NAME: MATRIKELNUMMER:

Technische Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Regelungstechnik und Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Pandit

06. April 2004

DIPLOMHAUPTPRÜFUNG IM FACH REGELUNGSTECHNIK I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder **nicht**programmier**barer** Taschenrechner, Schreib- und Zeichenmaterial. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke, lose Blätter oder programmierbare Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, halblogarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier, Blatt mit Fachbegriffen deutsch-englisch (bei Bedarf).

Bitte beachten:

1. Schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer, insbesondere auf Millimeter- und halblogarithmisches Papier.
2. Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluss an die Aufgabenstellungen auf die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).
3. Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern können nur dann berücksichtigt werden, wenn Verweise hierzu auf den vorbereiteten Lösungsblättern stehen und die Blätter mit Namen und Matrikelnummer versehen sind.
4. Schreiben Sie nicht mit Bleistift. Zeichnungen dürfen mit Bleistift ausgeführt werden. Bitte keinen Rotstift verwenden.
5. Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel (auch Schmierblätter) in die Doppelbögen gehüllt ab.
6. Die Klausur muss wieder in gehefteter Form abgegeben werden.

Aufgabe 1: Strukturbild und Frequenzkennlinien

Gegeben ist eine Anordnung zur Befüllung von Konservendosen, bei der das zu fördernde Gut über ein Transportband in einen Dosierbehälter befördert wird:

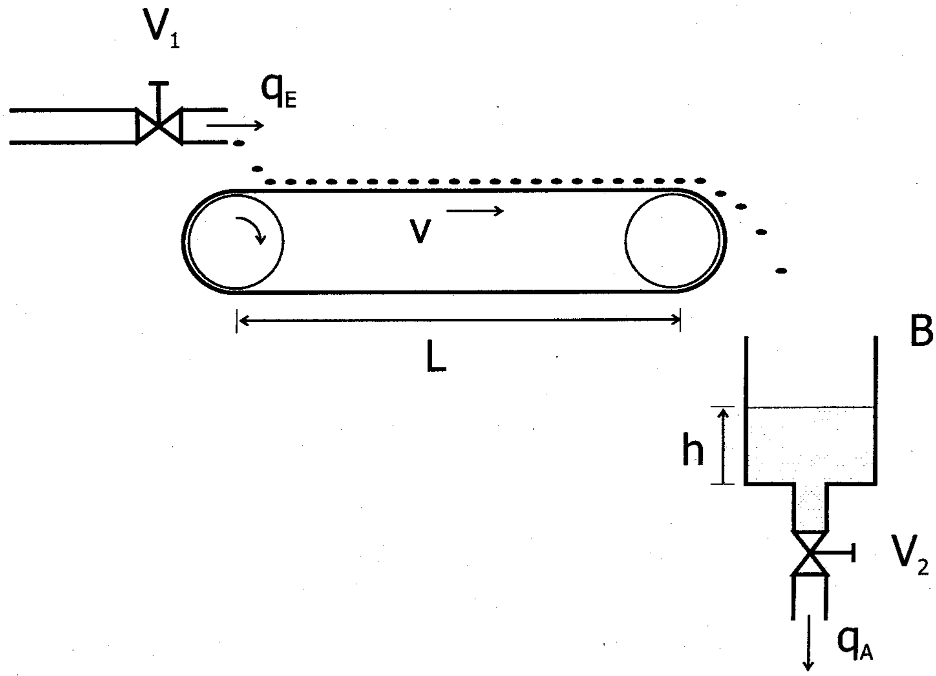


Abb. 1.1: Förderprozess

Das Transportband habe die Länge $L = 0,5\ m$ und eine Geschwindigkeit von $0,1\ m/s$. Der zylindrische Behälter habe eine Grundfläche von $0,1\ m^2$. Die Regelgröße sei die Füllhöhe h im Behälter B, die Stellgröße der zugeführte Volumenstrom q_E und die Störgröße der aus dem Behälter ausfließende Volumenstrom q_A. Die Bauteile des Systems können als ideal und näherungsweise linear betrachtet werden.

1.1 Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion der Strecke. Beachten Sie dabei insbesondere die Verweildauer des Schüttgutes auf dem Förderband. Als Eingang der Strecke wird der Volumenstrom q_E, als Ausgang der Strecke die Regelgröße h betrachtet.

1.2 Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion des Ventils V_1 als Stellglied. Der Volumenstrom q_E soll dabei als näherungsweise proportional (Faktor K_{V1}) zur Ventilstellung angesehen werden. Eingangsgröße des Stellgliedes ist der Reglerausgang u.

Verwenden Sie für die nun folgenden Aufgabenteile die folgende Übertragungsfunktion für Stellglied und Strecke:

$$G_S(s) = 6 \cdot \frac{e^{-5 \cdot s}}{s}$$

1.3 Zeichnen Sie nun das Strukturbild des Regelkreises, indem Sie für den Regler die Übertragungsfunktion eines P-Reglers einsetzen. Achten Sie auf vollständige Beschriftung.

1.4 Zeichnen Sie für $K_P = 1$ die Frequenzkennlinien des offenen Regelkreises. Verwenden Sie hierfür bitte das beigefügte halblogarithmische Papier.(**Achsenbeschriftung!**)

1.5 Bestimmen Sie den Stabilitätsbereich des geschlossenen Regelkreises in Abhängigkeit des Faktors K_P. Bezeichnen Sie dabei alle notwendigen Größen!

1.6 Ist der Regelkreis bezüglich einer **Störgrößenänderung** stationär genau? Bitte begründen Sie mit Hilfe einer kleinen Rechnung.

1.7 Der Proportionalfaktor des Reglers sei nun fest auf $K_P = 0,2$ eingestellt. Wie klein darf die Bandgeschwindigkeit minimal sein, damit der geschlossene Regelkreis stabil ist?

Hinweis: Verwenden Sie hierfür die von Ihnen gezeichneten Frequenzkennlinien aus Aufgabenteil 1.4. Ihr Vorgehen muss ersichtlich sein! (**Beschriftungen!**)

1.8 Wie ändert sich das Strukturbild, wenn statt der Ventilstellung die Bandgeschwindigkeit v als Stellgröße gewählt wird? (**Zeichnung!**)
Können Sie für diesen Fall eine Übertragungsfunktion angeben? Wenn ja, wie lautet diese?

Aufgabe 2: Regelkreisanalyse

In einer verfahrenstechnischen Anlage werde als Stellglied für eine Durchflussstrecke ein elektromagnetisches Ventil verwendet, das die Reglerausgangsspannung u in einen proportionalen Stellweg y nach folgender Gleichung umsetzt.

$$y(t) = k_v \cdot u(t)$$

k_v : Proportionalitätskonstante

Das Verhalten der Durchflussstrecke selbst sei durch die Sprungantwort in Abb. 2.1 (Anregung mit einem Einheitssprung als Ausgang des Ventils) gegeben:

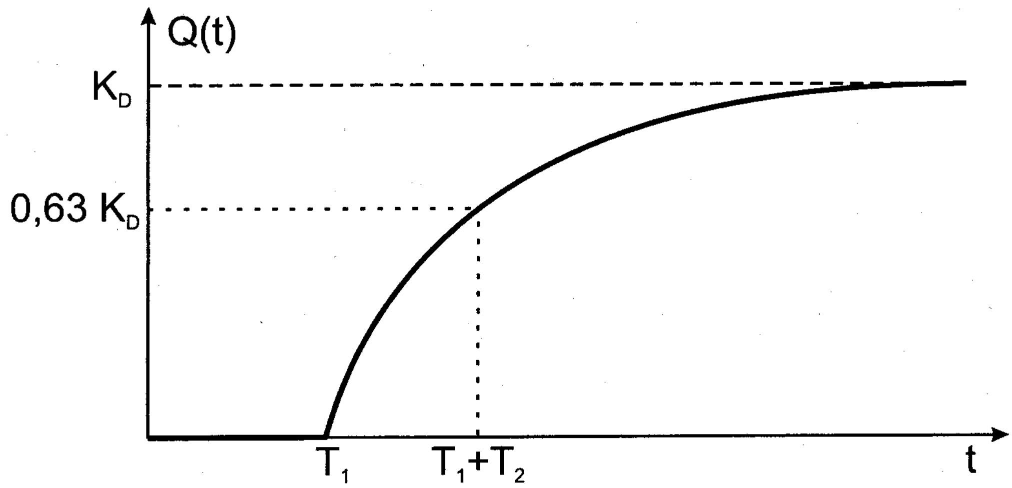


Abb. 2.1: Sprungantwort der Durchflussstrecke

K_D : Proportionalitätskonstante
T_1, T_2 : Zeitkonstanten

Zur Messung des Durchflusses Q wird ein Sensor verwendet, dessen Übertragungsverhalten durch folgende Gleichung beschrieben werden kann.

$$T_{M2}\dot{Q}_M(t) + Q_M(t) = K_M Q(t - T_{M1})$$

Q_M : Messwert des Sensors
Q : Durchfluss
K_M : Proportionalitätskonstante
T_{M1}, T_{M2} : Zeitkonstanten
t : Zeit

Als Regler werde ein (idealer) PID-Regler verwendet.

2.1 Zeichnen Sie das mathematische Strukturbild des Durchfluss-Regelkreises mit sämtlichen Ein-/Ausgangsgrößen, wobei in die einzelnen Übertragungsblöcke die Bedeutung (Regler, etc.) und die zugehörige s-Übertragungsfunktion einzutragen sind.

2.2 Wie sind die Zeitkonstanten T_{R1} und T_{R2} des (idealen) PID-Reglers zu wählen, wenn der geschlossene Regelkreis möglichst schnell sein soll? (Begründung!)

2.3 Skizzieren (→prinzipieller Verlauf) Sie hierfür die Ortskurve des Frequenzganges des korrigierten offenen Regelkreises. (**Achsenbeschriftung!**)
Geben Sie $F_o(j\omega)$ unter Berücksichtigung von 2.2, sowie Betrag und Phase davon, explizit an.

2.4 In welchem Bereich muss der Reglerverstärkungsfaktor K_R abhängig von den übrigen Konstanten liegen, damit die Stabilität des geschlossenen Regelkreises gesichert ist (Formel!)?

2.5 Mit welcher Kreisfrequenz ω_s würde der Regelkreis schwingen, wenn der Reglerverstärkungsfaktor K_R gerade größer als der in 2.4 ermittelte Wert ist (Formel!)?

Aufgabe 3: Linearisierung und Strukturbild

Gegeben sei das folgende nichtlineare System mit einer Eingangsgröße und zwei Ausgangsgrößen:

$$\begin{aligned} (M+m)\cdot\ddot{y} - m\cdot l\cdot\ddot{\alpha}\cdot cos(\alpha) + m\cdot l\cdot\dot{\alpha}^2\cdot sin(\alpha) &= F \qquad (1)\\ -m\cdot l\cdot\ddot{y}\cdot cos(\alpha) + m\cdot l^2\cdot\ddot{\alpha} - m\cdot g\cdot l\cdot sin(\alpha) &= 0 \qquad (2) \end{aligned}$$

Die Größen M, m, g, l sind physikalische Konstanten des dynamischen Systems. Die Eingangsgröße des dynamischen Systems ist die Kraft F. Die Ausgangsgrößen des dynamischen Systems sind die Position y und der Winkel α.

3.1 Linearisieren Sie das dynamische System (Gln. (1) u. (2)) um den Arbeitspunkt:

$$\alpha_0 = 0 \quad \text{und} \quad y_0 = 0.$$

Ersetzen Sie hierzu die trigonometrischen Funktionen durch das erste Glied ihrer *Taylor-Reihe.*

3.2 Bestimmen Sie die Zustandsdarstellung des dynamischen Systems ausgehend von den linearisierten Differentialgleichungen aus Aufgabenteil 3.1 und geben Sie die Matrizen $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ an.
Verwenden Sie hierzu die folgenden Zustandsgrößen:

$$x_1 = y, \quad x_2 = \alpha, \quad x_3 = \dot{y}, \quad x_4 = \dot{\alpha}.$$

3.3 Zeichnen Sie das Strukturbild des linearisierten dynamischen Systems ausgehend von der Zustandsdarstellung aus Aufgabenteil 3.2. Tragen Sie die Zustandsgrößen in das Strukturbild ein. Achten Sie auf vollständige Beschriftung.

Hinweise:
Es gilt in der Umgebung von $\alpha_0 = 0$: $\quad \dot{\alpha}^2 \cdot sin(\alpha) \approx 0$

Taylor-Reihe:

$$p_n(x) = p_n(x_0) + \frac{p_n'(x_0)}{1!}(x-x_0) + \ldots + \frac{p_n^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n = \sum_{\nu=0}^{n} \frac{p_n^{(\nu)}(x_0)}{\nu!}(x-x_0)^\nu$$

NAME: MATRIKELNUMMER:

Aufgabe 4: Wurzelortskurve

Gegeben sei der durch Einheitsrückführung geschlossene Regelkreis.

$$G(s) = K \cdot \frac{s^2 - 2s + 2}{s^2 + 6s - T} \qquad K \in [0..\infty[\;,\; T \geq 0$$

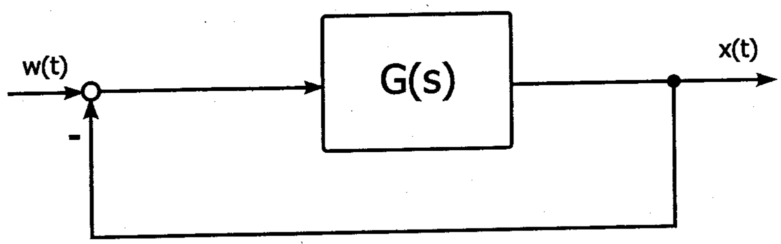


Abb. 4.1: geschlossener Regelkreis

Der Faktor T sei zunächst fest zu $T = 0$ gesetzt.

4.1 Konstruieren Sie die Wurzelortskurve des angegebenen Regelkreissystems, indem Sie das zur Verfügung gestellte Millimeterpapier verwenden und insbesondere die im Hinweis angegebenen Punkte untersuchen. (**Achsenbeschriftung!**)

Hinweis: Bestimmen Sie für diesen Aufgabenteil unter anderem den Verzweigungspunkt, die Schnittwinkel im Verzweigungspunkt, Schnittpunkte mit der imaginären Achse, die Anstiegswinkel in den kritischen Stellen.

4.2 Ist der Regelkreis für alle K (> 0) stabilisierbar? Geben Sie den eventuell vorhandenen Stabilitätsbereich in Abhängigkeit von K an.

4.3 Für eine Anwendung ist der Regelkreis so einzustellen, dass der geschlossene Regelkreis keine Überschwinger bei Sprunganregung besitzt und trotzdem möglichst schnell ist. Wo müssen die Pole des geschlossenen Regelkreises liegen, damit diese Forderung erfüllt ist? Auf welchen Wert muss der Faktor K hierfür eingestellt werden?

4.4 Sie erhalten nun die Möglichkeit, den Faktor T zu verändern. Können Sie T so einstellen, dass der geschlossene Regelkreis für alle K stabil ist? Bitte begründen Sie Ihre Antwort!

Aufgabe 5: Allgemeine Fragen zur Regelungstechnik

(Bitte in kurzen Stichworten und/oder mit Hilfe von Skizzen beantworten!)

5.1 Welche Anforderungen werden an einen Regelkreis gestellt? Welche ist die wichtigste Anforderung?

5.2 Mathematische Beschreibungen in der Regelungstechnik

5.2.1 Erläutern Sie die Begriffe „Funktion" und „Operator".

5.2.2 Welche Möglichkeiten bestehen zur Angabe einer

a) Funktion und

b) eines Operators?

5.2.3 Unter welchen Voraussetzungen kann man einen Operator als eine Faltung darstellen?

5.2.4 Warum verwendet man die Laplace-Transformation in der Regelungstechnik, aber die Fourier-Transformation in der Nachrichtentechnik?

5.3 Geben Sie die gerätemäßige Anordnung eines Regelsystems an, bei dem die Funktion des Reglers durch einen Digitalrechner realisiert wird.

5.4 Was können Sie zur Richtigkeit der folgenden Aussagen sagen? Antworten mit Begründung – Gegenbeispiele sind als Begründung zugelassen!

5.4.1 Ein PI-Regler ist ein stabiles System (PI-Regler ohne Regelkreis).

5.4.2 Die Wurzelortskurve beschreibt Bahnen der Pole der Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises, abhängig vom Verstärkungsfaktor k in der komplexen Ebene.

5.4.3 Ein geschlossener Regelkreis bestehend aus einem Regler und einer Strecke, die jeweils sprungantwortstabil sind, ist immer stabil.

5.4.4 Ein geschlossener Regelkreis bestehend aus einem Regler und einer Strecke, die jeweils nicht sprungantwortstabil sind, ist immer instabil.

5.5 Skizzieren Sie die Ortskurven der Frequenzgänge der gegebenen Übertragungsglieder auf dem angefügten Hilfsblatt. Tragen Sie insbesondere die Punkte für $\omega \to 0$ und $\omega \to \infty$ auf.(**Achsenbeschriftung!**)

1. $G(s) = \dfrac{2s+1}{3s^2+2s}$ 2. $G(s) = \dfrac{e^{-T_t s}}{1+Ts}$ 3. $G(s) = \dfrac{2}{1+3s}$

5.6 Erläutern Sie anhand einer der Ortskurven aus Aufgabenteil 5.5 die Begriffe **Betrag und Phase des Frequenzganges, sowie Durchtrittsfrequenz und Phasenreserve**, indem Sie diese in der entsprechenden Skizze kenntlich machen.

NAME: MATRIKELNUMMER:

Technische Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Regelungstechnik und Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Pandit

06. Oktober 2003

DIPLOMHAUPTPRÜFUNG
IM FACH
REGELUNGSTECHNIK I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder **nicht**programmier**barer** Taschenrechner, Schreib- und Zeichenmaterial. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke, lose Blätter oder programmierbare Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, halblogarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Sprungantwortkatalog, Schmierpapier, Blatt mit Fachbegriffen deutsch-englisch (bei Bedarf).

Bitte beachten:

1. Schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer, insbesondere auf Millimeter- und halblogarithmisches Papier.
2. Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluss an die Aufgabenstellungen auf die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).
3. Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern können nur dann berücksichtigt werden, wenn Verweise hierzu auf den vorbereiteten Lösungsblättern stehen und die Blätter mit Namen und Matrikelnummern versehen sind.
4. Schreiben Sie nicht mit Bleistift. Zeichnungen dürfen mit Bleistift ausgeführt werden. Bitte keinen Rotstift verwenden.
5. Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel (auch Schmierblätter) in die Doppelbögen gehüllt ab.
6. Die Klausur muss wieder in gehefteter Form abgegeben werden.

Viel Erfolg!

Aufgabe 1: Frequenzkennlinien

Eine Strecke, bestehend aus der Serienschaltung von vier VZ1-Gliedern, soll durch einen PI-Regler in einem Regelkreis mit Einheitsrückführung (Gegenkopplung) geregelt werden.

1. VZ1-Glied: $T_1 = 3$ $K_1 = 1$
2. VZ1-Glied: $T_2 = 1$ $K_2 = 1$
3. VZ1-Glied: $T_3 = 0,2$ $K_3 = 1$
4. VZ1-Glied: $T_4 = 0,1$ $K_4 = 1$

Mit Hilfe des Frequenzkennlinienverfahrens ist der PI-Regler zu entwerfen, wobei

1. der Regelkreis möglichst schnell sein und
2. die Phasenreserve $\varphi_R \approx 50^o$ betragen soll.

1.1 Wie lauten

a) die Übertragungsfunktion $G_s(s)$ der Strecke (faktorisiert),
b) die allgemeine Übertragungsfunktion $G_{PI}(s)$ eines idealen PI-Reglers und
c) die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises $F_o(s)$?

1.2 Entwerfen Sie den PI-Regler mit Hilfe des Frequenzkennlinienverfahrens. Benutzen Sie dafür das halblogarithmische Papier und bezeichnen Sie alle zum Entwurf wesentlichen Größen. Wie lautet nun seine Übertragungsfunktion $G_{PI}(s)$?

1.3 Beeinflusst ein zusätzliches I-Verhalten der Strecke die Stabilität des Regelkreises? Begründung!

1.4 Skizzieren Sie den Frequenzgang der Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises in der Ortskurvenebene möglichst phasenrichtig für den unter 1.2 dimensionierten Regelkreis auf das dafür vorgesehene Blatt. (**Achsenbeschriftung!**)

1.5 Gegeben sei die Übertragungsfunktion des offenen Kreises: $F_o(s)$

$$F_o(s) = K \cdot \frac{(1+T_1 s)(1+T_2 s)}{s(1+T_3 s)(1+T_4 s)}$$

Zeichnen Sie qualitativ die Ortskurven für die angegebenen Fälle auf das dafür vorgesehene Blatt. (**Achsenbeschriftung!**)

1.5.1 $T_1 = 0;\ T_2 = 0;\ T_3 \gg T_4$

1.5.2 $T_2 = 0;\ T_3 \gg T_4 \gg T1$

1.5.3 $T_4 \gg T_3 \gg T_2 \gg T_1$

1.5.4 $T_1 = 0;\ T_3 = 0;\ T_4 \gg T_2$

1.6 Wie ändert sich die Ortskurve von 1.5.1, wenn $F_o(s)$ keinen I-Anteil aufweist? Skizzieren Sie!

1.7 Wo finden sich in der Ortskurvendarstellung der Betrag, Phasenkennlinie, Durchtrittsfrequenz und Phasenreserve des Frequenzkennlinienverfahrens wieder? (**Achsenbeschriftung!**)

Aufgabe 2: Regelkreisanalyse

In einer verfahrenstechnischen Anlage werde als Stellglied für eine Durchflussstrecke ein elektromagnetisches Ventil verwendet, das die Reglerausgangsspannung u in einen proportionalen Stellweg y nach folgender Gleichung umsetzt.

$$y(t) = k_v \cdot u(t)$$

k_v : Proportionalitätskonstante

Das Verhalten der Durchflussstrecke selbst sei durch die Sprungantwort in Abb. 2.1 (Anregung mit einem Einheitssprung von Ventil) gegeben:

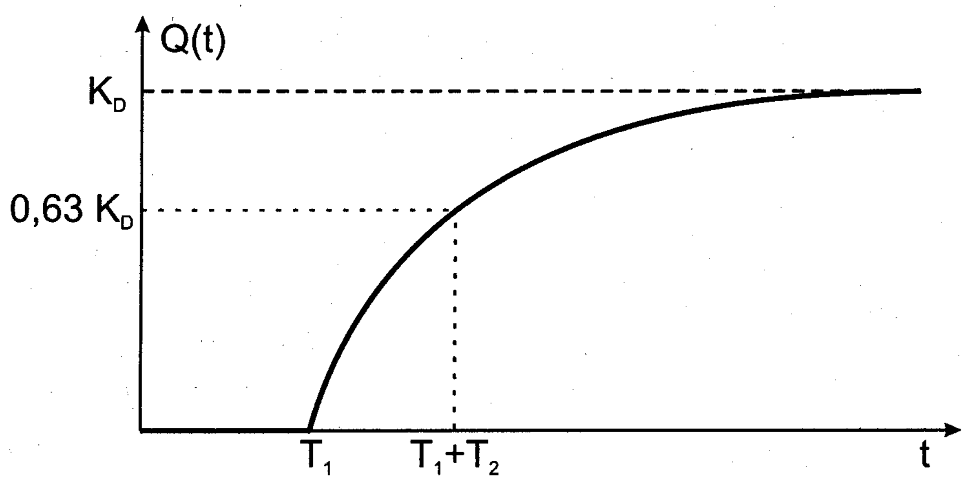


Abb. 2.1: Sprungantwort der Durchflussstrecke

K_D : Proportionalitätskonstante
T_1, T_2 : Zeitkonstanten

Zur Messung des Durchflusses Q wird ein Sensor verwendet, dessen Übertragungsverhalten durch folgende Gleichung beschrieben werden kann.

$$T_{M2}\dot{Q}_M(t) + Q_M(t) = K_M Q(t - T_{M1})$$

Q_M : Messwert des Sensors
Q : Durchfluss.
K_M : Proportionalitätskonstante
T_{M1}, T_{M2} : Zeitkonstanten
t : Zeit

Als Regler werde ein (idealer) PID-Regler verwendet.

