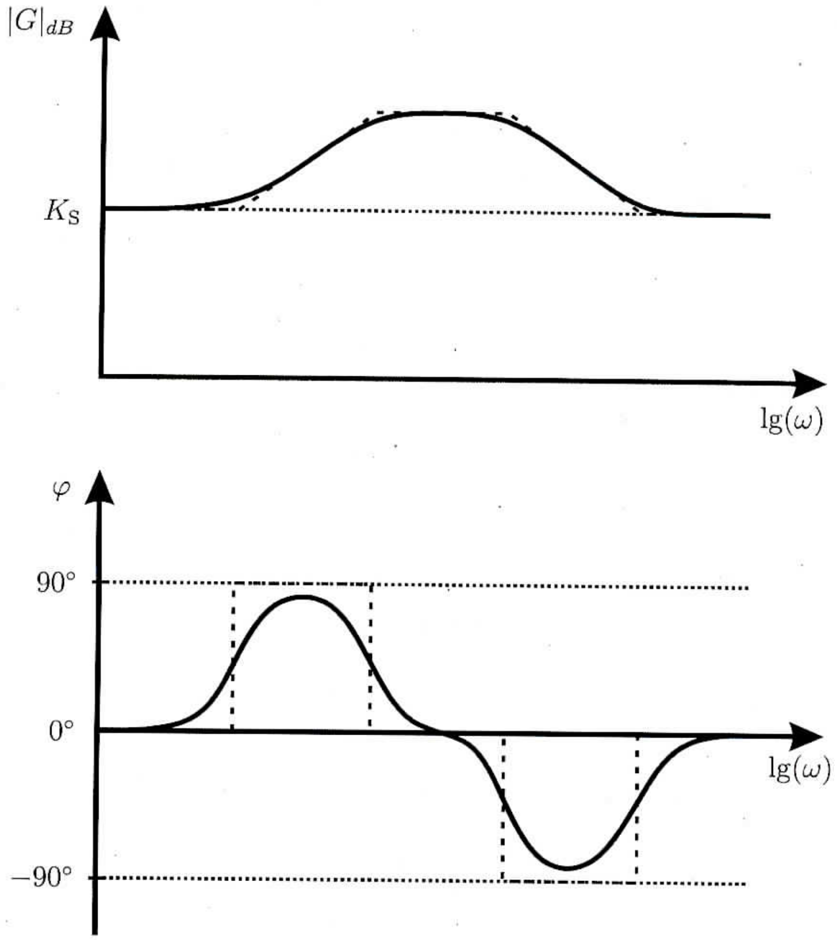
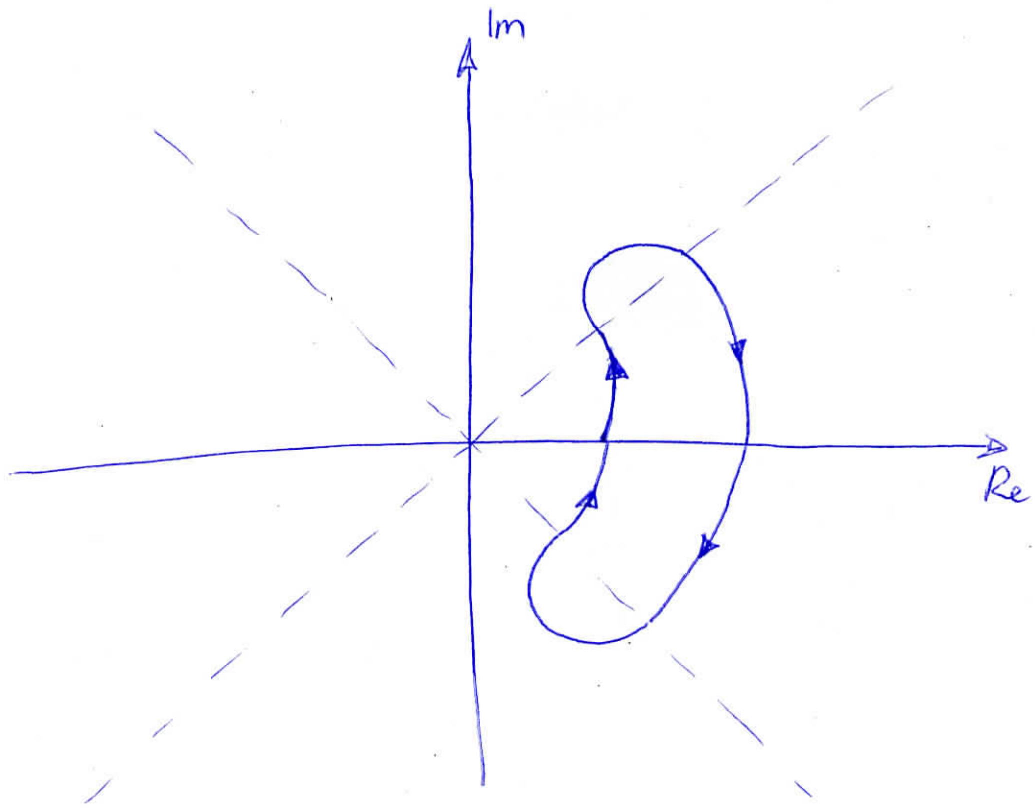


Abbildung 3.3: Bode-Diagramm

Zeichnen Sie qualitativ die Ortskurve des offenen Regelkreises.



$\sum$