2.1 Zeichnen Sie das mathematische Strukturbild des Durchfluss-Regelkreises mit sämtlichen Ein-/Ausgangsgrößen, wobei in die einzelnen Übertragungsblöcke die Bedeutung (Regler, etc.) und die zugehörige s-Übertragungsfunktion einzutragen sind.

2.2 Wie sind die Zeitkonstanten T_{R1} und T_{R2} des (idealen) PID-Reglers zu wählen, wenn der geschlossene Regelkreis möglichst schnell sein soll? (Begründung!)

2.3 Skizzieren (→prinzipieller Verlauf) Sie hierfür die Ortskurve des korrigierten offenen Regelkreises. (**Achsenbeschriftung!**)
Geben Sie $F_o(s)$ unter Berücksichtigung von 2.2, sowie Betrag und Phase davon, explizit an.

2.4 In welchem Bereich muss der Reglerverstärkungsfaktor K_R abhängig von den übrigen Konstanten liegen, damit die Stabilität des geschlossenen Regelkreises gesichert ist (Formel!)?

2.5 Mit welcher Kreisfrequenz ω_s würde der Regelkreis schwingen, wenn der Reglerverstärkungsfaktor K_R gerade größer als der in 2.4 ermittelte Wert ist (Formel!)?

NAME: MATRIKELNUMMER:

Aufgabe 3: Übertragungsfunktionen / Laplace

Die Impulsantwort eines Systems wurde zu

$$g(t) = [5 + \frac{5}{4}e^{-t} - \frac{25}{4}e^{-\frac{t}{5}}]\sigma(t)$$

gemessen.
Die Ausgangsgröße dieser Regelstrecke soll als Regelgröße in einem geschlossenen Regelkreis mit Einheitsrückführung aufgefasst werden.

3.1 Entwerfen Sie einen PD-Regler nach folgenden Gesichtspunkten:

   a) Der Kreis soll möglichst schnell sein!

   b) Die Überschwingweite der Sprunganwort des Regelkreises soll maximal 5% betragen!

3.2 Welche stationäre Genauigkeit und welches Übertragungsverhalten besitzt der Regelkreis? (jeweils Begründung!)

3.3 Welche Übergangszeit t_{ue} besitzt der unter 3.1 dimensionierte Regelkreis?

3.4 Welchen zeitlichen Verlauf hat die Impulsantwort des Regelkreises? (Hinweis: Geben Sie berechnete Werte bis auf vier Stellen nach dem Komma an!)

Aufgabe 4: Wurzelortskurve

Gegeben sei folgende Übertragungsfunktion einer Strecke:

$$G_S(s) = \frac{1}{(s+10)(s+1)(s+3)(s+2)}$$

4.1 Skizzieren Sie die Wurzelortskurve (WOK) für diese Strecke maßstabsgetreu auf dem Hilfsblatt, indem sie die ersten 5 Regeln zur Konstruktion von Wurzelortskurven verwenden. (**Achsenbeschriftung!**)

Für die Strecke $G_S(s)$ soll nun ein (idealer) PID-Regler derart dimensioniert werden, dass der geschlossene Regelkreis mit Einheitsrückführung möglichst schnell wird.

4.2 Wie lauten die Übertragungsfunktionen $G_{R_{ideal}}(s)$ des idealen PID-Reglers und $G_{R_{real}}(s)$ eines realen PID-Reglers, jeweils mit dem Verstärkungsfaktor K_R? (Bemerkung: K_R ist noch unbestimmt!)

4.3 Zeichnen Sie maßstabsgetreu die WOK des korrigierten Regelkreises

$$F_K(s) = G_{R_{ideal}}(s) \cdot G_S(s)$$

auf Millimeterpapier und ermitteln Sie dazu Asymptotenschnittpunkt(e), Anstiegswinkel der Asymptoten, sowie Verzweigungspunkt(e)! (**Achsenbeschriftung!**) (Hinweis: Bei der Berechnung der/des Verzweigungspunkte(s) kann der entfernte Pol vernachlässigt werden.)

4.4 Ist der Regelkreis für alle Werte von K_R stabil? (Begründung!) Ermitteln Sie gegebenenfalls den Wert von K_R an der Stabilitätsgrenze näherungsweise aus der WOK.

4.5 Warum darf der Streckenpol $p = -10$ bei der Stabilitätsbetrachtung nicht vernachlässigt werden, wohl aber bei der näherungsweisen Betrachtung des dynamischen Verhaltens des geschlossenen Regelkreises?

NAME: MATRIKELNUMMER:

Aufgabe 5: Allgemeine Fragen zur Regelungstechnik

(Bitte in kurzen Stichworten, bzw. mit Hilfe von Skizzen beantworten!)

5.1 Welche Anforderungen werden an einen Regelkreis gestellt? Welche ist die wichtigste Anforderung?

5.2 Was ist ein minimalphasiges Übertragungsglied? Wie kann man anhand der Sprungantwort eines Übertragungsgliedes erkennen, ob dieses minimalphasig ist oder nicht? Besteht ein Zusammenhang zwischen Minimalphasigkeit und Stabilität? (Begründung!)

5.3 Erklären Sie den Unterschied zwischen der Bestimmung der Stationären Genauigkeit bzgl. der Führungsgröße und bzgl. der Störgröße anhand der gegebenen Führungs-, bzw. Störübertragungsfunktion eines offenen Regelkreises in Abhängigkeit von K.

$$F_o(s) = \frac{(s+1)}{s(K+s)(s+10)}$$

5.4 Für welche Werte von K ist der in Abb. 5.1 angegebene Regelkreis stabil? Begründen sie exakt mit Hilfe eines beliebigen Stabilitätskriteriums!

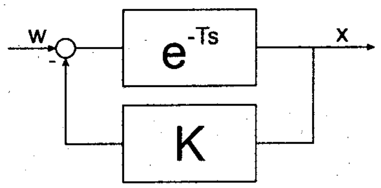


Abb. 5.1: Regelkreis mit Totzeit.

5.5 Geben Sie ein Beispiel für eine Regelung mit einem 2-Punkt-Regler. Welche Rolle spielt die Hysterese des 2-Punkt-Reglers?

NAME: MATRIKELNUMMER:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik / Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Pandit

08. April 2003

DIPLOMHAUPTPRÜFUNG
IM FACH
REGELUNGSTECHNIK I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder **nicht**programmier**barer** Taschenrechner, Schreib- und Zeichenmaterial. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke, lose Blätter oder programmierbare Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, halblogarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Schmierpapier, Blatt mit Fachbegriffen deutsch-englisch (bei Bedarf).

Bitte beachten:

1. Schreiben Sie auf **jedes** Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer, insbesondere auf Millimeter- und halblogarithmisches Papier.
2. Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluss an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).
3. Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern können nur dann berücksichtigt werden, wenn Verweise hierzu auf den vorbereiteten Lösungsblättern stehen und die Blätter mit Namen und Matrikelnummern versehen sind.
4. Schreiben Sie nicht mit Bleistift. Zeichnungen dürfen mit Bleistift ausgeführt werden. Bitte keinen Rotstift verwenden.
5. Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel (auch Schmierblätter) in die Doppelbögen gehüllt ab.
6. Die Klausur muss wieder in gehefteter Form abgegeben werden.

Viel Erfolg!

Aufgabe 1: Frequenzkennlinien

Eine Strecke, bestehend aus der Serienschaltung von vier VZ1-Gliedern, soll durch einen PI-Regler in einem Regelkreis mit Einheitsrückführung (Gegenkopplung) geregelt werden.

1. VZ1-Glied: $T_1 = 3$ $K_1 = 1$
2. VZ1-Glied: $T_2 = 1$ $K_2 = 1$
3. VZ1-Glied: $T_3 = 0,2$ $K_3 = 1$
4. VZ1-Glied: $T_4 = 0,1$ $K_4 = 1$

Mit Hilfe des Frequenzkennlinienverfahrens ist der PI-Regler zu entwerfen, wobei

1. der Regelkreis möglichst schnell sein und
2. die Phasenreserve $\varphi_R \approx 50^o$ betragen soll.

1.1 Wie lauten die Übertragungsfunktion $G_s(s)$ der Strecke (faktorisiert), die allgemeine Übertragungsfunktion $G_{PI}(s)$ eines idealen PI-Reglers und die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises $F_o(s)$?

1.2 Entwerfen Sie den PI-Regler mit Hilfe des Frequenzkennlinienverfahrens. Benutzen Sie dafür das halblogarithmische Papier. Wie lautet nun seine Übertragungsfunktion $G_{PI}(s)$?

1.3 Beeinflusst ein zusätzliches I-Verhalten der Strecke die Stabilität des Regelkreises? Begründung!

1.4 Skizzieren Sie den Frequenzgang der Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises in der Ortskurvenebene für den unter 1.2 dimensionierten Regelkreis auf das dafür vorgesehene Blatt (Achsenbeschriftung!!).

1.5 Gegeben sei die Übertragungsfunktion des offenen Kreises: $F_o(s)$

$$F_o(s) = K \cdot \frac{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}{s(1 + T_3 s)(1 + T_4 s)}$$

Zeichnen Sie qualitativ die Ortskurven für die angegebenen Fälle auf das dafür vorgesehene Blatt (Achsenbeschriftung!!).

1.5.1 $T_1 = 0$; $T_2 = 0$; $T_3 \gg T_4$

1.5.2 $T_2 = 0$; $T_3 \gg T_4 \gg T1$

1.5.3 $T_4 \gg T_3 \gg T_2 \gg T_1$

1.5.4 $T_1 = 0$; $T_3 = 0$; $T_4 \gg T_2$

1.6 Wie ändert sich die Ortskurve von 1.5.1, wenn $F_o(s)$ keinen I-Anteil aufweist? Skizzieren Sie!

1.7 Wo finden sich in der Ortskurvendarstellung der Betrag, Phasenkennlinie, Durchtrittsfrequenz und Phasenreserve des Frequenzkennlinienverfahrens wieder?

Aufgabe 2: Regelkreisanalyse

Gegeben sei ein Regelkreis mit der in der Abb. 2.1 gezeigten Struktur und folgenden Übertragungsfunktionen:

$$G_1(s) = 5 \qquad\qquad G_2(s) = \frac{2}{40s^2 + 14s + 1}$$

Als Regler $G_R(s)$ steht ein PI-Regler zur Verfügung.

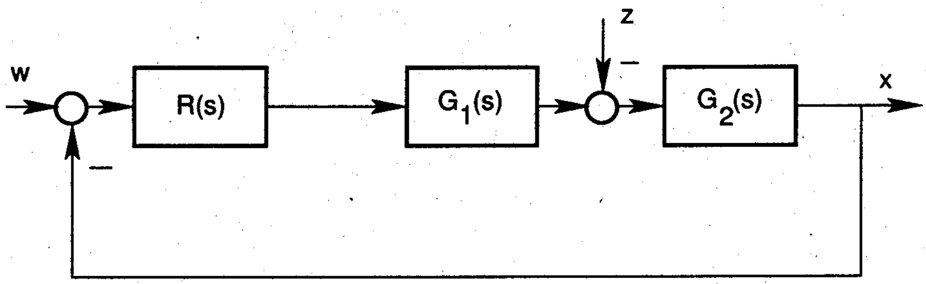


Abb. 2.1: Regelkreis

2.1 Bestimmen Sie die Reglerparameter des Reglers vom Typ PI so, dass der Regelkreis stabil und möglichst schnell ist. Verwenden Sie hierfür ein beliebiges Stabilitätskriterium.

2.2 Ist der Regelkreis bezüglich der Führungsgröße stationär genau? Begründung durch Rechnung!

Eine Möglichkeit zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens bezüglich einer Störgrößenänderung besteht in der geeigneten Aufschaltung der messbaren Störgröße. Dies erfolgt wie in Abb. 2.2 dargestellt:

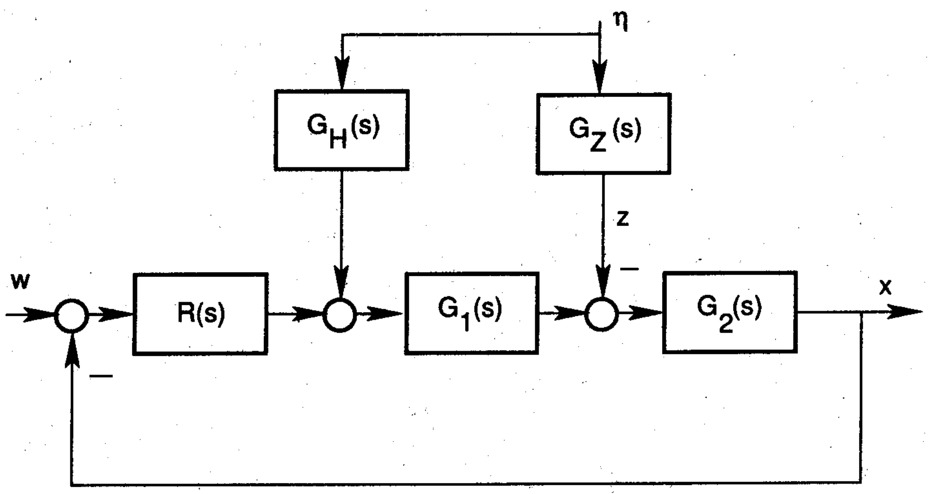


Abb. 2.2: Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung

2.3 Zeigen Sie zunächst allgemein (durch Rechnung!), dass durch die Aufschaltung der Störgröße η über die beiden Übertragungsglieder $G_Z(s)$ und $G_H(s)$ die Stabilität des Gesamtsystems nicht beeinträchtigt wird.

2.4 Ergibt sich durch die Aufschaltung eine Änderung des Führungsverhaltens? Bitte begründen Sie.

2.5 Bestimmen Sie nun eine geeignete Übertragungsfunktion $G_H(s)$ derart, dass der Regelkreis eine Störgrößenänderung möglichst gut kompensiert. Setzen Sie hierfür $G_Z(s) = 1$ an.

2.6 Ist der Regelkreis bezüglich der Störgröße stationär genau (inklusive der von Ihnen in Aufgabenteil (2.5) entworfenen Störgrößenaufschaltung)? Begründung durch Rechnung!

2.7 Wäre der Regelkreis **ohne Störgrößenaufschaltung** stationär genau bezüglich der Störgröße? Verwenden Sie hierfür die Struktur in Abb. 2.1.

Aufgabe 3: Zustandsdarstellung dynamischer Systeme

Zur Feder-Dämpfer-Auslegung bei einem Formel 1 Rennwagen kann man folgende Ersatzschaltung angeben.

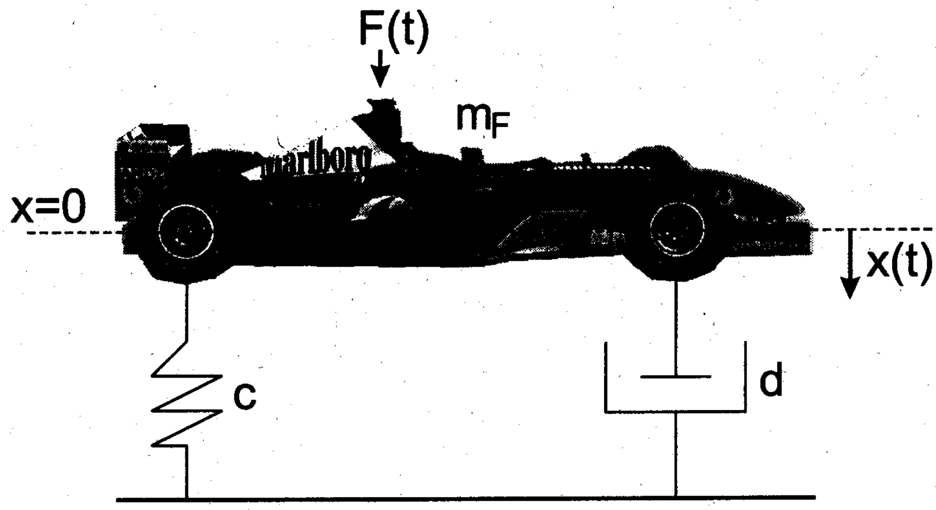


Abb. 3.1: Ersatzschaltung einer Feder-Dämpfer-Anordnung eines Formel 1 Wagens

m_F = Masse des Formel 1 Wagens

c = Federkonstante

d = Dämpfungskonstante

$F(t)$ = Anpresskraft aufgrund der Aerodynamik (Eingang)

$x(t)$ = Absenkung des Formel 1 Wagens aus der Gleichgewichtslage (Ausgang)

$F(t)$ **wirkt senkrecht** auf den Wagen und ist veränderlich in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit. Ohne aerodynamischen Anpresskraft ist $x(t) = 0$.
Die **Masse** des Wagens soll als **gleichmäßig verteilt** angenommen werden. Ebenso sollen die vier Feder-Dämpfer-Systeme der einzelnen Räder als **ein Feder-Dämpfer-System** angenommen werden.
Die **konstante(!) Gewichtskraft** wirkt **dem Feder-Dämpfer-System entgegen** und führt dazu, dass bei Stillstand des Wagens (**Ruhelage**) $x(t) = 0$ gilt.
Die Reifen seien inkompressibel.

3.1 Stellen Sie die Bewegungsgleichung des dynamischen Systems **für vertikale Bewegungen** auf.

3.2 Wie müssen c und d gewählt werden, damit der Formel 1 Wagen auf einer langen, ideal ebenen Geraden bei Höchstgeschwindigkeit ($F(t) = const. = 70N$) um $x(t) = const. = 0.05m$ ausgelenkt wird.

Sollten Sie 3.1 nicht lösen können, dann (und **nur** dann) rechnen Sie mit folgender Bewegungsgleichung weiter:

$$\ddot{x} = a \cdot x + b \cdot \dot{x} + c \cdot F(t)$$

3.3 Ermitteln Sie die Zustandsgleichungen des Systems mit der Eingangsgröße $u(t) = F(t)$, den Zustandsvariablen $x_1 = x$ und $x_2 = \dot{x}$ und der Ausgangsgröße $y(t) = x(t)$. Geben Sie diese in Matrixschreibweise an ($\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$).

3.4 Zeichnen Sie das Strukturbild basierend auf den ermittelten Zustandsgleichungen. Vermeiden Sie Differentiationsglieder!

3.5 Wie nennt man die Matrizen $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$? Was bedeutet $\underline{D} \neq \underline{0}$ für das System?

Aufgabe 4: Wurzelortskurve

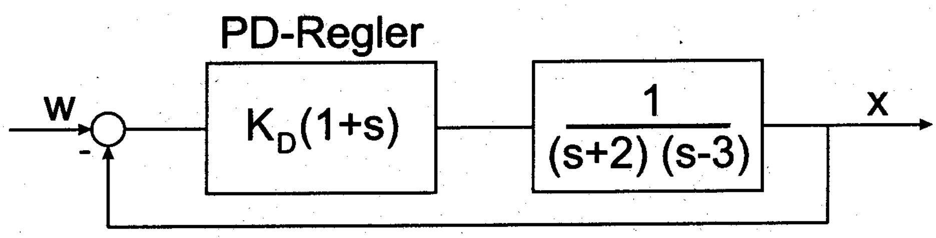


Abb. 4.1: Regelkreis mit PD-Regler und Strecke

Die in Abb. 4.1 dargestellte Regelkreis soll mit Hilfe des Wurzelortskurvenverfahrens dimensioniert werden.

4.1 Zeichnen Sie die WOK des Regelkreises und bestimmen Sie die Verstärkungen K_D, für die der Regelkreis stabil ist. Berechnen Sie dazu, falls notwendig:

(a) den Asymptotenschnittpunkt

(b) den/die Asymptotenwinkel

(c) den/die Verzweigungspunkt(e)

(d) den/die Schnittwinkel der Äste in dem/den Verzweigungspunkt(en)

(e) den/die Schnittpunkt(e) mit der imaginären Achse

Erklären Sie, warum Sie evtl. auf einzelne Berechnungen verzichten, bzw. deuten Sie die Ergebnisse.

Gegeben sein nun folgender, allgemeiner Regelkreis in Abb. 4.2:

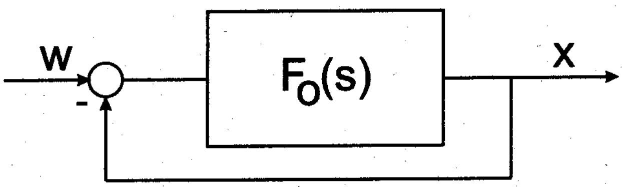


Abb. 4.2: Allgemeiner Regelkreis

$F_o(s)$ hat die Form:

$$F_o(s) = K \cdot \frac{(s-n_1)(s-n_2)(s-n_3)(s-n_4)}{(s-p_1)(s-p_2)(s-p_3)(s-p_4)}$$

wobei p_i die Pole und n_j die Nullstellen von $F_o(s)$ sind (i,j=1,2,3,4).

Benutzen Sie zur Lösung der folgenden Aufgaben das beiliegende Blatt!

4.2 Zeichnen Sie die resultierenden WOK **qualitativ** in die vorbereiteten Koordinatensysteme auf dem Lösungsblatt (**Achsenbeschriftung, Laufrichtung!!**)! Kürzen Sie vorher soweit wie möglich!

Für die kritischen Stellen (n_i=Nullstelle, p_j=Pol) gilt:

4.2.1 $n_1 = 2; n_2 = -4; n_3 = -8; n_4 = 0; p_1 = -2; p_2 = -6 + j; p_3 = p_3^\star; p_4 = 0$

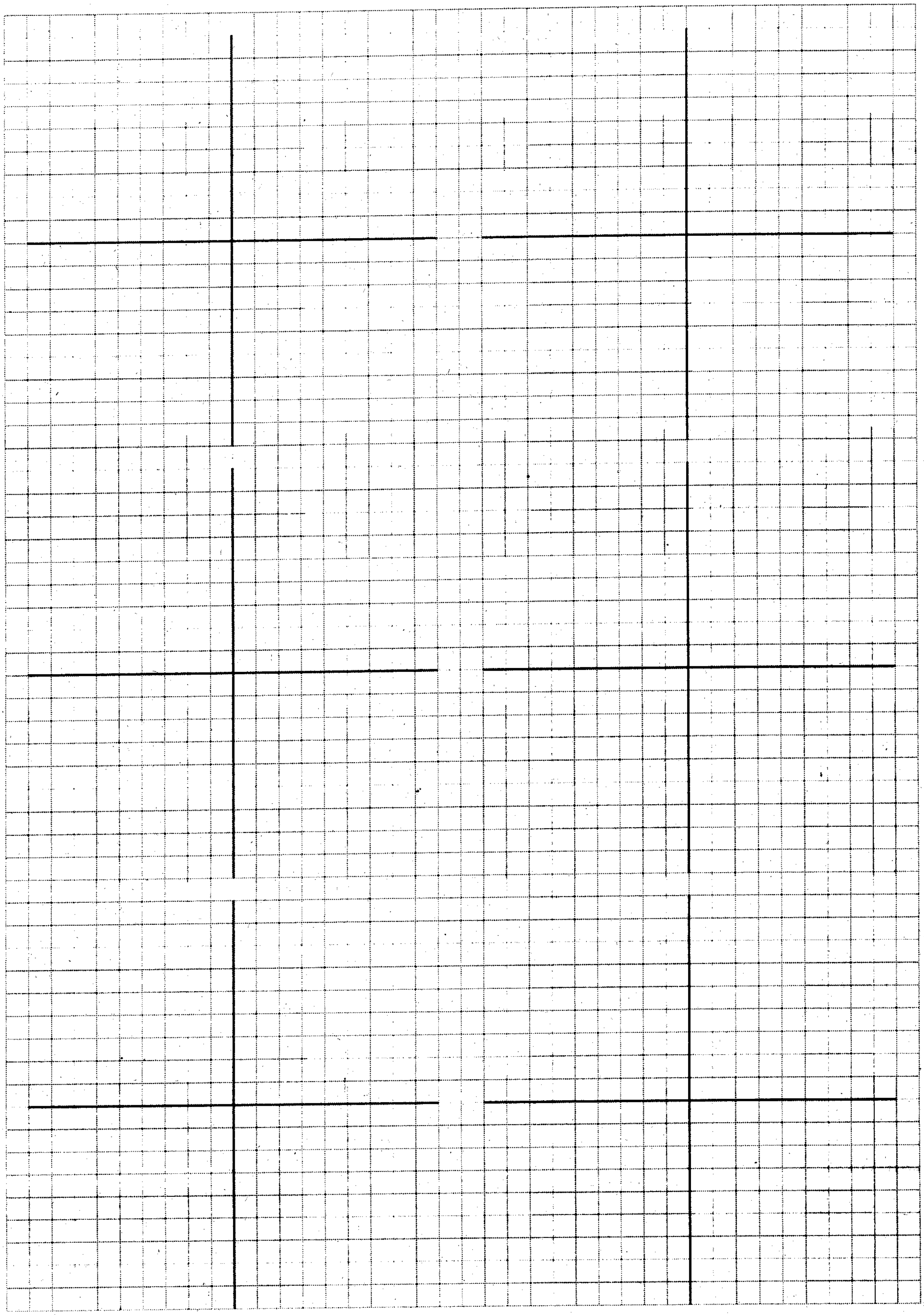
4.2.2 $n_1 = 2 + j2; n_2 = n_1^\star; n_3 = -6; n_4 = 0; p_1 = 1; p_2 = -1; p_3 = -4; p_4 = 0$

4.2.3 $n_1 = 1; n_2 = -3; n_3 = -7; n_4 = 0; p_1 = -1; p_2 = -2 + j2; p_3 = p_2^\star; p_4 = -5$

4.2.4 $n_1 = 1; n_2 = -7; n_3 = -9; n_4 = 0; p_1 = -1; p_2 = -3; p_3 = -5; p_4 = 0$

Geben Sie jeweils an, ob die Regelkreise 4.2.1 - 4.2.4 durch geeignete Wahl von K stabilisierbar sind.

NAME: MATRIKELNUMMER:



Aufgabe 5: Allgemeine Fragen zur Regelungstechnik

(Bitte in kurzen Stichworten, bzw. mit Hilfe von Skizzen beantworten!)

5.1 Erklären Sie den Unterschied zwischen Steuerung und Regelung, sowie deren Vor- und Nachteile.

5.2 Welche Anforderungen werden an einen Regelkreis gestellt? Welche ist die wichtigste Anforderung?

5.3 Was sind dominante Pole? Geben Sie Beispiele!

5.4 Was bedeuten die Begriffe „Steuerbarkeit" und „Beobachtbarkeit" in der Regelungstechnik?

5.5 Wie kann man die Stabilität eines dynamischen Systems anhand der Zustandsdarstellung des Systems prüfen?

NAME: MATRIKELNUMMER:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik / Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Pandit

07. Oktober 2002

DIPLOMHAUPTPRÜFUNG IM FACH REGELUNGSTECHNIK I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder **nicht**programmier**barer** Taschenrechner, Schreib- und Zeichenmaterial. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke, lose Blätter oder programmierbare Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, halblogarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Sprungantwortkatalog, Schmierpapier, Blatt mit Fachbegriffen deutsch-englisch.

Bitte beachten:

1. Schreiben Sie auf **jedes** Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer, insbesondere auf Millimeter- und halblogarithmisches Papier.
2. Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluss an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).
3. Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern können nur dann berücksichtigt werden, wenn Verweise hierzu auf den vorbereiteten Lösungsblättern stehen und die Blätter mit Namen und Matrikelnummern versehen sind.
4. Schreiben Sie nicht mit Bleistift. Zeichnungen dürfen mit Bleistift ausgeführt werden. Bitte keinen Rotstift verwenden.
5. Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel (auch Schmierblätter) in die Doppelbögen gehüllt ab.
6. Die Klausur muss wieder in gehefteter Form abgegeben werden.

Viel Erfolg!

Aufgabe 1: Frequenzkennlinien

Gegeben ist eine Anordnung zur Förderung von Schüttgütern, bei dem das zu fördernde Gut über ein Transportband in einen Behälter befördert wird:

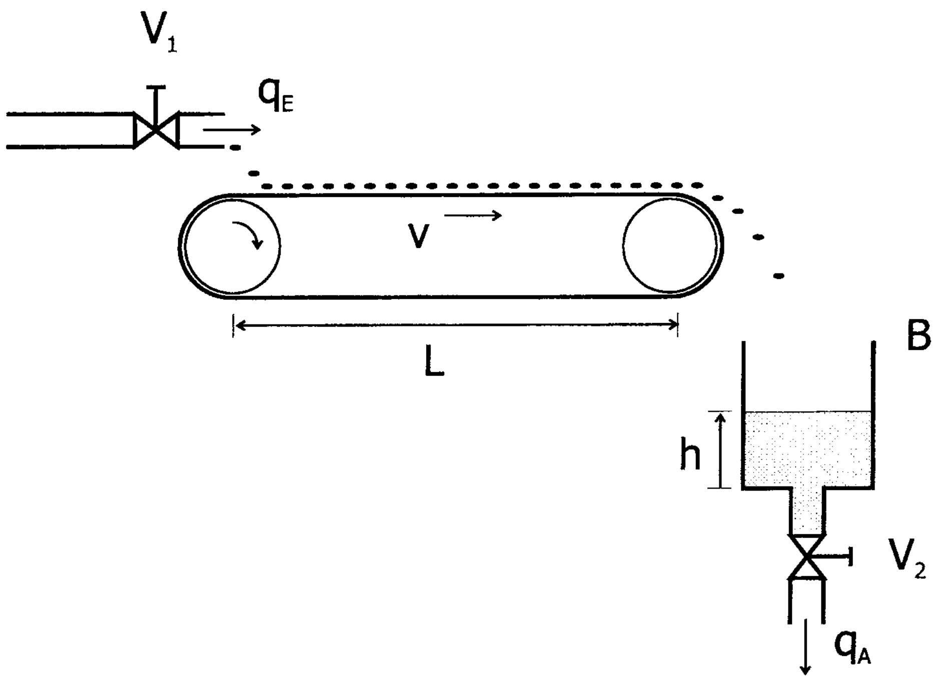


Abb. 1.1: Förderprozess

Das Transportband habe die Länge $L = 0,5\,m$ und eine Geschwindigkeit von $0,1\,m/s$. Der zylindrische Behälter habe eine Grundfläche von $0.1\,m^2$. Die Regelgröße sei die Füllhöhe h im Behälter B, die Stellgröße der zugeführte Volumenstrom q_E und die Störgröße der aus dem Behälter ausfließende Volumenstrom q_A. Die Bauteile des Systems können als ideal und näherungsweise linear betrachtet werden.

(a) Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion der Strecke. Beachten Sie dabei insbesondere die Verweildauer des Schüttgutes auf dem Förderband. Als Eingang der Strecke wird der Volumenstrom q_E, als Ausgang der Strecke die Regelgröße h betrachtet.

(b) Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion des Ventils V_1 als Stellglied. Der Volumenstrom q_E soll dabei als näherungsweise proportional (Faktor K_{V1}) zur Ventilstellung angesehen werden. Eingangsgröße des Stellgliedes ist der Reglerausgang u;

Verwenden Sie für die nun folgenden Aufgabenteile die folgende Übertragungsfunktion für Stellglied und Strecke:

$$G_S(s) = 6 \cdot \frac{e^{-5 \cdot s}}{s}$$

(c) Zeichnen Sie nun das Strukturbild des Regelkreises, indem Sie für den Regler die Übertragungsfunktion eines P-Reglers einsetzen.

(d) Zeichnen Sie für $K_P = 1$ die Frequenzkennlinien des offenen Regelkreises. Verwenden Sie hierfür bitte das beigefügte halblogarithmische Papier.

(e) Bestimmen Sie den Stabilitätsbereich des geschlossenen Regelkreises in Abhängigkeit des Faktors K_P.

(f) Ist der Regelkreis bezüglich einer **Störgrößenänderung** stationär genau? Bitte begründen Sie mit Hilfe einer kleinen Rechnung.

(g) Der Proportionalfaktor des Reglers sei nun fest auf $K_P = 0.2$ eingestellt. Wie klein darf die Bandgeschwindigkeit minimal sein, damit der geschlossene Regelkreis stabil ist?

Hinweis: Verwenden Sie hierfür die von Ihnen gezeichneten Frequenzkennlinien aus Aufgabenteil (d).

(h) Wie ändert sich das Strukturbild, wenn statt der Ventilstellung die Bandgeschwindigkeit v als Stellgröße gewählt wird? Können Sie für diesen Fall eine Übertragungsfunktion angeben?

Aufgabe 2: Zustandsdarstellung dynamischer Systeme

Gegeben ist das folgende nichtlineare dynamische System mit der Eingangsgröße $u(t)$, der Ausgangsgröße $y(t)$ und den Zustandsgrößen $x_1(t)$, $x_2(t)$ und $x_3(t)$:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1(t) &= -2 \cdot x_1(t) \cdot \ln(x_2(t)) \\
\dot{x}_2(t) &= -x_2(t) + u^2(t) \\
\dot{x}_3(t) &= ln(x_2(t)) - 3 \cdot x_3(t) + 5 \cdot u(t) \\
y(t) &= 0,5 \cdot x_1(t) - x_2(t)
\end{aligned}$$

(a) Bestimmen Sie die Ruhelage $\underline{x}_R = (x_1, x_2, x_3)^T$ des Systems zum Eingang $u_R = 2$. Welchen Wert hat die Ausgangsgröße y in der Ruhelage?

(b) Linearisieren Sie das System um die Ruhelage $u_R = 2$ und bestimmen Sie die Zustandsdarstellung des Systems in Matrizenschreibweise.

Hinweis: Die folgenden Aufgabenteile (c)-(f) können unabhängig von (a) und (b) bearbeitet werden!

Bei der Linearisierung um eine andere Ruhelage erhält man folgende Zustandsgleichungen:

$$\begin{aligned}
\Delta\dot{x}_1(t) &= 0 \\
\Delta\dot{x}_2(t) &= -\Delta x_2(t) + 2\Delta u(t) \\
\Delta\dot{x}_3(t) &= \Delta x_1(t) - 3\Delta x_2(t) + 5 \cdot \Delta u(t) \\
\Delta y(t) &= 0,5 \cdot \Delta x_1(t) - \Delta x_2(t) \\
\Delta x_1(0) &= -1, \Delta x_2(0) = 3, \Delta x_3(0) = -1
\end{aligned}$$

Verwenden Sie für die nachfolgenden Aufgabenteile dieses System!

(c) Schreiben Sie das dynamische System in Matrizendarstellung.

(d) Stellen Sie das regelungstechnische Strukturbild für dieses System auf. Verwenden Sie nur einfache lineare Übertragungsglieder und vermeiden Sie Differenzierglieder.

(e) Wie lautet die Übertragungsfunktion des Systems?

(f) Ist dieses System stabil? Bitte Begründung angeben! Argumentieren Sie mit den Ihnen bekannten Stabilitätskriterien.

Aufgabe 3: Regelkreisanalyse

Gegeben sei ein Regelkreis mit der in der Abb. 3.1 gezeigten Struktur und folgenden Übertragungsfunktionen:

$$G_1(s) = 5 \qquad\qquad G_2(s) = \frac{2}{40s^2 + 14s + 1}$$

Als Regler $G_R(s)$ steht ein PI-Regler zur Verfügung.

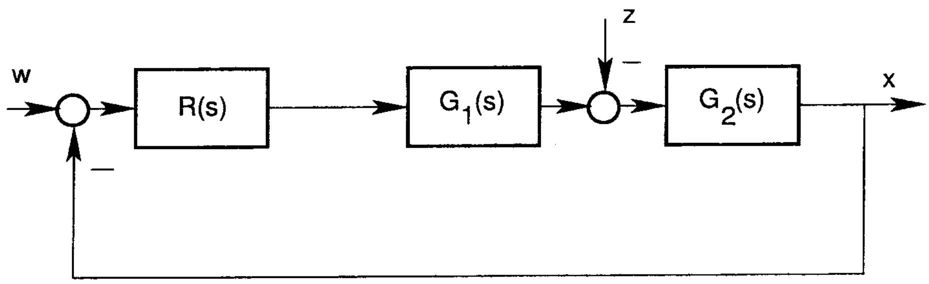


Abb. 3.1: Regelkreis

(a) Bestimmen Sie die Reglerparameter des Reglers vom Typ PI so, dass der Regelkreis stabil und möglichst schnell ist. Verwenden Sie hierfür ein beliebiges Stabilitätskriterium.

(b) Ist der Regelkreis bezüglich der Führungsgröße stationär genau? Begründung durch Rechnung!

Eine Möglichkeit zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens bezüglich einer Störgrößenänderung besteht in der geeigneten Aufschaltung der messbaren Störgröße. Dies erfolgt wie in Abb. 3.2 dargestellt:

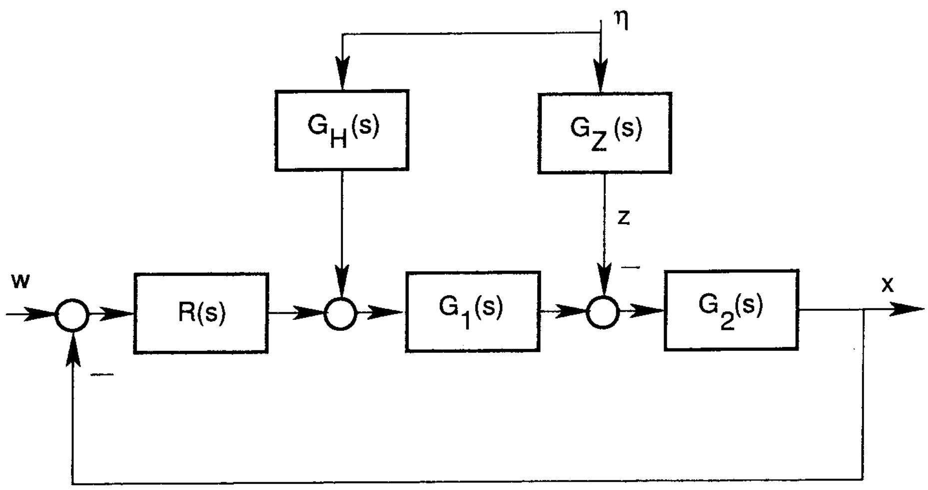


Abb. 3.2: Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung

(c) Zeigen Sie zunächst allgemein (durch Rechnung!), dass durch die Aufschaltung der Störgröße η über die beiden Übertragungsglieder $G_Z(s)$ und $G_H(s)$ die Stabilität des Gesamtsystems nicht beeinträchtigt wird.

(d) Ergibt sich durch die Aufschaltung eine Änderung des Führungsverhaltens? Bitte begründen Sie.

(e) Bestimmen Sie nun eine geeignete Übertragungsfunktion $G_H(s)$ derart, dass der Regelkreis eine Störgrößenänderung möglichst gut kompensiert. Setzen Sie hierfür $G_Z(s) = 1$ an.

(f) Ist der Regelkreis bezüglich der Störgröße stationär genau (inklusive der von Ihnen in Aufgabenteil (e) entworfenen Störgrößenaufschaltung)? Begründung durch Rechnung!

(g) Wäre der Regelkreis **ohne Störgrößenaufschaltung** stationär genau bezüglich der Störgröße? Verwenden Sie hierfür die Struktur in Abb. 3.1.

Aufgabe 4: Wurzelortskurve

Gegeben ist eine Regelstrecke mit Totzeit, die mit Hilfe eines linearen Reglers geregelt werden soll. Der rationale Teil der Übertragungsfunktion der Strecke ist gegeben durch:

$$G(s) = \frac{(s-1)}{(s+1)(s^2+1)} \tag{1}$$

Das Totzeitglied ist gemäß Abb. 4.1 in das Regelsystem eingebunden. Die Totzeit T_t beträgt 2sec.

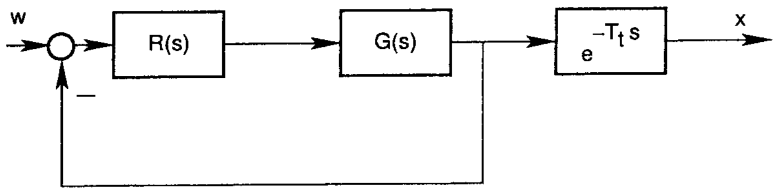


Abb. 4.1: Regelkreis mit Totzeitglied

$R(s)$ wird als Regler der Form

$$R(s) = K\left(\frac{T_n s + 1}{T_n/3 \cdot s + 1}\right) \tag{2}$$

angesetzt.

(a) Um welchen Reglertyp handelt es sich?

(b) Müssen Sie T_t für den Reglerentwurf berücksichtigen? Wenn ja, warum, wenn nein, warum nicht?

(c) Ist die Strecke (inklusive Totzeit, ohne Regler) stabil? Bitte Begründung angeben.

(d) Wählen Sie T_n geeignet und begründen Sie Ihre Wahl.

(e) Zeichnen Sie die Wurzelortskurve, berechnen Sie dazu u.a. die *Verzweigungspunkte*, die *Austrittswinkel* und *Asymptotenwinkel*, den *Stabilitätsbereich* für die Kreisverstärkung K. Zeichnen Sie die WOK auf dem beiligenden Millimeterpapier ein.

(f) Bestimmen Sie $K = K_1$ nun derart, dass sich für den **geschlossenen** Regelkreis eine Dämpfung von $d = 1$ einstellt. Wo liegen die Pole des geschlossenen Regelkreises, wenn $K < K_1$ und $K > K_1$ ist? (qualitative Skizze genügt!)

(g) Untersuchen Sie nun die Regelung auf stationäre Genauigkeit. Welche Bedingungen müssen dafür erfüllt sein? Inwiefern beeinflusst das Totzeitglied die stationäre Genauigkeit des gesamten Regelsystems?

Aufgabe 5: Allgemeine Fragen zur Regelungstechnik

(Bitte in kurzen Stichworten, bzw. mit Hilfe von Skizzen beantworten!)

(a) Was zeichnet ein Minimalphasenglied aus? Skizzieren Sie die Sprungantwort eines nichtminimalphasigen Systems

(b) Zeichnen Sie einen Regelkreis mit Kaskadenregelung. Erklären Sie dessen Vorteile gegenüber einem "herkömmlich" geregelten Kreis.

(c) Zeichnen Sie die Anordnung eines computergeregelten Systems. Erläutern Sie die Funktion der einzelnen Übertragungsglieder.

(d) Leiten Sie den einfachen (zeitdiskreten) PI-Geschwindigkeitsalgorithmus für ein computergeregeltes System her

Aufgabe 1: Regelkreisanalyse

Es sei ein Feder-Massen-System betrachtet, bei dem die Dämpfung vernachlässigbar ist (Reibkonstante ≈ 0) und die Federkraft proportional zur Auslenkung x von der Ruhelage ist (siehe Abb. 1.1).

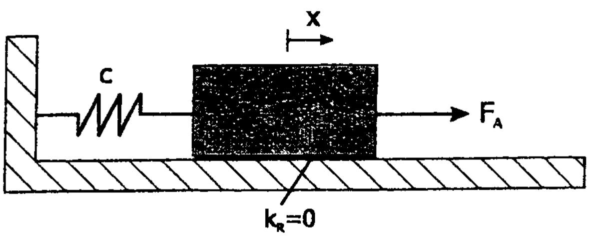


Abb. 1.1: Feder-Masse-System

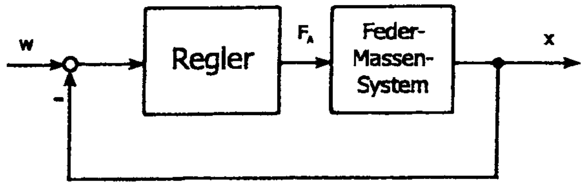


Abb. 1.2: Regelkreis

(a) Wie lautet die Differentialgleichung des Systems?

Das ungedämpfte Feder-Massen-System soll nun durch den Einsatz einer Regelung eine größere Dämpfung erhalten. Der Einfachheit halber sei angenommen, dass der Regler direkt die Stellgröße der Strecke ausgibt.

Als Reglerbausteine stehen die folgenden Übertragungsfunktionen mit $k \in]0..\infty[$ und $T, T_1, T_2 > 0$ zur Verfügung:

$$R_1(s) = k \qquad R_2(s) = k \cdot \frac{1+Ts}{s} \qquad R_3(s) = k \cdot \frac{1+T_1 s}{1+T_2 s}$$

(b) Stellen Sie fest, welcher der angegebenen Regler für die Aufgabenstellung der am besten geeignete ist. Beachten Sie hierbei insbesondere die grundsätzlichen Anforderungen an eine Regelung und begründen Sie Ihre Aussagen.

(c) Was ist bei dem von Ihnen nach Aufgabenteil (a) ausgewählten Regler bezüglich der praktischen Realisierung des Regelsystems zu beachten?

(d) Skizzieren Sie den qualitativen Verlauf der Ortskurve des offenen Regelkreises.

Hinweis: Verwenden Sie als Zeitkonstanten der Regler bei Bedarf folgende Werte: $T = 1$, $T_1 = 1$, $T_2 = 0,1$

(e) Ist der geschlossene Regelkreis für alle $k \in]0..\infty[$ stabil? Begründen Sie anhand des Nyquist-Kriteriums. Bestimmen Sie gegebenenfalls den Stabilitätsbereich des Regelkreises in Abhängigkeit von k.

Aufgabe 2: Zustandsdarstellung dynamischer Systeme

Gegeben ist das folgende nichtlineare dynamische System mit der Eingangsgröße $u(t)$, der Ausgangsgröße $y(t)$ und den Zustandsgrößen $x_1(t)$, $x_2(t)$ und $x_3(t)$:

$$
\begin{aligned}
\dot{x}_1(t) &= -2 \cdot x_1(t) \cdot x_2(t) \\
\dot{x}_2(t) &= -x_2(t) + u^3(t) \\
\dot{x}_3(t) &= x_2(t) - 3 \cdot x_3(t) + 5 \cdot u(t) \\
y(t) &= 0,5 \cdot x_1(t) - x_2(t)
\end{aligned}
$$

(a) Bestimmen Sie die Ruhelage $\underline{x}_R = (x_1, x_2, x_3)^T$ des Systems zum Eingang $u_R = 2$

(b) Linearisieren Sie das System um die Ruhelage $u_R = 2$ und bestimmen Sie die Zustandsdarstellung des Systems in Matrizenschreibweise.

Hinweis: Die folgenden Aufgabenteile (c)-(f) können unabhängig von (a) und (b) bearbeitet werden!

Bei der Linearisierung um eine andere Ruhelage erhält man folgende Zustandsgleichungen:

$$
\begin{aligned}
\Delta\dot{x}_1(t) &= -16 \cdot \Delta x_1(t) \\
\Delta\dot{x}_2(t) &= -\Delta x_2(t) + 12 \cdot \Delta u(t) \\
\Delta\dot{x}_3(t) &= \Delta x_2(t) - 3 \cdot \Delta x_3(t) + 5 \cdot \Delta u(t) \\
\Delta y(t) &= 0,5 \cdot \Delta x_1(t) - \Delta x_2(t)
\end{aligned}
$$

Verwenden Sie für die nachfolgenden Aufgabenteile dieses System!

(c) Schreiben Sie das dynamische System in Matrizendarstellung.

(d) Stellen Sie das regelungstechnische Strukturbild für dieses System auf. Verwenden Sie nur einfache lineare Ubertragungsglieder und vermeiden Sie Differenzierglieder.

(e) Wie lautet die Übertragungsfunktion des Systems?

(f) Ist dieses System stabil? Bitte Begründung angeben! Argumentieren Sie mit den Ihnen bekannten Stabilitätskriterien.

(c) Zeichnen Sie nun das Strukturbild des Regelkreises, indem Sie für den Regler die Übertragungsfunktion eines P-Reglers einsetzen.

(d) Zeichnen Sie für $K_P = 1$ die Frequenzkennlinien des offenen Regelkreises. Verwenden Sie hierfür bitte das beigefügte halblogarithmische Papier.

(e) Bestimmen Sie den Stabilitätsbereich des geschlossenen Regelkreises in Abhängigkeit des Faktors K_P.

(f) Ist der Regelkreis bezüglich einer **Störgrößenänderung** stationär genau? Bitte begründen Sie mit Hilfe einer kleinen Rechnung.

(g) Der Proportionalfaktor des Reglers sei nun fest auf $K_P = 0.2$ eingestellt. Wie klein darf die Bandgeschwindigkeit minimal sein, damit der geschlossene Regelkreis stabil ist?

Hinweis: Verwenden Sie hierfür die von Ihnen gezeichneten Frequenzkennlinien aus Aufgabenteil (d).

(h) Wie ändert sich das Strukturbild, wenn statt der Ventilstellung die Bandgeschwindigkeit v als Stellgröße gewählt wird? Können Sie für diesen Fall eine Übertragungsfunktion angeben?

Aufgabe 3: Frequenzkennlinien

Gegeben ist eine Anordnung zur Förderung von Schüttgütern, bei dem das zu fördernde Gut über ein Transportband in einen Behälter befördert wird:

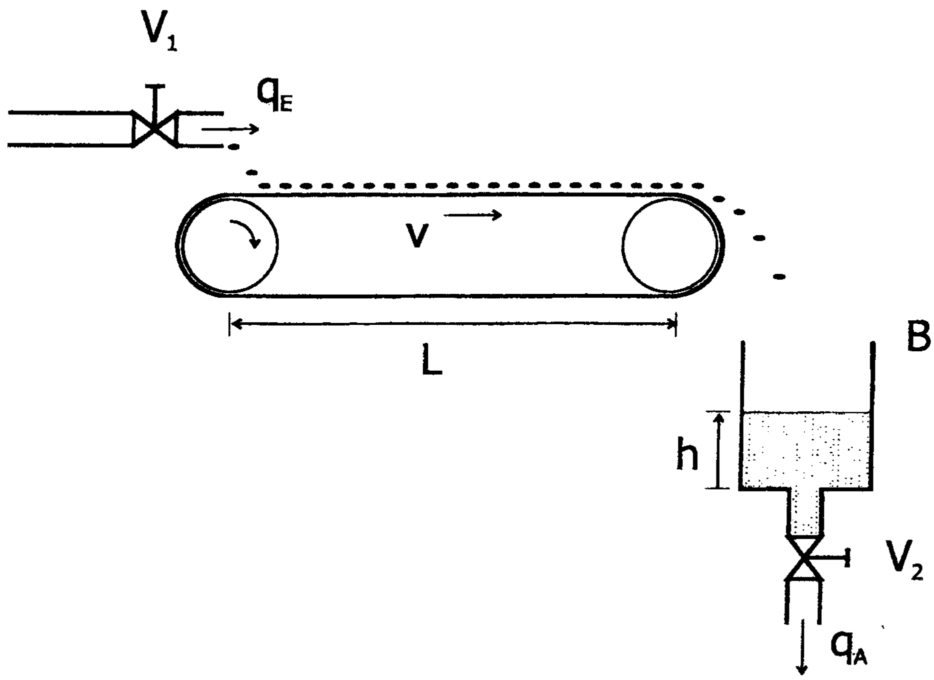


Abb. 3.1: Förderprozess

Das Transportband habe die Länge $L = 0,5\ m$ und eine Geschwindigkeit von $0,1\ m/s$. Der zylindrische Behälter habe eine Grundfläche von $0.1\ m^2$. Die Regelgröße sei die Füllhöhe h im Behälter B, die Stellgröße der zugeführte Volumenstrom q_E und die Störgröße der aus dem Behälter ausfließende Volumenstrom q_A. Die Bauteile des Systems können als ideal und näherungsweise linear betrachtet werden.

(a) Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion der Strecke. Beachten Sie dabei insbesondere die Verweildauer des Schüttgutes auf dem Förderband. Als Eingang der Strecke wird der Volumenstrom q_E, als Ausgang der Strecke die Regelgröße h betrachtet.

(b) Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion des Ventils V_1 als Stellglied. Der Volumenstrom q_E soll dabei als näherungsweise proportional (Faktor K_{V1}) zur Ventilstellung angesehen werden. Eingangsgröße des Stellgliedes ist der Reglerausgang u;

Verwenden Sie für die nun folgenden Aufgabenteile die folgende Übertragungsfunktion für Stellglied und Strecke:

$$G_S(s) \doteq 6 \cdot \frac{e^{-5 \cdot s}}{s}$$

Aufgabe 4: Wurzelortskurve

Gegeben sei der mit der Einheitsrückführung geschlossene Regelkreis mit der Übertragungsfunktion

$$G(s) = K \cdot \frac{s^2 - 2s + 2}{s^2 + 6s - T} \qquad K \in [0..\infty[\ ,\ T \geq 0$$

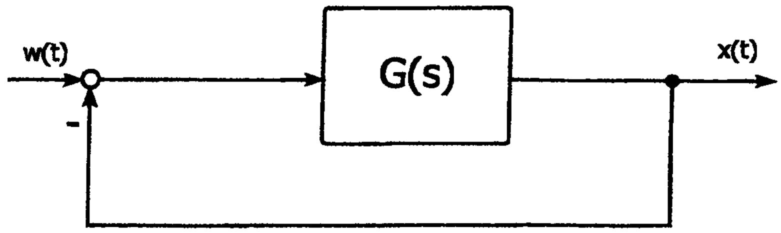


Abb. 4.1: Regelkreis mit Übertragungsfunktion G(s)

Der Faktor T sei zunächst fest zu $T = 0$ gesetzt.

(a) Konstruieren Sie die Wurzelortskurve des angegebenen Regelkreissystems, indem Sie das zur Verfügung gestellte Millimeterpapier verwenden und insbesondere die im Hinweis angegebenen Punkte untersuchen.

Hinweis: Bestimmen Sie für diesen Aufgabenteil unter anderem den Verzweigungspunkt, die Schnittwinkel im Verzweigungspunkt, Schnittpunkte mit der imaginären Achse, die Anstiegswinkel in den kritischen Stellen.

(b) Ist der Regelkreis für alle K (> 0) stabilisierbar? Geben Sie den eventuell vorhandenen Stabilitätsbereich in Abhängigkeit von K an.

(c) Für eine Anwendung ist der Regelkreis so einzustellen, dass der geschlossene Regelkreis keine Überschwinger bei Sprunganregung besitzt und trotzdem möglichst schnell ist. Wo müssen die Pole des geschlossenen Regelkreises liegen, damit diese Forderung erfüllt ist? Auf welchen Wert muss der Faktor K hierfür eingestellt werden?

(d) Sie erhalten nun die Möglichkeit, den Faktor T zu verändern. Können Sie T so einstellen, dass der geschlossene Regelkreis für alle K stabil ist? Bitte begründen Sie Ihre Antwort!

(e) Skizzieren Sie die Ortskurven der folgenden Übertragungsfunktionen:

$$G_1(s) = \frac{1}{s+1} \qquad G_2(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)(s+3)}$$

$$G_3(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)} \qquad G_4(s) = e^{-T_t s}$$

$$G_5(s) = \frac{s-1}{s+1}$$

(f) Macht das Nyquist-Kriterium eine Aussage über die Stabilität des *offenen* oder des *geschlossenen* Regelkreises?

(g) Kann mit Hilfe der Wurzelortskurve eine Aussage über das Stabilitätsverhalten des *offenen* Regelkreises gemacht werden?

Aufgabe 5: Allgemeine Fragen zur Regelungstechnik

(Bitte in kurzen Stichworten, bzw. mit Hilfe von Skizzen beantworten!)

(a) Wie lautet das grundsätzliche Stabilitätskriterium?

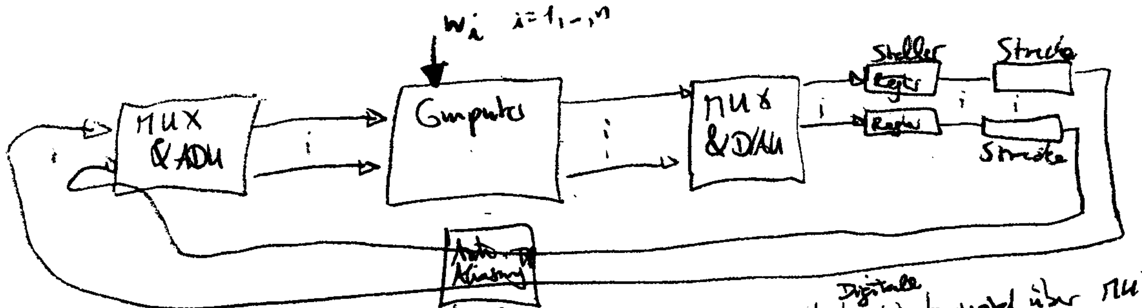
Die Pole der Übertragungsfunktion / des geschlossenen Regelkreises liegen alle auf der linken Seite der j-Achse (neg. Realteil).

(b) Warum werden bei den Frequenzkennlinien sowohl der Betrag des Frequenzgangs als auch die Kreisfrequenz logarithmisch aufgetragen?

Dadurch nutzt man die Möglichkeit, (leicht) gekrümmte Kennlinien asymptotisch vereinfacht aufzutragen

größere Frequenzspektren Stabilität

(c) Zeichnen Sie die Anordnung eines computergeregelten Systems. Erläutern Sie die Funktion der einzelnen Übertragungsglieder.



1) Computer berechnet w_i's, der berechnete digitale Wert wird über MUX & DAU den entsprechenden Stellgliedern als analoger Reglerausgang zugeführt, die erfasste Regelgröße wird dann digitalisiert dem Computer zugeführt, gehe zu 1)

(d) Gegeben sei der folgende Regelkreis:

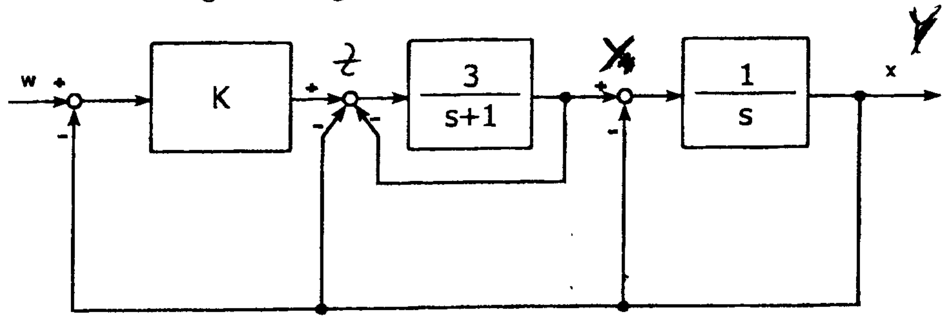


Abb. 5.2: Geschlossener Regelkreis

1. Bestimmen Sie die Führungsübertragungsfunktion des geschl. Regelkreises.
2. Ist der Regelkreis für alle K stabil? Begründen Sie mit Hilfe des Routh- **oder** Hurwitz-Kriteriums und geben Sie gegebenenfalls den Stabilitätsbereich an.

$$z = k \cdot w' - x - y \qquad w' = w - x$$

$$x = \frac{3}{s+1} z - y \qquad (y - x) \cdot \frac{1}{s} = x$$

$$y = x(s+1)$$

<u>Also:</u>

$$z = k(w-x) - x - y$$

$$y = (s+1)\,x$$

$$y = \frac{3}{s+1} z$$

$$\Rightarrow (s+1)x = \frac{3}{(s+1)}\left[k(w-x) - x - y\right]$$

$$(s+1)^2 x = 3k(w-x) - x - x(s+1)$$

$$(s+1)^2 x = 3kw - x(3k+1+s+1)$$

$$(s+1)^2 x + x(s+3k+2) = 3kw$$

$$(s^2+2s+1)x + xs + (3k+2)x = 3kw$$

$$(s^2+3s+3k+3)\,X(s) = 3k\,W(s)$$

$$\Rightarrow F_u(s) = \frac{X(s)}{W(s)} = \frac{3k}{s^2+3s+3k+3} = \frac{k}{\frac{1}{3}s^2 + s + k+1}$$

$$\left| \begin{array}{cc} 1 & 0 \\ \frac{1}{3} & k+1 \end{array} \right|$$

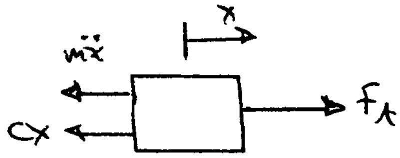
$\underline{k+1>0}$ & $\underline{k>-1}$

$\Rightarrow k>0$ Ja

NAME: Faruk Keskin MATRIKELNUMMER: 344609

1.

a)



$\sum F_i = 0$ $F_A = m\ddot{x} + cx$

$F_A(s) = s^2 m X(s) + c X(s)$

$\Rightarrow G_S(s) = \dfrac{1}{ms^2 + c}$

b)

	P	PI	PD (real)
$F_0(s)$	$\dfrac{k}{ms^2+c}$	$k\,\dfrac{1+Ts}{s(ms^2+c)}$	$k\,\dfrac{(1+T_1 s)}{(1+T_2 s)(ms^2+c)}$
$\bar{w}(s)$	$\dfrac{k}{ms^2+c+k}$	$\dfrac{k(1+Ts)}{ms^3+cs+k(1+Ts)}$	$\dfrac{k(1+T_1 s)}{(1+T_2 s)(ms^2+c)+k(1+T_1 s)}$
bed.?	$a_1=0$ kein Hurwitz Polynom $\Rightarrow$ instabil	$a_2=0$ kein Hurwitz Polynom $\Rightarrow$ instabil	$\dfrac{k(1+T_1 s)}{mT_2 s^3+ms^2+cT_2 s+c+k+T_1 s}$ H. Polynom

$\Rightarrow$ reales PD-Regler am geeignetsten, da stabil

$$\begin{vmatrix} m & c+k & 0 \\ mT_2 & T_1+cT_2 & 0 \\ 0 & m & c+k \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} m(T_1+cT_2)-(c+k) \\ >0 \\ mT_1 - k\,mT_2 > 0 \end{matrix}$$

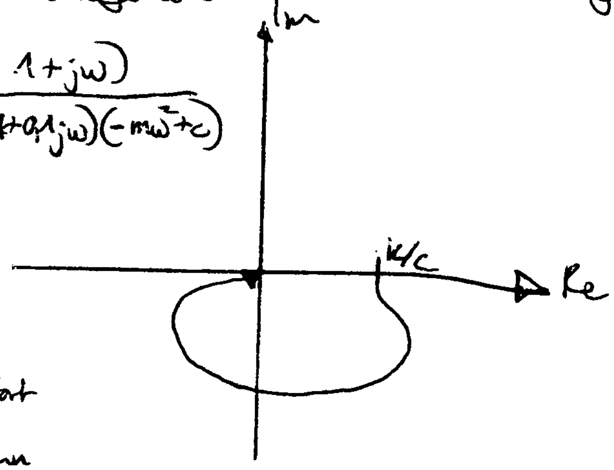
$\rightarrow$ für $k < \dfrac{T_1}{T_2}$

c) $T_2 \gg T_1$ sein, der Regler ist nicht stationär genau, da kein Integralverhalten vorhanden, ~~verz~~ verzögertes Verhalten (VZ-1 im Nenner des Reglers)

d) $F_0(j\omega) = k\,\dfrac{(1+T_1 j\omega)}{(1+T_2 j\omega)(m(j\omega)^2+c)} = k\,\dfrac{(1+j\omega)}{(1+0{,}1 j\omega)(-m\omega^2+c)}$

$F_0(0) = \dfrac{k}{c}$ $F_{0\,\omega\to\infty}$

$\angle F_0 = \underbrace{0 \le \varphi \le \tfrac{\pi}{2}}_{\substack{T_1 = 1 \\ \text{dreht zuerst}}} - \underbrace{0 \le \varphi \le \tfrac{\pi}{2}}_{\substack{T_2 = 0{,}1 \\ \text{dann}}} - \underbrace{0 \le \varphi_3 < \pi}_{\substack{\text{sofort} \\ \text{von beginn}}}$



e) Ja, immer stabil, da P-verhalten von $F_0(j\omega)$ und Ortskurve ist rechts von -1 !!

NAME: Faruk Keskin MATRIKELNUMMER: 344609

2. a) $x_R = (x_1, x_2, x_3)^T$ bei $u_R = 2$

$0 = -2x_1 \cdot x_2 \longrightarrow x_{1R} = 0$

$0 = -x_2 + u_R^3 \longrightarrow x_{2R} = 2^3 = 8 \qquad y_R = -x_{2R} = -8$

$0 = x_2 - 3x_3 + 5u_R \longrightarrow x_{3R} = \frac{18}{3} = 6$

$x_R = (0, 8, 6)^T$

b) $\Delta\dot{x}_1 = -2\underbrace{x_{2R}}_{=8}\cdot\Delta x_1 - 2\underbrace{x_{1R}}_{=0}\cdot\Delta x_2 = -16\Delta x_1$

$\Delta\dot{x}_2 = -\Delta x_2 + 3\cdot u_R^2\,\Delta u = -\Delta x_2 + 12\Delta u$

$\Delta\dot{x}_3 = \Delta x_2 - 3\Delta x_3 + 5\Delta u$

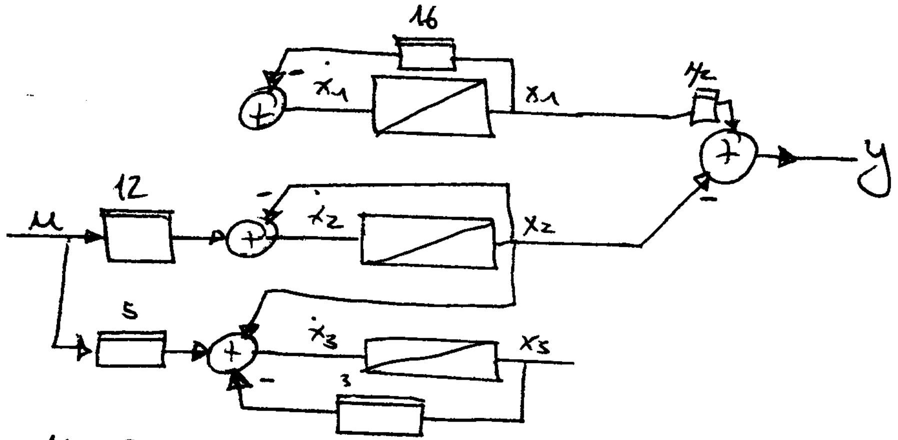
$\Delta y = 0{,}5\Delta x_1 - \Delta x_2$

$$\begin{pmatrix}\dot{x}_1\\ x_2\\ x_3\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}-16 & 0 & 0\\ 0 & -1 & 0\\ 0 & 1 & -3\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}0\\ 12\\ 5\end{pmatrix}u$$

$$y = \begin{pmatrix}1/2 & -1 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\end{pmatrix} + (0)\,u$$

c) s. b)

d)



e) $s\,X_1(s) = -16\,X_1(s)$

$X_1(s)(s+16) = 0 \Rightarrow X_1(s) = 0$

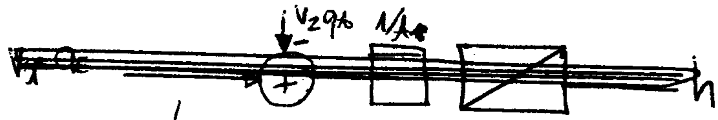
$s\,X_2(s) = -X_2(s) + 12\,U(s)$

$(s+1)\,X_2(s) = 12\,U(s) \Rightarrow G_{x_2}(s) = \frac{12}{s+1} \qquad G_y(s) = \frac{-12}{s+1}$

f) Ja, Systemmatrix (A) hat nur Eigenwerte < 0 !

NAME: Frank Koslein MATRIKELNUMMER: 344609

3 a) $L = 0{,}5\,m \quad v = 0{,}1\,\frac{m}{s}$



$$\underbrace{\Big(\underbrace{V_1 q_E}_{\text{(Eingang)}} \cdot \underbrace{e^{-\frac{L}{v}s}}_{\text{Verweildauer}} \cdot \cancel{\ldots} \cdot \cancel{\ldots} - \underbrace{V_2 q_a}_{\text{Störung}} \Big) \underbrace{\frac{1}{A_1}}_{\text{Fläche}} \cdot \underbrace{\frac{1}{s}}_{\text{Integration}}}_{\text{Strecke mit Störung}} = h$$

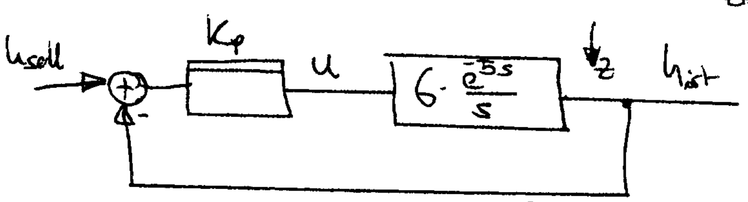
$$\frac{H(s)}{Q_E(s)} = G_S(s) = V_1 \cdot e^{-\frac{L}{v}s} \cdot \frac{1}{A_1 s} = \frac{V_1}{A_1} \cdot \frac{e^{-5s}}{s}$$

b) $G_{V1} = K_{V1} = \frac{U(s)}{Q_E(s)}$ da $U(s) = K_{V1} \cdot Q_E(s)$

$$\Rightarrow K_{V1} \cdot \frac{V_1}{A_1} \cdot \frac{e^{-5s}}{s} \overset{!}{=} 6 \cdot \frac{e^{-5s}}{s}$$

~~$Z(s) = \frac{V_2}{A_1} Q_A(s)$~~ $Z(s) = \frac{V_2}{A_1} Q_A(s)$

c)



d) Hilfsmittel! $F_o(s) = K_p \cdot 6 \, \frac{e^{-5s}}{s}$ $\quad K_p = 1 \quad F_o(s) = \frac{6}{s} \cdot e^{-5s}$

e) $|6K|_{dB} = 10 \Rightarrow 6K = 3{,}16 \quad K = 0{,}527 \quad \underline{\underline{K > 0{,}527}}$

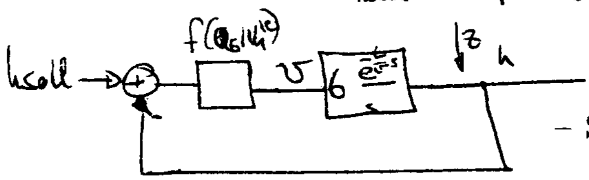
f) $G_z(s) = \frac{1}{1 + 6K_p \cdot \frac{e^{-5s}}{s}} Z(s) = \frac{s}{s + 6K_p \cdot e^{-5s}} \cancel{Z(s)} \quad G_z(0) = \frac{0}{6K_p} = 0$

g) $\underline{\underline{\omega_D = 0{,}85}}$ bei $T_t = 5$ instabil! $\quad \frac{1}{T_t} = 0{,}55 \Rightarrow T_t \approx 1{,}82$

$$T_t \overset{!}{=} 1{,}82\,s = \frac{L}{v} = \frac{0{,}5\,m}{v} = 1{,}82\,s = \frac{1\,m}{2v} = 1{,}82\,s$$

$v_{min} \approx 0{,}275$

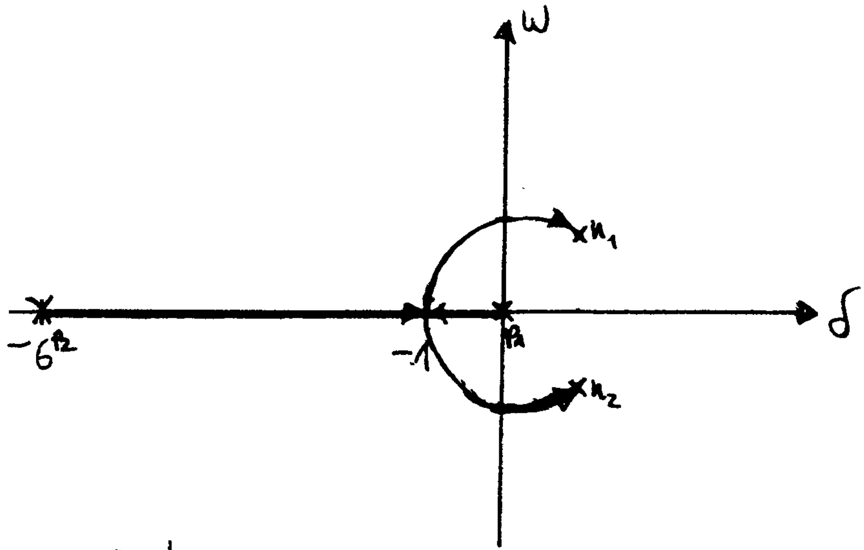
h)



Nichtlinear ⇒ keine ÜF!!

NAME: Fanke Katrin MATRIKELNUMMER: 344603

4. a) $G(s) = k\frac{(s-1)^2+1}{s(s+6)}$ $n_{1,2} = 1 \pm j$ $p_1 = 0 \quad p_2 = -6$ $n = m = 2 \Rightarrow$ kein Pol geht ins ∞ (keine Asymptoten)



Verzweigungspunkt: δ_V!

$$\frac{2(\delta-1)}{(\delta-1)^2+1^2} - \frac{1}{\delta} - \frac{1}{\delta+6} = 0$$

$$2(\delta-1)\delta(\delta+6) - \delta((\delta-1)^2+1) - (\delta+6)((\delta-1)^2+1) = 0$$

$$2\delta^3 - 2\delta^2 + 12\delta^2 - 12\delta - [(2\delta+6)(\delta^2-2\delta+2)] = 0$$

$$\cancel{2\delta^3} - \cancel{2\delta^2} + 12\delta^2 - \cancel{12}\delta - \cancel{2\delta^3} - 6\delta^2 + \cancel{4\delta^2} + \cancel{12\delta} - 4\delta - 12 = 0$$

$$8\delta^2 - 4\delta - 12 = 0 \qquad \delta^2 - \frac{1}{2}\delta - \frac{3}{2} = 0 \qquad \delta_{1,2} = \frac{1}{4} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{4}\right)^2 + \frac{3}{2}}$$

$$\delta_{1,2} = \frac{1}{4} \pm \sqrt{\frac{1}{16} + \frac{24}{16}} = \frac{1}{4} \pm \sqrt{\frac{25}{16}} = \frac{1}{4} \pm \frac{5}{4} = \begin{cases} \to 3/2 \text{ (nicht auf WOK)} \\ \to -1 \to \delta_V \end{cases}$$

$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ = Schnittwinkel im Verzweigungspunkt

Schnittpunkt j-Achse: $k(j\omega-1)^2 + k + j\omega(j\omega+6) = 0$

$$k(-\omega^2 - 2j\omega + 1) + k + 6j\omega - \omega^2 = 0$$

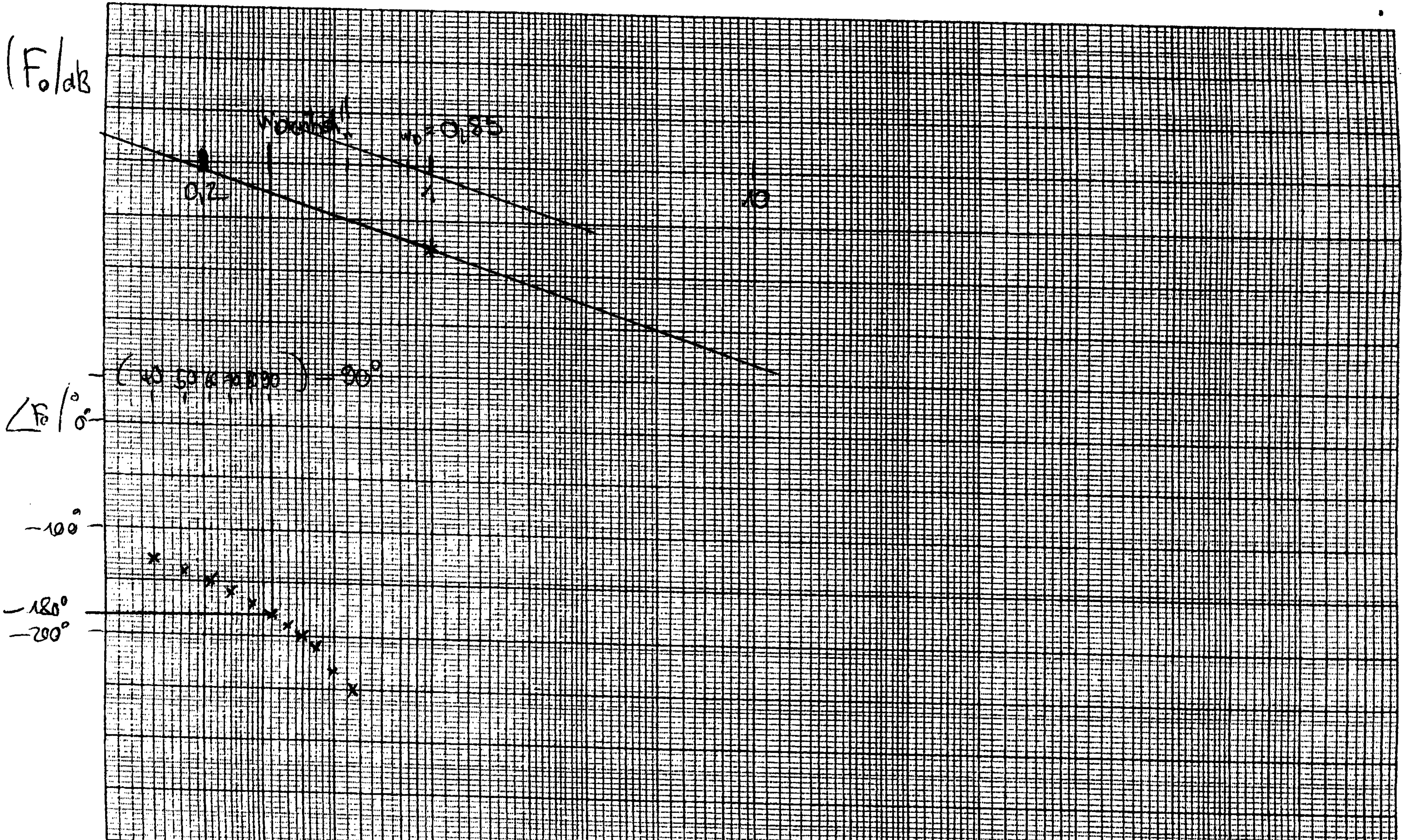
$$-\omega^2 k - 2j\omega k + 2k + 6j\omega - \omega^2 = 0 \Rightarrow j\omega(6-2k) + 2k - \omega^2(k+1)$$

$$\Rightarrow k = 3 \ \& \ 6 - 4\omega^2 = 0 \quad \omega^2 = \frac{6}{4} = \frac{3}{2}$$

Austrittswinkel: $p_1 = -\pi \quad p_2 = 0$ (s. Bild) $\omega = \sqrt{3/2} = 1{,}22$

$\varphi_{n_{10}} = -1[90° - 30° - 10°] + \pi = 130° \qquad \varphi_{n_{20}} = -130°$ (Symmetrie!)

b) $k < 3$ siehe Schnittpunkt j-Achse! c) doppelter Pol im δ_V: $k = \frac{(5)(1)}{\sqrt{5}\sqrt{5}} = \underline{\underline{1}}$



Lehrstuhl für Regelungstechnik und Signaltheorie - Universität Kaiserslautern

1/8

NAME: MATRIKELNUMMER:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik / Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Pandit

26. März 2001

DIPLOMHAUPTPRÜFUNG IM FACH REGELUNGSTECHNIK I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder **nicht**programmier**barer** Taschenrechner, Schreib- und Zeichenmaterial. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke, lose Blätter oder programmierbare Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, halblogarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1. Schreiben Sie auf **jedes** Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer, insbesondere auf Millimeter- und halblogarithmisches Papier.
2. Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluss an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).
3. Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern können nur dann berücksichtigt werden, wenn Verweise hierzu auf den vorbereiteten Lösungsblättern stehen und die Blätter mit Namen und Matrikelnummern versehen sind.
4. Schreiben Sie nicht mit Bleistift. Zeichnungen dürfen mit Bleistift ausgeführt werden. Bitte keinen Rotstift verwenden.
5. Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel (auch Schmierblätter) in die Doppelbögen gehüllt ab.
6. Die Klausur muss wieder in gehefteter Form abgegeben werden.

Aufgabe 1: Hurwitz-Kriterium

(a) Geben Sie allgemein die notwendige und hinreichende Bedingung zur Stabilität eines Übertragungssystems nach Routh **oder** Hurwitz an.

Gegeben sei die Übertragungsfunktion eines offenen Regelkreises $F_o(s)$ zu

$$F_o(s) = K \cdot \frac{s-1}{s^2+2s+5} \qquad K \in \mathbb{R}$$

(b) Geben Sie unter Verwendung des von Ihnen gewählten Stabilitätskriteriums (Hurwitz **oder** Routh) den Stabilitätsbereich des **offenen** Regelkreises in Abhängigkeit von der Verstärkung K an.

(c) Geben Sie unter Verwendung des von Ihnen gewählten Stabilitätskriteriums den Stabilitätsbereich des **geschlossenen** Regelkreises (Einheitsrückführung) in Abhängigkeit von der Verstärkung K an.

Betrachten Sie nun den mit der Messeinrichtung

$$G_M(s) = \frac{1}{T_M \cdot s + 1} \qquad (T_M > 0)$$

geschlossenen Regelkreis (siehe Abb. 1.1).

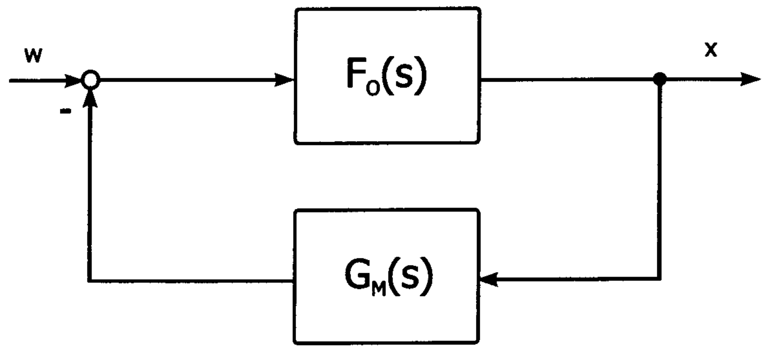


Abb. 1.1: Geschlossener Regelkreis mit Messeinrichtung

(c) Geben Sie unter Verwendung des von Ihnen gewählten Stabilitätskriteriums den Stabilitätsbereich des **geschlossenen** Regelkreises in Abhängigkeit von der Verstärkung K und der Konstanten T_M an.

(d) Für welche Verstärkungsfaktoren K ist der **geschlossene** Regelkreis stationär genau?

2/6

Aufgabe 2: Zustandsdarstellung dynamischer Systeme

Gegeben ist der in der Abbildung 2.1 gezeigte konstant erregte Gleichstrommotor mit Ankerspannungsverstellung, sowie die am physikalischen System gültigen Beziehungen und Konstanten:

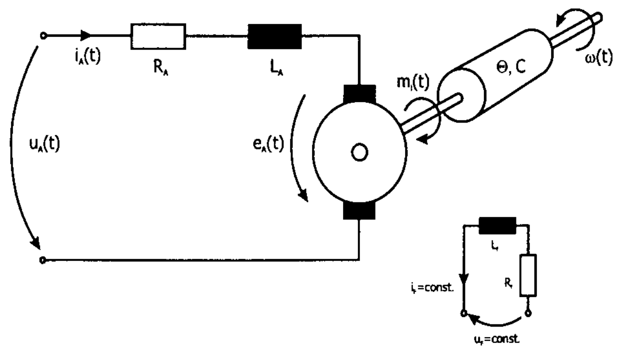


Abb. 2.1: Gleichstrommotor

(1) $e_A(t) = k_1 \cdot \omega(t)$

(2) $m(t) = k_2 \cdot i_A(t)$

(3) $\theta \cdot \dot{\omega}(t) + C \cdot \omega(t) = m(t) - m_l(t)$

$e_A(t)$: im Anker induzierte Spannung
$\omega(t)$: Winkelgeschwindigkeit
k_1, k_2: Konstanten
θ: Trägheitsmoment der rot. Masse
C: Gleitreibungskonstante

(a) Stellen Sie die Zustandsgleichungen des Systems auf.

Hinweis:

- Betrachten Sie den Spannungsumlauf im Ankerkreis (die restlichen Beziehungen sind in oben angegebenen Gleichungen aufgeführt)
- $u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$

Für eine bestimmte Gleichstrommaschine wurden zusätzlich zu den oben angegebenen Gleichungen (Gln. (1) - (3)) folgende Beziehungen ermittelt:

$$\frac{di_A(t)}{dt} = -2 \cdot i_A(t) - 5 \cdot \omega(t) + u_A(t) \qquad \frac{d\omega(t)}{dt} = -3 \cdot \omega(t) + 4 \cdot i_A(t) - 6 \cdot m_l(t)$$

(b) Geben Sie die Zustandsgleichungen in Matrizenform an. Verwenden Sie dabei folgende Zustands-, Ein- und Ausgangsgrößen:

$$x_1 = i_A \quad x_2 = \omega \quad u_1 = u_A \quad u_2 = m_l \quad y_1 = \omega \quad y_2 = m - m_l$$

(c) Zeichnen Sie das regelungstechnische Strukturbild der Gleichstrommaschine. Vermeiden Sie die Verwendung von Differenziergliedern.

(d) Ist das System linear? Begründung angeben!

(e) Besitzt das System Durchgriff? Begründung angeben!

(f) Ergänzen Sie das Strukturbild durch eine Anordnung für die Drehzahlregelung.

3/6

Aufgabe 3: Frequenzkennlinien

Gegeben ist der Regelkreis in Abbildung 3.1

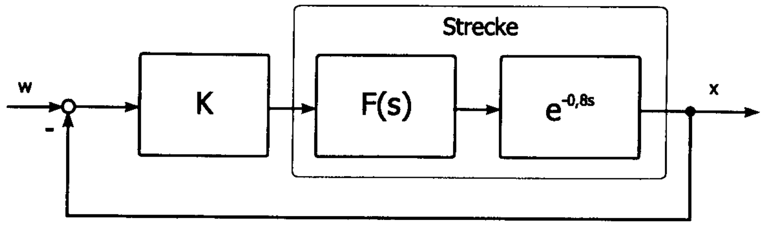


Abb. 3.1: Regelkreis

mit

$$F(s) = \frac{5}{(1,25s+1)(0,25s+1)}$$

(a) Zeichnen Sie für $k = 1$ die Frequenzkennlinien des offenen Regelkreises.

(b) Ist der geschlossene Regelkreis für $k = 1$ stabil oder instabil? Begründung angeben!

(c) Für welche Werte von k ist der geschlossene Regelkreis stabil?

(d) Entwerfen Sie nun einen **realen** PID-Regler, damit eine Phasenreserve von $\varphi_R = 55°$ vorliegt.

Hinweis:

- Wählen Sie für $T_N = 0,1 \cdot T_2$
- $T_2 < T_1$

(e) Bestimmen Sie

$$\lim_{t \to \infty} x(t)$$

des geschlossenen Regelkreises für den von Ihnen entworfenen PID-Regler aus Aufgabenteil (d).

Aufgabe 4: Wurzelortskurve

Gegeben ist der Regelkreis in Abb. 4.1 bestehend aus einer Strecke, einem idealen PD-Regler und einer Einheitsrückführung.

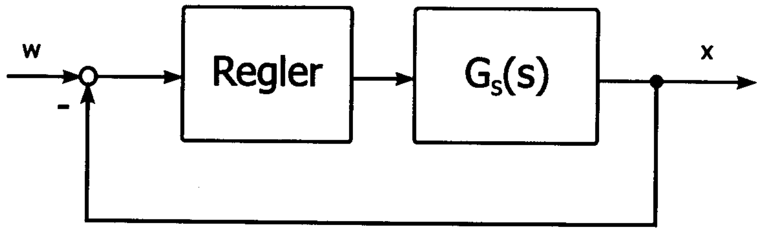


Abb. 4.1: Regelkreis mit Einheitsrückführung

Die Übertragungsfunktion $G_{PD1}(s)$ des idealen PD-Reglers sowie die Übertragungsfunktion $G_S(s)$ der Regelstrecke seien gegeben durch:

$$G_{PD1}(s) = K \cdot (s+2) \qquad\qquad G_S(s) = \frac{1}{s^2 + 2 \cdot s + 2}$$

(a) Konstruieren Sie die Wurzelortskurve zu obigem Regelkreis. Verwenden Sie hierzu das bereitgestellte Millimeterpapier.
Berechnen Sie hierzu u.a. auch:

- Anstiegswinkel der Asymptoten
- Verzweigungspunkte
- Stabilitätsbereich in Abhängigkeit von der Reglerverstärkung
- Anstiegswinkel in den kritischen Stellen

(b) Für welche Werte der Reglerverstärkung K treten keine Überschwinger nach Sollwertsprüngen auf?

(c) Für welche Reglerverstärkungen $K = K_{max}$ ist die Dämpfung des Regelkreises am geringsten? Wie groß ist in diesem Falle die Dämpfung d_{max}?

(d) Der ideale PD-Regler werde nun durch einen realen PD-Regler mit folgender Übertragungsfunktion ersetzt:

$$G_{PD2}(s) = K \cdot \frac{s+2}{0.2 \cdot s + 1}$$

Man skizziere den qualitativen Verlauf der Wurzelortskurve.

Hinweis: Es existieren bei diesem Aufgabenteil keine Verzweigungspunkte.

5/6

Aufgabe 5: Allgemeine Fragen zur Regelungstechnik

(Bitte in kurzen Stichworten, bzw. mit Hilfe von Skizzen beantworten!)

(a) (1.) Welche Forderungen werden an eine Regelung gestellt?

(2.) Welche Eigenschaften des realen Prozesses begrenzen die realisierbare Regelgüte?

(b) Skizzieren Sie die Ortskurven der Übertragungsfunktionen. Tragen Sie insbesondere die Punkte für $\omega \to 0$ und $\omega \to \infty$ auf.

1. $\dfrac{2s+1}{3s^2+2s}$ 2. $\dfrac{e^{-T_t s}}{1+Ts}$ 3. $\dfrac{2}{1+3s}$

(c) Ist es möglich, ein Übertragungsglied G_K so zu bestimmen, dass die Regelkreise in Abb. 5.2 und 5.3 die gleiche Führungs- bzw. Stör-Übertragungsfunktion besitzen?

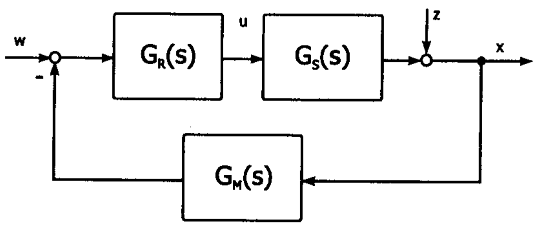


Abb. 5.2: Regelkreis 1

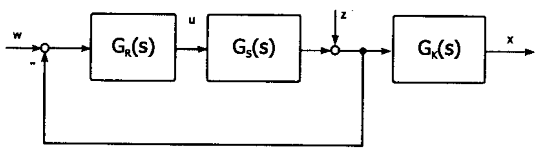


Abb. 5.3: Regelkreis 2

(d) Abb. 5.4 zeigt eine Füllstandsregelung für einen Behälter mit der Grundfläche A. Zwischen Wasserzu- und -abfluss und der Füllhöhe h(t) gilt der Zusammenhang

$$h(t) = \frac{1}{A} \int_0^t (q_e(\tau) - q_a(\tau))d\tau$$

Bei Erreichen des Füllstandes h_{max} ist $q_e(t) = 0$; bei leerem Behälter $(h = 0)$ ist $q_e(t) = q_{max}$. Abb. 5.5 zeigt die zeitlichen Verläufe von $h(t)$ und $q_a(t)$.

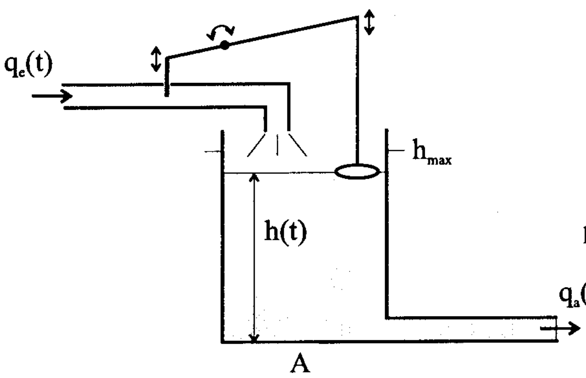


Abb. 5.4: Füllstandsregelung

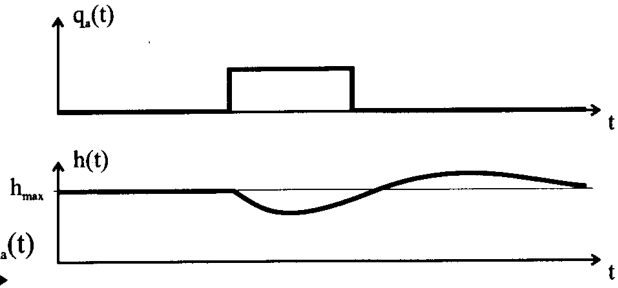


Abb. 5.5: Zeitliche Verläufe

Ist der Verlauf von h(t) qualitativ richtig? Korrigieren Sie gegebenenfalls den Verlauf von h(t).

F01

1. a) Das Nennerpolynom muß der Form $a_0 s^n + \dots + a_n$ entsprechen, wobei alle a_i das gleiche Vorzeichen besitzen $\hat{=}$ Hurwitz-Polynom (notwendige Bed.)
Hinreichend für die Stabilität: ~~ist~~ alle NW-Unterdeterminanten der Hurwitz-Matrix der Form

$$H = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & \cdots & 0 \\ a_0 & a_2 & \cdots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \cdots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 \cdots & a_n \end{vmatrix}$$

müssen positiv sein

$\Delta \neq 0$

b) $F_0(s) = \dfrac{k(s-1)}{s^2+2s+5}$ H.P. $\begin{vmatrix} 2 & 0 \\ 1 & 5 \end{vmatrix}$ $10 > 0$ stabil $\forall k$

c₁) $F_W(s) = \dfrac{k(s-1)}{s^2+2s+5+k(s-1)} = \dfrac{k(s-1)}{s^2+(2+k)s+5-k}$

also $(2+k) > 0$ $5-k > 0$ $\underline{\underline{-2 < k < 5}}$

$\begin{vmatrix} 2+k & 0 \\ 1 & 5-k \end{vmatrix}$ $(2+k)(5-k) > 0$

$10 + 3k - k^2 > 0$ $k^2 - 3k - 10 < 0$

$k_{1,2} = \frac{3}{2} \pm \sqrt{\frac{9}{4}+10} = \frac{3}{2} \pm \sqrt{\frac{49}{4}} = \frac{3}{2} \pm \frac{5}{2}$

c₂)

$$F_W(s) = \frac{k\frac{(s-1)}{(s^2+2s+5)}}{1+\frac{k(s-1)}{(s^2+2s+5)(T_m s+1)}} = \frac{k(s-1)(T_m s+1)}{(s^2+2s+5)(T_m s+1)+k(s-1)}$$

$$= \frac{k(s-1)(T_m s+1)}{T_m s^3+2T_m s^2+5T_m s+s^2+2s+5+ks-k} = \frac{Z(s)}{T_m s^3+(2T_m+1)s^2+(5T_m+2+k)s+5-k}$$

$T_m > 0 \Rightarrow 2T_m+1 > 0$ $5T_m+2+k > 0$ $5-k > 0 \Rightarrow k < 5$

$k > -(5T_m+2)$

$$\det H = \begin{vmatrix} 2T_m+1 & 5-k & 0 \\ T_m & 5T_m+2+k & 0 \\ 0 & 2T_m+1 & 5-k \end{vmatrix}$$

$(2T_m+1)(5T_m+2+k) - (5-k)T_m > 0$

$10T_m^2 + 5T_m + 4T_m + 2 + 2T_m k + k - 5T_m + kT_m > 0$

$10T_m^2 + 4T_m + 3kT_m + k + 2 > 0$

$10T_m^2 + T_m(4+3k) + k+2 > 0$

$4+3k+\frac{k+2}{T_m} > -10T_m$

$\frac{k(3T_m+1)}{T_m} > -10T_m - \frac{2}{T_m} - 4$

$\lim_{t\to\infty} e_m = \frac{1}{1+F_0(0)} = \frac{1}{1-\frac{k}{5}} = \frac{5}{5-k}$

$k > \dfrac{-10T_m^2 - 2 - 4T_m}{(3T_m+1)}$

d) $F_W(0) = \dfrac{-k}{5-k} = \dfrac{k}{k-5}$ $\to 1$ für $k \to \infty$ $k < 5$

... instabil !!!

2a) $u_A = i_A R_A + L \dot{i}_A + e_A(t)$

$$\dot{i}_A = -\frac{R_A}{L} i_A - \frac{e_A(t)}{L} + \frac{u_A}{L} = \frac{u_A}{L} - \frac{R_A}{L} i_A - \frac{k_1}{L}\omega(t)$$

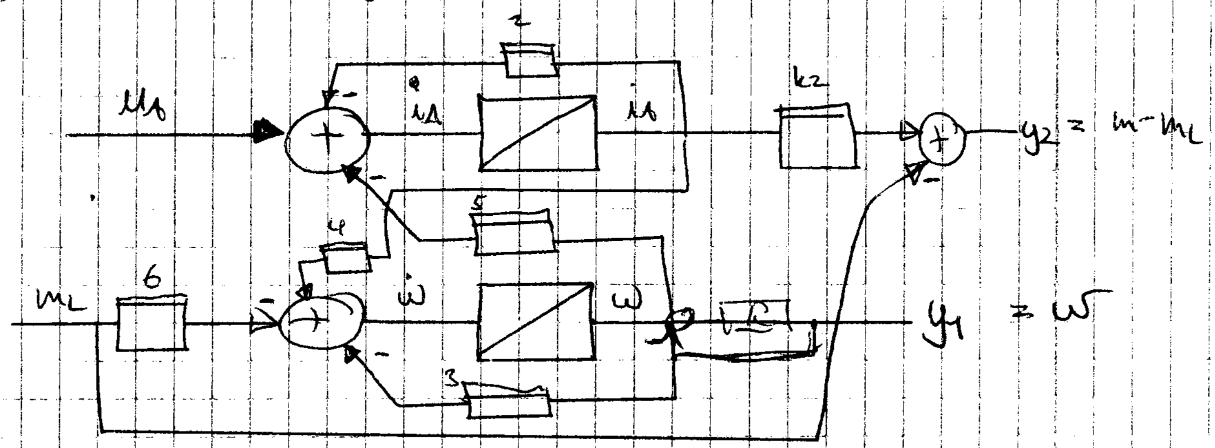
$$\dot{\omega}(t) = \frac{1}{\Theta}\left(m(t) - m_L(t)\right) - \frac{c}{\Theta}\omega(t)$$

$$\dot{\omega}(t) = \frac{1}{\Theta}\left(k_2 i_A - m_L\right) - \frac{c}{\Theta}\omega(t)$$

b)
$$\begin{pmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 & -5 \\ 4 & -3 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_A \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -6 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_A \\ m \quad m_L \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \omega \\ m - m_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ k_2 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_A \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_A \\ m_L \end{pmatrix}$$

c)



d) Koeffizienten der Matrizen sind konstant!

e) Ja, $[D] \neq [0]$ m_L wirkt direkt zum Ausgang geschaltet!

f) Drehzahlregelung?! Ist schon da!!

F01

3a) $F_0(s) = \frac{5k}{(1+\frac{5}{4}s)(1+\frac{1}{4}s)} \cdot e^{-\frac{8}{10}s} \Big|_{k=1}$

$|5|_{dB} \approx 14$

b) instabil $\omega_D = 4$ $\omega_{D\,max(stabil)} = 1{,}29$

$\varphi_R < 0°$

c) $|5k|_{dB} = 7{,}5$ $5k = 10^{7{,}5/20} = 2{,}37$ $k = 0{,}474$ $0 < k < 0{,}47$

d) reales PID-Regler: $F_0(s) = \frac{5kk_R}{s(1+0{,}025s)} e^{-\frac{1}{1{,}25}s}$

$\omega_{D\,(\varphi_R=35°)} = 0{,}7$

$|5kk_R|_{dB} = 3{,}5$ $5kk_R = 10^{3{,}5/20} \approx 1{,}5$

$kk_R = 0{,}3$ $k_R = \frac{0{,}3}{k}\Big|_{k=0{,}474} \approx 0$

e) $F_0(s)$ hat I-Anteil und Regelkreis stabil

$\lim_{t\to\infty} x(t) = \underline{\underline{1}}$ stationär genau!

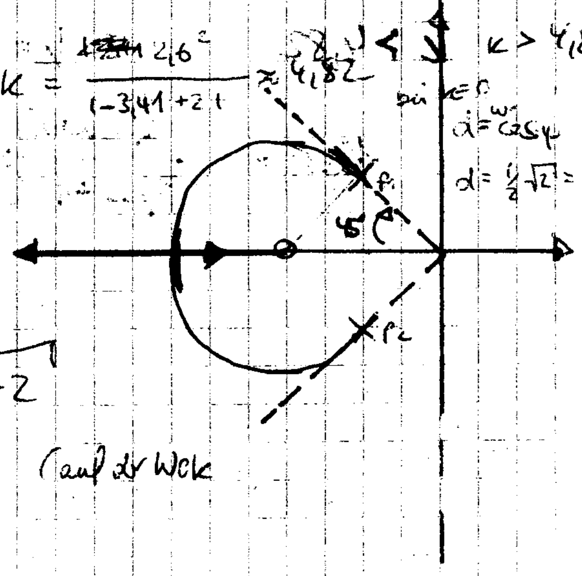
4a) $F_0(s) = \frac{k(s+2)}{s^2+2s+2} = \frac{k(s+2)}{(s+1)^2+1}$ $n = -2$ $p_{1,2} = -1 \pm j$

$\sigma_W = \frac{-2-(-2)}{-1} = \underline{\underline{0}}$ $\varphi_W = (2i+1)\frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$

$\sigma_V = ?$ $\frac{1}{\sigma+2} - \frac{2(\sigma+1)}{(\sigma+1)^2+1} = 0$

b) $k = \frac{2{,}6^2}{(-3{,}41+2)} \approx 4{,}82$ $k > 4{,}8$

bei $k=0$: $d = \frac{\omega}{\cos\varphi}$ $d = \frac{1}{2}\sqrt{2} = 0$



$\sigma^2 + 2\sigma + 2 - 2\sigma^2 - 6\sigma - 4 = 0$

$-\sigma^2 - 4\sigma - 2 = 0$

$\sigma^2 + 4\sigma + 2 = 0$ $\sigma_{1,2} = -2 \pm \sqrt{4-2}$

$\sigma_{1,2} = -2 - \sqrt{2}$ (auf der WOK)

$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$

$\varphi_{no} = -\pi$ (s. Bild) $\varphi_{p1o} = 1(45° - 90°) - 180° = -225° = 135°$

$\varphi_{p2o} = -135°$ (Symmetrie!)

$\forall k$ stabil

Stabilität: $k(j\omega+2) + (j\omega+1)^2 + 1 = 0$

$j\omega k + 2k + (-\omega^2 + 2j\omega + 2) = 0$ $-\omega^2 + 2k + 2 = 0$ & $j\omega(k+2)$ keine Lö

Test erwähnte Werk:

$$\mathrm{Im}\, P_0(s) \cdot \mathrm{Re}\, Q_0(s) - \mathrm{Re}\, P_0(s) \cdot \mathrm{Im}\, Q_0(s) = 0$$

$$\frac{k(\delta + j\omega + 2)}{(\delta+j\omega)^2 + 2(\delta + j\omega) + 2} \Rightarrow j\omega k \cdot \left[\delta^2 - \omega^2 + 2(\delta+1)\right] - k(\delta+2)\left[j\omega(2+2\delta)\right] = 0$$

$$\delta^2 + j2\omega\delta - \omega^2 + 2(\delta+1) + 2j\omega$$

$$j\omega\left[\delta^2 - \omega^2 + 2\delta + 2\right] - j\omega 2(\delta+2)(\delta+1) = 0$$

$$\delta^2 - \omega^2 + 2\delta + 2 - 2\left[\delta^2 + 2\delta + \delta + 2\right] = 0$$

$$-\delta^2 - \omega^2 - 2\delta - 2\delta - 2 = 0$$

$$\delta^2 + 4\delta + 2 + \omega^2 = 0$$

$$(\delta+2)^2 - 2 + \omega^2 = 0$$

$$\omega^2 + (\delta+2)^2 = 2$$

$$\delta^2 + 2\delta + 4 = 2$$

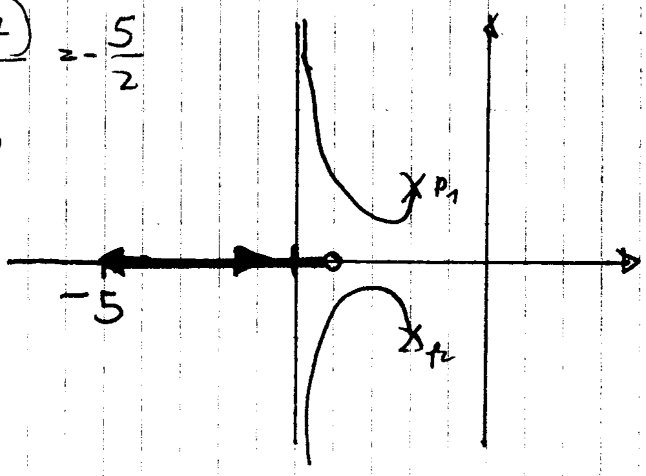
$$\omega^2 = 1$$

b) $k > 4{,}82$ $\qquad k = 0 \quad d = \frac{1}{2}\sqrt{2} = 0{,}707$

$$F_0(s) = \frac{k(s+2)}{(0{,}25s+1)((s+1)^2+1)} = \frac{5k(s+2)}{(s+5)((s+1)^2+1)}$$

$$\delta_W = \frac{-2-(2+7)}{-2} = -\frac{5}{2}$$

$$\varphi_{P} = (45^\circ - 90^\circ - 15^\circ) - 180^\circ$$
$$= -60^\circ - 180^\circ = -270^\circ$$



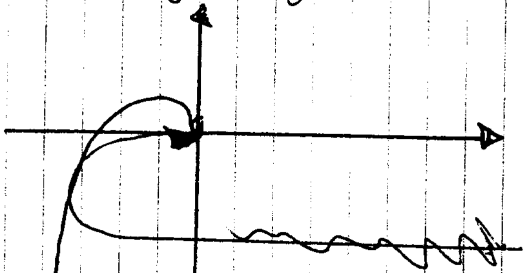
c) $k = 0 \quad d = \cos\varphi = \frac{1}{2}\sqrt{2}$

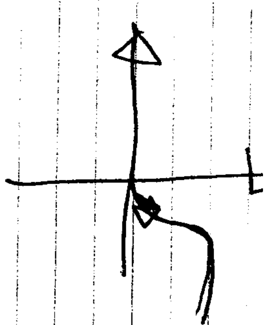
5. a) 1. Stabilität, Dämpfung, Stationäre Genauigkeit, Dämpfung

2. Störwellenrauschen, Stellbegrenzung, Nichtlinearitäten

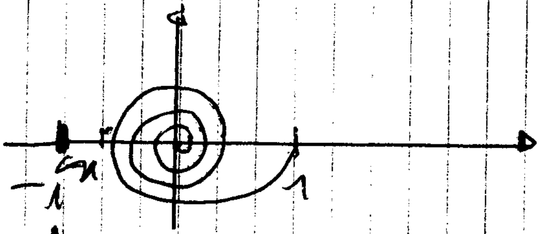
b) 1. $\frac{(1+2s)}{s(3s^2+2)}$

von $-\pi/2$ bis $-\pi$

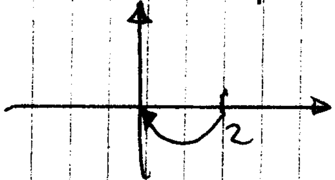




2. $\frac{e^{-T_t s}}{1+Ts} = \left|\frac{1}{\sqrt{1+T^2\omega^2}}\right| \cdot e^{-j\omega T_t} \cdot e^{-j\arctan(j\omega T)}$



3. $\frac{2}{1+3s}$



c)

$$F_{W_{R1}}(s) = \frac{G_R \cdot G_S}{1 + G_R G_S G_M} W(s) + \frac{1}{1+G_R G_S G_M} Z(s)$$

$$F_{WR1}(s) = \frac{G_{RS}}{1+G_{RSM}} W(s) + \frac{1}{1+G_{RSM}} Z(s)$$

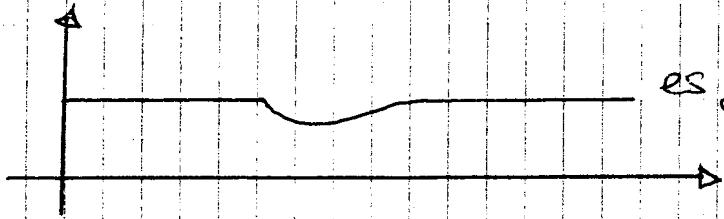
$$F_{WR2}(s) = ?\left(\frac{G_{RS}}{1+G_{RS}} W + \frac{1}{1+G_{RS}} Z\right) G_K$$

$$F_{WR2}(s) = \frac{G_{RS} \cdot G_K}{1+G_{RS}} W + \frac{G_K}{1+G_{RS}} Z$$

$$\Rightarrow \frac{\cancel{G_{RS}}}{1+G_{RS} \cdot G_M} \overset{!}{=} \frac{\cancel{G_{RS}} \cdot G_K}{1+G_{RS}}$$

$$G_K \overset{!}{=} \frac{1+G_{RS}}{1+G_{RS} \cdot G_M}$$

d)



es gibt keinen Überschwung!!

F 2a

1a) Alle Koeffizienten von $N(s)$ gleiches VZ u. kein Koeffizient darf fehlen (auch hinreichend für quadr. Polynome)

H_ν für $\nu = 1 \dots n$ (alle nordwestl. Unterdeterminanten von H müssen positiv sein

1b)

s^2+2s+5

$s_{1,2} = -1 \pm \sqrt{1-5}$

$= -1 \pm j2$) stabil unabh. von K da $a_0, a_1, a_2 > 0$

c)

$$F_w(s) = \frac{F_o(s)}{F_o(s)+1} \cdot \frac{Z(s)}{Z(s)+N(s)} = \frac{K(s-1)}{K(s-1)+s^2+2s+5}$$

$$= K \frac{s-1}{s^2+(2+K)s+5-K}$$

$2+K > 0 \qquad K > -2$

$5-K > 0 \qquad K < 5$

$-2 < K < 5$

d)

$$F_w(s) = \frac{F_o(s)}{1+F_o(s)\cdot G_M(s)} = \frac{\frac{K(s-1)}{s^2+2s+5}}{1+\frac{K(s-1)}{s^2+2s+5}\cdot\frac{1}{T_M\cdot s+1}}$$

$$= \frac{K(s-1)(T_M s+1)}{(s^2+2s+5)(T_M\cdot s+1)+K(s-1)}$$

$$= \frac{K(s-1)(T_M s+1)}{s^3\cdot T_M+s^2+2T_M s^2+2s+5T_M\cdot s+5+Ks-K}$$

$$= \frac{K(s-1)(T_M\cdot s+1)}{\underbrace{T_M}_{a_3} s^3+\underbrace{(1+2T_M)}_{a_1} s^2+\underbrace{(2+5T_M+K)}_{a_2}\cdot s+\underbrace{5-K}_{a_2}}$$

F 2a

d)

$$H = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+2T_M & 5-K & 0 \\ T_M & 2+5T_M+K & 0 \\ 0 & 1+2T_M & 5-K \end{bmatrix}$$

$$H_1 = 1+2T_M = a_1$$

$$H_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = (1+2T_M)\cdot(2+5T_M+K) - T_M(5-K)$$

$$H_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_3 \cdot H_2 = (5-K)\cdot H_2$$

$$1+2T_M > 0 \Rightarrow T_M > -\frac{1}{2}$$

$$(1+2T_M)(2+5T_M+K) - T_M(5-K) > 0$$

$$(2+5T_M+K+4T_M+10T_M^2+2T_M K) - T_M(5-K) > 0$$

$$10T_M^2 + (5+4-5+K+2K)T_M + K + 2 > 0$$

$$10T_M^2 + (3K+4)T_M + K + 2 > 0 \quad \text{Hurwitz Polynom}$$

$$10 > 0, \quad 3K+4 > 0 \Rightarrow K > -\frac{4}{3} \quad K+2 > 0 \Rightarrow K > -2$$

$$5-K > 0 \Rightarrow K < 5$$

$$-\frac{4}{3} < K < 5$$

$T_M > -\frac{1}{2}$ u. $T_M > 0$ notw. Bed. $T_M = a_0$

e)

$$F_0(s) = K \cdot \frac{-1}{5} \cdot \overset{1}{\overset{\shortparallel}{G(0)}}$$

$x_{d\infty} = \frac{1}{\cancel{1+}\frac{K}{5}} \overset{?}{=} 0$ für $K \to \infty$ nicht st. genau da $K < 5$

2 a) F 2001

$$u_A = u_{RA} + u_{LA} + e_A = R_A \cdot i_A + L_A \, \dot{i}_A + k_1 \cdot \omega$$

$$\dot{i}_A = -\frac{R_A}{L_A} \cdot i_A - \frac{k_1}{L_A} \omega + \frac{1}{L_A} u_A$$

$$\dot{\omega} = -\frac{c}{\Theta} \omega + \frac{m}{\Theta} - \frac{m_L}{\Theta}$$

$$= -\frac{c}{\Theta} \omega + \frac{k_2}{\Theta} i_A - \frac{m_L}{\Theta}$$

b)

$$\dot{x}_1 = \dot{i}_A = -2 \, i_A - 5 \, \omega + u_A$$

$$\dot{x}_2 = \dot{\omega} = -3 \, \omega + 4 \, i_A - 6 \, m_L$$

$$y_1 = \omega$$

$$y_2 = m - m_L = k_2 \cdot i_A - m_L$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & -5 \\ 4 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

c)

d) ...

e) ... $D \neq 0$

FO1
FO1

3 a)

$$F_0(s) = \frac{5K \cdot e^{-0,8s}}{(1+1,25s)(1+0,25s)}$$

$\omega_1 = 0,8 \qquad \omega_2 = 4$

b) Ja, da Phase $< -180°$ bei ω_D

c) $20 \log K = -6\,dB$

$$K = 10^{-\frac{6}{20}} = 0,5$$

$$K \leq 0,5$$

d) $$G_{PID} = K_{PID} \cdot \frac{(1+T_1 s)(1+T_2 s)}{s(1+T_N s)}$$

$$\left.\begin{array}{l} T_1 = 1,25 \\ T_2 = 0,25 \end{array}\right\} \text{wegen Schnelligkeit}$$

$$T_N = 0,1 \cdot T_2 = 0,025$$

$$F_0(s) = \frac{5 \cdot K \cdot K_{PID} \cdot e^{-0,8s}}{s(1+0,025s)}$$

$$20 \cdot \log(K \cdot K_{PID}) = 3\,dB$$

$$K \cdot K_{PID} = 10^{\frac{3}{20}} = 1,41$$

e)

$$\lim_{t \to \infty} x(t) = \lim_{s \to 0} s \cdot X(s) = \lim_{s \to 0} s \cdot W(s) \cdot F_W(s) \qquad W(s) = \frac{1}{s}$$

$$= \lim_{s \to 0} F_W(s) = F_W(0) = \frac{\cancel{\frac{5 \cdot K \cdot K_{PID}}{0}}}{\cancel{1 + \frac{5 \cdot K \cdot K_{PID}}{0}}} = \underline{\underline{1}}$$

$$F_W(s) = \frac{F_0(s)}{\ldots} = \frac{5 \cdot K \cdot K_{PID} \cdot e^{-0,8s}}{\ldots}$$

4a)

FC

$$F_0(s) = \frac{k \cdot (s+2)}{s^2+2s+2}$$

$$\cancel{s^2+2s+2=0}$$

$$\cancel{s^2+2s+\left(\tfrac{1}{2}\right)^2 = -2+\left(\tfrac{1}{2}\right)^2}$$

$$\cancel{\left(s+\tfrac{1}{2}\right)^2 = -\tfrac{7}{4}}$$

$$\cancel{s_{1/2} =}$$

$$s^2+2s+1 = -2+1$$

$$(s+1)^2 = -1$$

$$s_{1/2} = -1 \pm j1$$

$$F_0(s) = \frac{k \cdot (s+2)}{(s+1-j)(s+1+j)}$$

$p_1 = -1+j \qquad n_1 = -2$

$p_2 = -1-j$

$n = 2 \qquad m = 1$

$n-m = 1$ Ast $\to \infty$

$$\delta_w = \frac{-2+2}{1} = 0$$

$$\varphi_i = (2i+1)\cdot\frac{\pi}{n-m} \qquad i = 0 \ldots (n-m-1)$$

$$\varphi_0 = \pi$$

$$-\frac{1}{s+1-j} - \frac{1}{s+1+j} + \frac{1}{s+2} = 0$$

$$-(s+2)(s+1+j) - (s+2)\cdot(s+1-j) + s^2+2s+2 = 0$$

$$-(s^2+s+js+2s+2+j2) - (s^2+s-js+2s+2-j2) + s^2+2s+2 = 0$$

$$-2s^2-6s-4+s^2+2s+2 = 0$$

$$-s^2-4s-2 = 0$$

$$s^2+4s+2^2 = -2+2^2 \qquad s_{1,2} = -2 \pm \sqrt{\ } \qquad s_1 = -0{,}58

4 a)

$k \cdot Z(j\omega) + N(j\omega) = 0$

$k \cdot (j\omega + 2) + (j\omega)^2 + 2j\omega + 2 = 0$

$2k + 2 - \omega^2 + j\omega(k+2) = 0$

Im: $\omega(k+2) = 0 \Rightarrow k = -2$

Re $2k + 2 - \omega^2 = 0$

$k = -2 \Rightarrow (\omega^2 = -2)$?

$\omega = 0 \Rightarrow k = -1$

$-1 < k < -2$

$\varphi_{p1} = -\angle p_1 - p_2 + \angle p_1 - n_1 - \pi$

$= -\angle 2j + \angle 1 + j - \pi$

$= -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} - \pi = -\frac{5}{4}\pi = \frac{3}{4}\pi$

$\varphi_{p2} = -\angle p_2 - p_1 + \angle p_2 - n_1 - \pi$

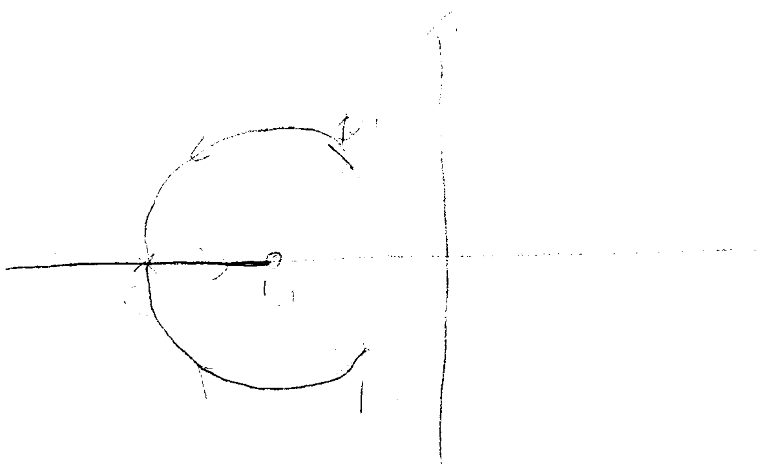
$= -\angle -2j + \angle 1 - j - \pi$

$= +\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4} - \pi = -\frac{3}{4}\pi$

$\varphi_{n1} = +\angle n_1 - p_1 + \angle n_1 - p_2 + \pi$

$= \angle -1 + j + \angle -1 - j + \pi$

$= \frac{3}{4}\pi + \frac{5}{4}\pi + \pi = \pi$



4b)

$|F_0(s)| = 1$

keine Überschwinger bei $s_2 = -3{,}41$ aperiodischer Grenz

$$\left| K \cdot \frac{Z(s)}{N(s)} \right| = 1$$

$$K = \left| \frac{N(s)}{Z(s)} \right| = \left| \frac{s^2+2s+2}{s+2} \right| = |-4{,}83| = +4{,}83$$

4c) für $K=0$ Dämpfung am geringsten

$d_{min} = \cos 45° = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$

4d) $$F_0(s) = \frac{K \cdot (s+2)}{(0{,}2s+1)(s^2+2s+2)} = \frac{5K\,(s+2)}{(s+5)(s+1-j)(s-1-j)}$$

$p_1 = -1+j$ $\quad n_1 = -2$

$p_2 = -1-j$

$p_3 = -5$

$n = 3$ $\quad m = 1$

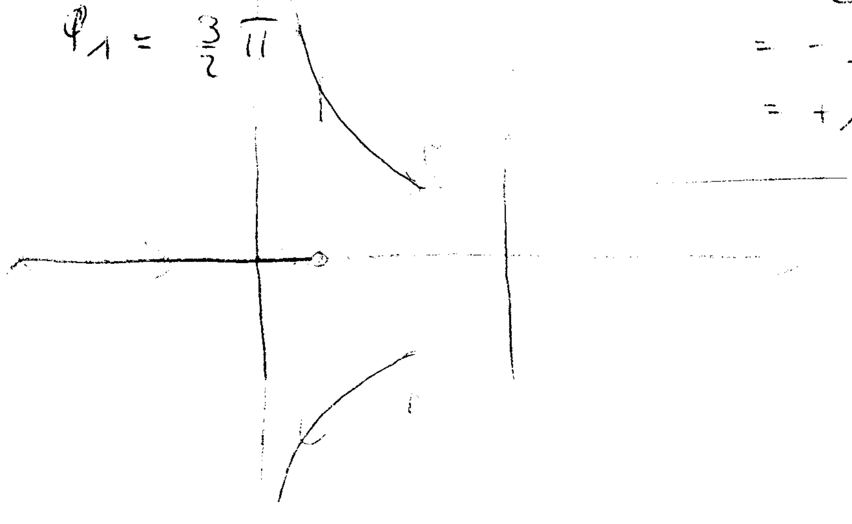
2 Äste $\to \infty$

$$\delta_W = \frac{-7+2}{2} = -\frac{5}{2} = -2{,}5$$

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$$

$$\varphi_1 = \frac{3}{2}\pi$$

$$\varphi_{p1} = -\angle p_1 p_2 - \angle p_1 p_3 + \angle p_1 n - \pi$$
$$= -\angle 2j - \angle 4+j + \angle 1+j - \pi$$
$$= -\frac{\pi}{2} - 14° + \frac{\pi}{4} - \pi$$
$$= +121°$$



⑤ 90/

a) 1) Stabilität
svat. Genauigkeit
Schnelligkeit
Dämpfung

2) Messrauschen, Störungen, Nichtlinearitäten, Modellungenauigkeit

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

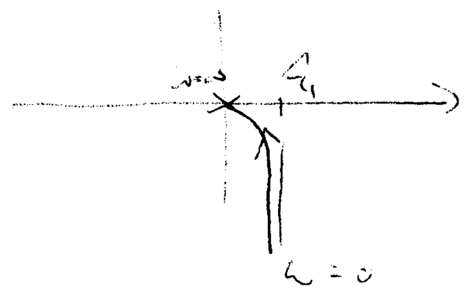
$$G(j\omega) = \frac{2j\omega+1}{3(j\omega)^2+2j\omega} = \frac{1+2j\omega}{-3\omega^2+2j\omega} = \frac{(1+2j\omega)(-3\omega^2-2j\omega)}{9\omega^4+4\omega^2}$$

$$= \frac{-3\omega^2-2j\omega-6j\omega^3-4(j\omega)^2}{\omega^2(9\omega^2+4)} = \frac{-3\omega^2+4\omega^2+j\omega(-2-6}{\omega^2(9\omega^2+4)}$$

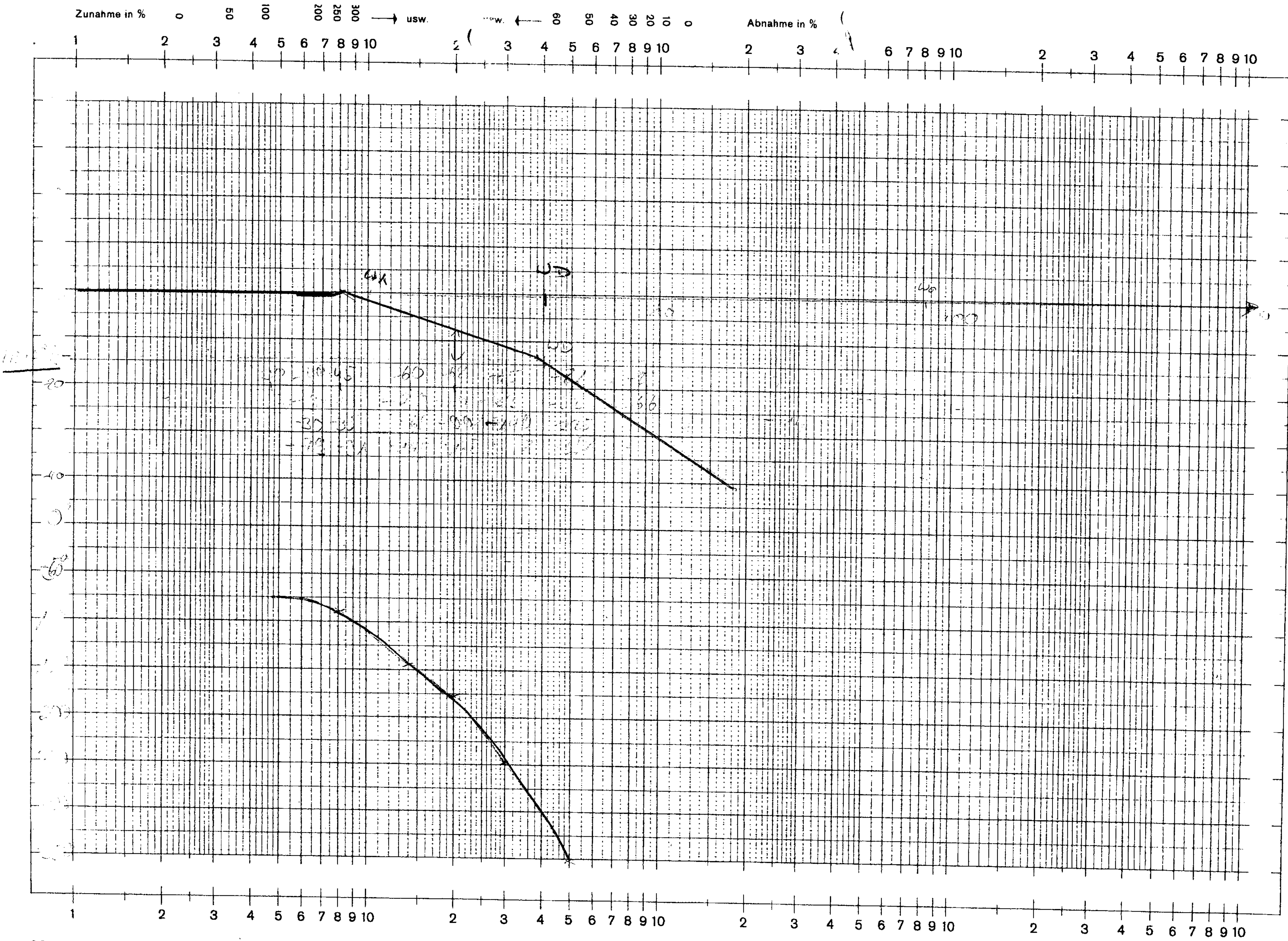
$$= \frac{\omega^2+j\omega(-2-6\omega)}{\omega^2(9\omega^2+4)} = \frac{1}{9\omega^2+4} - j\cancel{\omega}\frac{2+6\omega}{\omega(9\omega+4}$$

$$G(j0) = \frac{1}{4} - j\infty$$

$$G(j\infty) = 0 - j0$$



TO1 (3)



Zunahme in %
0 50 100 200 250 300 → usw.
usw. ← 60 50 40 30 20 10 0
Abnahme in %
ωk
ωD
ωe

HÜ1 3. a) $F_0(s) = \frac{5k\, e^{-\frac{1}{128}s}}{(1+\frac{1}{0{,}8}s)^{?}(1+\frac{1}{4}s)}$ $\quad |5|_{dB} = 13{,}98 \approx 14$

b) $\varphi_R < 0°$ instabil bei $w_D = 4$

c) $w_D \leq 1{,}8$ $\quad |5k|_{dB} = 14 - 6{,}5 = 7{,}5$ $\quad 5k = 10^{7{,}5/20} = 2{,}37 \quad k = 0{,}47$

stabil ~~für~~ für ~~k~~ $0 < k < 0{,}474$

d) $G_R(s) = k_R \frac{(1+T_1 s)(1+T_2 s)}{s(1+T_N s)}$ $\quad T_1 = 1{,}25 \quad T_2 = 0{,}25 \quad T_N = 0{,}025$

$\varphi_R = 55°$ $\quad \varphi = -125° \hat{=} (\text{Totzeit} / \text{Integralanteil} / \angle(1+\frac{1}{40}s))$

$|5kk_R|_{dB} = -2$ $\quad kk_R = 0{,}158$ $\quad k_R = \frac{0{,}158}{k}\Big|_{k=0{,}47} \approx 1/3$

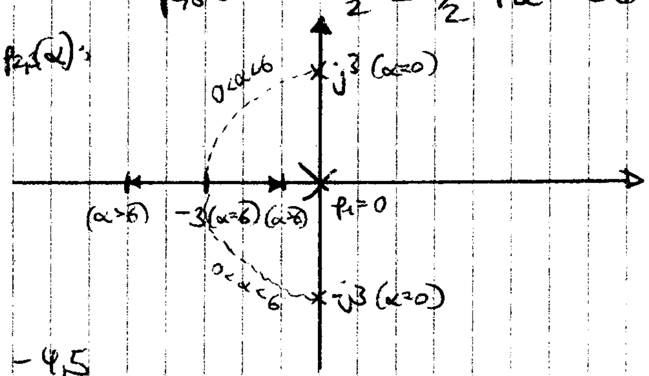
e) stabil & I-Verhalten $\Rightarrow \lim\limits_{t\to\infty} x(t) = 1$

4. a) $G(s) = \frac{10k_P}{s(s^2+\alpha s+9)}$ $\quad p_1 = 0$ $\quad p_{2,3}(\alpha) = -\frac{\alpha}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{4} - 9}$

$p_{2,3}(\alpha) = -\frac{\alpha}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{\alpha^2 - 36}$

$n = 3 \quad m = 0 \quad$ 3 Äste gegen ∞

$p_{2,3}(\alpha)$:



$\delta_W = \frac{\alpha}{-3} = -\frac{\alpha}{3}$

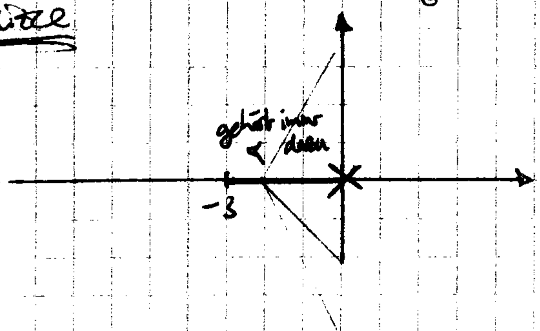
$\varphi_W = \frac{(2i+1)\pi}{3} = \frac{\pi}{3}, \pi, -\frac{\pi}{3}$

$\delta_V = ?$ $\quad \alpha = 0 \quad \frac{1}{\delta} + \frac{2}{\delta} \Rightarrow \delta_V = -4{,}5$

$\alpha = 6 \quad \frac{1}{\delta} + \frac{2}{\delta+3} \Rightarrow \delta_V = -1$

$\alpha > 6 \quad \cancel{\frac{1}{\delta} + \frac{2(\delta+\frac{\alpha}{2} + \sqrt{\frac{\alpha^2}{4}-9})}{\delta+\frac{\alpha}{2}}}$ $\quad \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta+\frac{\alpha}{2}-\sqrt{\frac{\alpha^2}{4}-9}} + \frac{1}{\delta+\frac{\alpha}{2}+\sqrt{\frac{\alpha^2}{4}-9}} = 0$

Skizze



$(\delta+\frac{\alpha}{2})^2 - \frac{\alpha^2}{4} + 9 + 2\delta = 0$

$\delta^2 + \alpha\delta + \frac{\alpha^2}{4} - \frac{\alpha^2}{4} + 9 + 2\delta = 0 \Rightarrow \delta^2 + (\alpha+2)\delta + 9 = 0$

$\delta_{1,2} = -\frac{(\alpha+2)}{2} \pm \sqrt{\frac{(\alpha+2)^2}{4} - 9}$

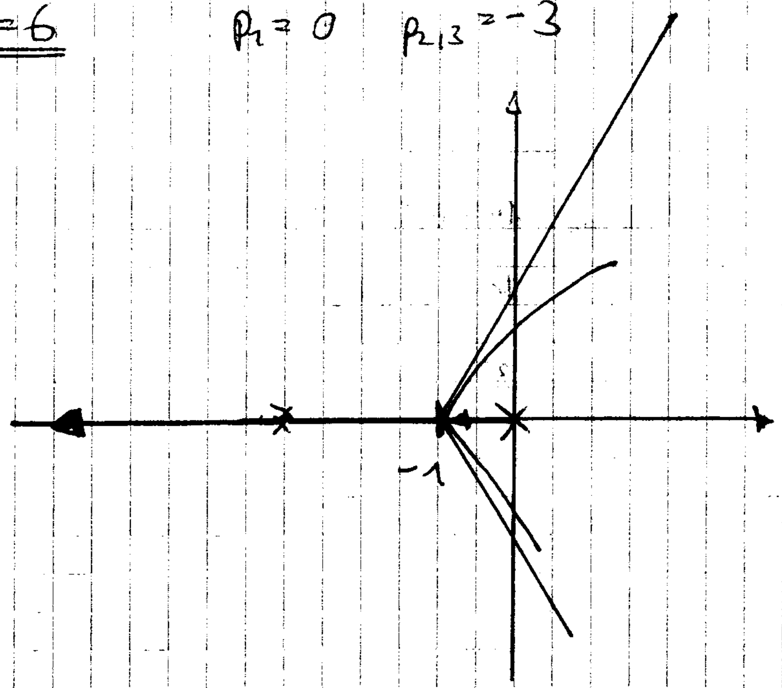
$\delta_{1,2} = -\left(\frac{\alpha}{2}+1\right) \pm \frac{1}{2}\sqrt{\alpha^2+2\alpha+4-36} = -\left(\frac{\alpha}{2}+1\right) \pm \frac{1}{2}\sqrt{\alpha^2+2\alpha}$

$\delta_V = -\frac{\alpha+2}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\alpha^2+2\alpha-32}$

$0 < \alpha < 6$: $\quad \cancel{\delta_V\ 1 < \delta_V < 0}$

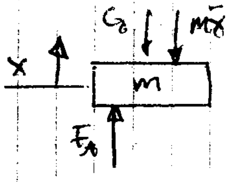
$-4{,}5 < \delta_V \leq -1$

b) ~~α≥6~~ $\underline{\underline{\alpha = 6}}$ $p_1 = 0$ $p_{2,3} = -3$



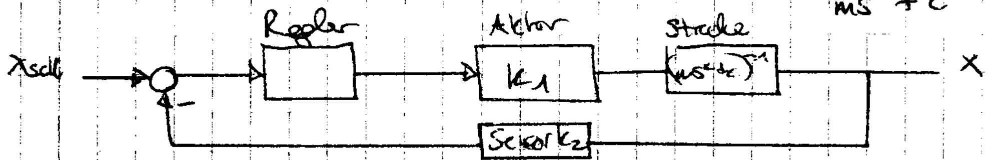
HÜ1

1. a)



$\sum F_i = 0 \Rightarrow F_A = m\ddot{x} + cx$

$G(s) = \frac{1}{ms^2+c}$



b) idealer D-Regler: $G_R(s) = k_D \cdot s$

c) $F_o(s) = k_D k_1 \frac{s}{ms^2+c}$ $\quad F_W(s) = \frac{k_D k_1 \frac{s}{ms^2+c}}{1+k_1 k_2 k_D \frac{s}{ms^2+c}} = \frac{k_1 k_D s}{ms^2+c+k_1k_2k_D s}$

$$F_W(s) = \frac{k_1 k_D s}{\frac{m}{c}s^2 + \frac{k_1k_2k_D}{c}s + 1}$$

~~Sprungantwortkatalog~~: $T^2 = \frac{m}{c}$ $\quad 2dT = \frac{k_1k_2k_D}{c}$

d(ohne Überschwingen) $= 1$

$T^2 = \frac{m}{c}$ $\quad 2T = \frac{k_1k_2k_D}{c}$ $\quad T^2 = \frac{m}{c} = \left(\frac{k_1k_2k_D}{2c}\right)^2$

$k_D^2 = \frac{4cm}{k_1^2k_2^2} \to k_D = \sqrt{4cm}\,\frac{1}{k_1k_2}$

$G_R(s) = 0{,}2\, s$ $\quad k_D = 0{,}2$

d) Alle Regler führen zu W.P. des geschlossenen Regelkreises, aber idealer PID-Regler ~~kann~~ bringt die schnellste ~~...~~ Lösung (Strecke 2 Zeitkonstanten), I-Verhalten bringt statische Genauigkeit!

e) $G_R(s) = k\frac{(1+T_1 s)(1+T_2 s)}{s}$ $\quad T_1 = 0{,}5$ $\quad T_2 = 0{,}4$ $\quad k = ?!$

$F_o(s) = \frac{5k}{s(1+\frac{1}{5}s)}$ $\quad F_W(s) = \frac{5k}{s(1+\frac{1}{5}s)+5k} = \frac{5k}{\frac{1}{5}s^2+s+5k}$

W.P.! $\quad F_W(s) = \frac{1}{\frac{1}{25k}s^2+\frac{1}{5k}s+1}$ $\quad \frac{1}{25k} = T^2$ $\quad 2dT = \frac{1}{5k}$ $\quad d = 0{,}7$ (Δu= & schnell

$T^2 = \frac{1}{25k}$ $\quad 1{,}4T = \frac{1}{5k}$ $\quad T = \frac{1}{5\cdot 1{,}4k} = \frac{1}{7k}$

$T^2 = \frac{1}{25k} = \frac{1}{49k^2}$ $\quad 49k^2 = 25k$ $\quad k = \frac{25}{49} = \underline{\underline{0{,}51}}$

$G_R(s) = 0{,}51\,\frac{(1+0{,}5s)(1+0{,}4s)}{s}$

f) ~~k=~~ ~~B~~ ~~...~~ $\frac{t}{T} = 3$ $\quad t_{Anregel} = 3T = 0{,}28\cdot 3 = 0{,}84 > 0{,}5$

Nein!

2.

a) $u = a \qquad y = x_1 \qquad x_1, x_2$ mit $x_2 = \dot{x}_1$

$$\dot{x}_2 = -a - \frac{\pi\rho g}{3m}\left(3r x_1^2 - x_1^3\right)$$

$$x_2 = \dot{x}_1$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\pi\rho g}{3m}(3r x_1 - x_1^2) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} a$$

b) $$\ddot{x}_1 = -a - \frac{\pi\rho g}{3m}\left(3r x_1^2 - x_1^3\right)$$

c) $x_{1,AP} = \frac{1}{3} r$

$$\Delta\ddot{x}_1 = -\Delta a - \frac{\pi\rho g}{3m}\left[6r\, x_{1,AP} - 3\, x_{1,AP}^2\right]\Delta x_1$$

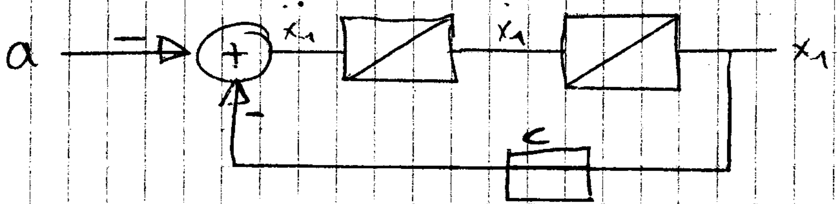
$$\Delta\ddot{x}_1 = -\Delta a - \frac{\pi\rho g}{3m}\left[6r \cdot \frac{1}{3} r - 3\left(\frac{1}{3} r\right)^2\right]\Delta x_1$$

$$\Delta\ddot{x}_1 = -\Delta a - \frac{\pi\rho g}{3m}\left(2r^2 - \frac{1}{3} r^2\right)\Delta x_1$$

$$\Delta\ddot{x}_1 = -\Delta a - 5\frac{\pi\rho g}{9m} r^2\, \Delta x_1 = -\Delta a - c\,\Delta x_1$$

$$c = \frac{5r^2}{9m} \cdot \pi\rho g$$

d)



NAME: MATRIKELNUMMER:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik / Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Pandit

27. März 2000

DIPLOMHAUPTPRÜFUNG
IM FACH
REGELUNGSTECHNIK I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder **nicht**programmierbarer Taschenrechner, Schreib- und Zeichenmaterial. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke oder lose Blätter oder programmierbare Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, halblogarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1. Schreiben Sie auf **jedes** Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer, insbesondere auf Millimeter- und halblogarithmisches Papier.
2. Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluss an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).
3. Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern können nur dann berücksichtigt werden, wenn Verweise hierzu auf den vorbereiteten Lösungsblättern stehen.
4. Schreiben Sie nicht mit Bleistift. Zeichnungen dürfen mit Bleistift ausgeführt werden. Bitte keinen Rotstift verwenden.
5. Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel in den Doppelbögen gehüllt ab.
6. Die Klausur muss wieder in gehefteter Form abgegeben werden.

Aufgabe 1.1: Strukturbild und digitale Regelung

Gegeben sei folgende Anordnung aus einer Feder mit der Federkonstante c, einer Masse m und einer angreifenden Kraft F. Die entstehende Reibkraft F_R infolge der geschwindigkeitsabhängigen Reibung zwischen Masse und Untergrund wird bestimmt durch $F_R = k_R \cdot \dot{x}$. Eingangsgröße sei die angreifende Kraft F und Ausgangsgröße ist die Position x. Die physikalischen Konstanten sind gegeben zu $c = 5\ kg/s^2$, $m = 1\ kg$ und $k_R = 6\ kg/s$.

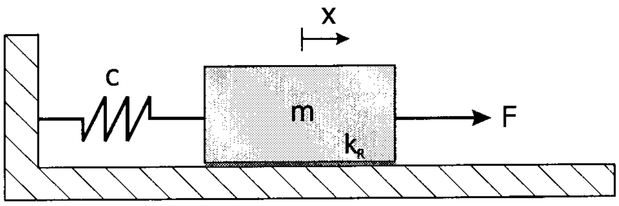


Abb. 1.1: Feder-Masse-System

(a) Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion des Feder-Masse-Systems.

Hinweis: Stellen Sie eine Kräftebilanz der an der Masse angreifenden Kräfte auf.

(b) Es soll nun die Position x mit Hilfe einer PI-Regeleinrichtung auf einen bestimmten Wert eingeregelt werden. Die Ausgangsgröße der Regeleinrichtung ist die angreifende Kraft F. Berechnen Sie für die gegebene Anordnung die Reglerparameter eines PI-Reglers unter folgenden Gesichtspunkten:

- der geschlossene Regelkreis soll möglichst schnell sein
- der geschlossene Regelkreis soll überschwingfrei in den Endwert einlaufen.

(c) Zeichnen Sie das Geräteschaltbild für eine Regelung des Systems mit einem digitalen Regler unter Hinzufügung einer geeigneten Stelleinrichtung.

(d) Wie lautet der Algorithmus für die digitale Implementierung des PI-Reglers?

Hinweis:

- $g(k \cdot T_a) \circ\!\!-\!\!\bullet\ G_Z(z)$
- Tustin-Transformation: $G_Z(z) = G(s)$ mit $s \rightarrow \frac{2}{T_a} \cdot \frac{z-1}{z+1}$
- Aufgabenteil (c) kann auch ohne die vorherigen Aufgabenteile gelöst werden.

Aufgabe 1.2: Nyquist-Kriterium

Gegeben sei ein Regelkreis mit der Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises

$$F_o(s) = \frac{1}{s \cdot (s^2 + \alpha^2)}; \qquad \alpha \in \mathbb{R}$$

(a) Skizzieren Sie den qualitativen Verlauf der Ortskurve des **offenen** Regelkreises in Abhängigkeit von α.

(b) Bestimmen Sie mit Hilfe des Kriteriums von Nyquist, ob bzw. für welche α der **geschlossene** Regelkreis stabil ist.

Aufgabe 2: Zustandsdarstellung dynamischer Systeme

Zwei zylindrische Flüssigkeitsbehälter mit den Querschnittsflächen A_1 und A_2, sowie den Füllhöhen h_1 und h_2 sind über eine Rohrleitung mit Ventil 1 miteinander verbunden (siehe Abb. 2.1). Der Abfluss wird über Ventil 2 gesteuert. Der Zu- und Abfluss des Gesamtsystems ist in der Abbildung mit q_E und q_A gekennzeichnet.

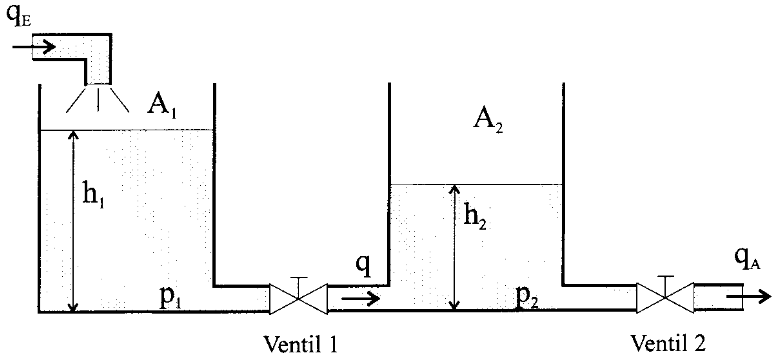


Abb. 2.1: Gekoppelte Flüssigkeitsbehälter

Drosselgleichungen:
$q(t) = \frac{1}{r_1} \cdot (p_1(t) - p_2(t))$
$q_A(t) = \frac{1}{r_2} \cdot p_2(t)$
mit r_i: Drosselbeiwert

Weitere Gleichungen:
$p_1(t) = \rho \cdot g \cdot h_1(t)$
$p_2(t) = \rho \cdot g \cdot h_2(t)$
mit ρ: Dichte des Mediums,
g: Erdbeschleunigung

Für die Beziehungen zwischen Volumenstrom q und Druck p gelten die oben angegebenen Beziehungen der Drosselgleichungen. Die Abhängigkeiten der Drücke p_i von den jeweiligen Füllhöhen h_i sind ebenfalls neben Abb. 2.1 angegeben. Die Drücke p_1 und p_2 gelten jeweils am Boden des entsprechenden Behälters, bzw. in den angeschlossenen Rohrleitungsstücken.

(a) Stellen Sie die Zustandsgleichungen des Systems auf mit der Eingangsgröße $u(t) = q_E(t)$ und der Ausgangsgröße $y(t) = q_A(t)$ und geben Sie diese in Matrixschreibweise an. Wählen Sie hierbei die Zustandsgrößen zu: $x_1(t) = h_1(t)$ und $x_2(t) = h_2(t)$.

Hinweise:

- Stellen Sie zuerst die Volumenbilanzen der Einzelbehälter auf.
- Die Volumina in den Rohrleitungsstücken sind vernachlässigbar

Für die Aufgabenstellungen (b) und (c) seien folgende Angaben gegeben:
$\rho = 1000\ \frac{kg}{m^3}$; $g = 10\ \frac{m}{s^2}$; $r_1 = 0,8\ \frac{kg}{m^4 s}$; $r_2 = 0,25\ \frac{kg}{m^4 s}$; $A_1 = 1\ m^2$; $A_2 = 0,5\ m^2$;
Falls Sie Aufgabenteil (a) nicht lösen konnten verwenden Sie bitte folgende Werte:

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 6 \\ 1,5 & -3 \end{bmatrix};\ b = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix};\ c^T = [0 \quad 5];\ d = 0.$$

(b) Zeichnen Sie das regelungstechnische Strukturbild der Anordnung.

(c) Geben Sie die Gesamtübertragungsfunktion $G_S(s) = Q_A(s)/Q_E(s)$ an.

Aufgabe 3: Frequenzkennlinien

Gegeben sei die folgende Übertragungsfunktion einer Regelstrecke $G(s)$:

$$G(s) = \frac{10}{s^3 + 7s^2 + 10s}.$$

Als Regler werde zunächst ein P-Regler mit der Übertragungsfunktion $G_R(s) = k_P$ eingesetzt.

(a) Entwerfen Sie mit Hilfe des Frequenzkennlinienverfahrens den P-Regler so, dass der geschlossene Regelkreis stabil und möglichst schnell ist, und eine Phasenreserve von $\varphi_R = 60°$ besitzt.

(b) Bestimmen Sie den Stabilitätsbereich des Regelkreises in Abhängigkeit des Reglerparameters k_P.

Die Regelstrecke sei nun mit einem **realen** PD-Regler zu regeln. Beachten Sie hierzu auch die unten angegebenen Hinweise.

(c) Entwerfen Sie den realen PD-Regler mit den Anforderungen aus Aufgabenteil (b) (Stabilität, Schnelligkeit, $\varphi_R = 60°$).

(d) Geben Sie für die neue Anordnung den Stabilitätsbereich in Abhängigkeit von k_{PD} an. k_{PD} ist hier der Verstärkungsfaktor des PD-Reglers.

(e) Welchen der zuvor entworfenen Reglertypen würden Sie für die gegebene Regelstrecke einsetzen? (Begründung angeben!)

<u>**Hinweise:**</u>

- Zeichnen Sie die Frequenzkennlinien aus (a) und (c) in ein Diagramm.
- Folgender Maßstab erweist sich als zweckmäßig für beide Aufgabenstellungen:
  - 1 cm entspricht 10 dB
  - 1 cm entspricht 25°
- Wählen Sie für den realen PD-Regler T_N zu $T_N = \frac{1}{4} \cdot T_D$.

Aufgabe 4: Wurzelortskurve

Gegeben ist der Regelkreis mit Einheitsrückführung in Abb. 4.1

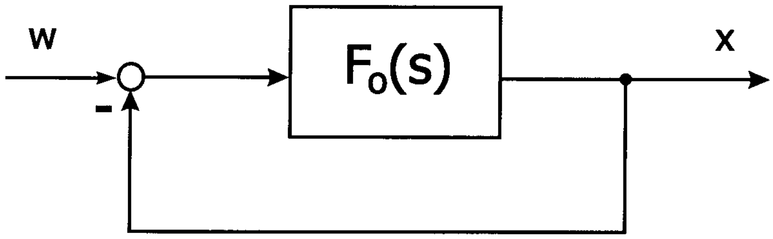


Abb. 4.1: Regelkreis mit Einheitsrückführung

mit der Übertragungsfunktion:

$$F_o(s) = k \cdot \frac{5}{s^3 + 6s^2 + 5s}$$

(a) Konstruieren Sie die Wurzelortskurve zu obigem Regelkreis (Millimeterpapier verwenden).
Berechnen Sie hierzu u.a. auch:

- Wurzelschwerpunkt
- Anstiegswinkel der Asymptoten
- Verzweigungspunkte
- Schnittpunkte mit der imaginären Achse

(b) Für welche Werte von $k_{min} < k < k_{max}$ ist der geschlossene Regelkreis stabil?

(c) Mit welcher Eigenkreisfrequenz ω_0 schwingt der geschlossene Regelkreis bei $k = k_{max}$?

(d) Für welches $k = k_a$ besitzt der geschlossene Regelkreis eine doppelte Polstelle (**Hinweis:** Vernachlässigen Sie hierzu die nichtdominante Polstelle)? Skizzieren Sie die qualitativen Verläufe der Sprungantworten des geschlossenen Regelkreises für $k = k_a$, $k < k_a$ und $k > k_a$.

(e) Zeigen Sie (durch Rechnung), dass der geschlossene Regelkreis für bestimmte k stationär genau ist. Für welche k ist dies erfüllt?

Aufgabe 5: Allgemeine Fragen zur Regelungstechnik

(Bitte in kurzen Stichworten, bzw. mit Hilfe von Skizzen beantworten!)

(a) Was können Sie zur Richtigkeit der folgenden Aussagen sagen? Antworten mit Begründung – Gegenbeispiele sind als Begründung zugelassen!

1. Ein PI-Regler ist ein stabiles System (PI-Regler ohne Regelkreis).
2. Die Wurzelortskurve beschreibt Bahnen der Pole der Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises, abhängig vom Verstärkungsfaktor k in der komplexen Ebene.
3. Ein geschlossener Regelkreis bestehend aus einem Regler und einer Strecke, die jeweils sprungantwortstabil sind, ist immer stabil.
4. Ein geschlossener Regelkreis bestehend aus einem Regler und einer Strecke, die jeweils nicht sprungantwortstabil sind, ist immer instabil.

(b) Gegeben sei ein dynamisches MIMO[1]-System mit p Eingangsgrößen, q Ausgangsgrößen und n Zustandsgrößen.

1. Zeichnen Sie das regelungstechnische Strukturbild eines dynamischen Systems in Zustandsdarstellung.
2. Geben Sie die Matrixdimensionen der Systemmatrizen $\underline{\mathbf{A}}$, $\underline{\mathbf{B}}$, $\underline{\mathbf{C}}$ und $\underline{\mathbf{D}}$ an.
3. Betrachtet wird nun ein lineares, zeitinvariantes SISO[2]-System. Bestimmen Sie allgemein die Streckenübertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

in Abhängigkeit der Matrizen $\underline{\mathbf{A}}$, $\underline{\mathbf{B}}$, $\underline{\mathbf{C}}$ und $\underline{\mathbf{D}}$.

(c) Gegeben sei folgende Übertragungsfunktion:

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

1. Wie nennt man ein solches Übertragungsglied?
2. Welche typischen Besonderheiten weist dieses Übertragungsglied auf (z.B. bei Anregung durch eine bestimmte Testfunktion)?

[1]MIMO = Multiple-Input-Multiple-Output
[2]SISO = Single-Input-Single-Output

Regte – Klausur FJ 2000

Aufgabe 1.1

(a) $m\ddot{x} = F - cx - k_R \cdot \dot{x}$

$m\ddot{x} + k_R\dot{x} + cx = F$

$\circ\!\!-\!\!\bullet$

$m s^2 X(s) + k_R s X(s) + c X(s) = F$

$X(s)\left[m s^2 + k_R s + c\right] = F$

$$G(s) = \frac{X(s)}{F} = \frac{1}{m s^2 + k_R s + c}$$

$$= \frac{1}{s^2 + 6s + 5}$$

(b) möglichst schnell + überschwingungsfrei

$\Rightarrow$ aperiodischer Grenzfall, keine konjugiert komplexe Pole

PI – Regler: $G_R(s) = \frac{1 + T_1 s}{s} K_{PI}$

$$s^2 + 6s + 5 = 0 \Rightarrow s_{1/2} = \frac{-6 \pm \sqrt{36 - 20}}{2} = \frac{-6 \pm \sqrt{16}}{2}$$

$$= -3 \pm 2$$

$$s_1 = -1 \quad s_2 = -5$$

$$\Rightarrow G(s) = \frac{1}{(s+1)(s+5)} = \frac{1}{5(s+1)(\frac{1}{5}s + 1)}$$

~~$F_0(s)$~~ T_1: kürze größte Streckenzeitkonstante $(T_1 = 1)$

$$F_K(s) = K_{PI} \frac{1}{5s(\frac{1}{5}s + 1)} = \frac{K_{PI}}{s^2 + 5s}$$

geschlossener Regler: $F_W(s) = \frac{K_{PI}}{s^2 + 5s + K_{PI}}$

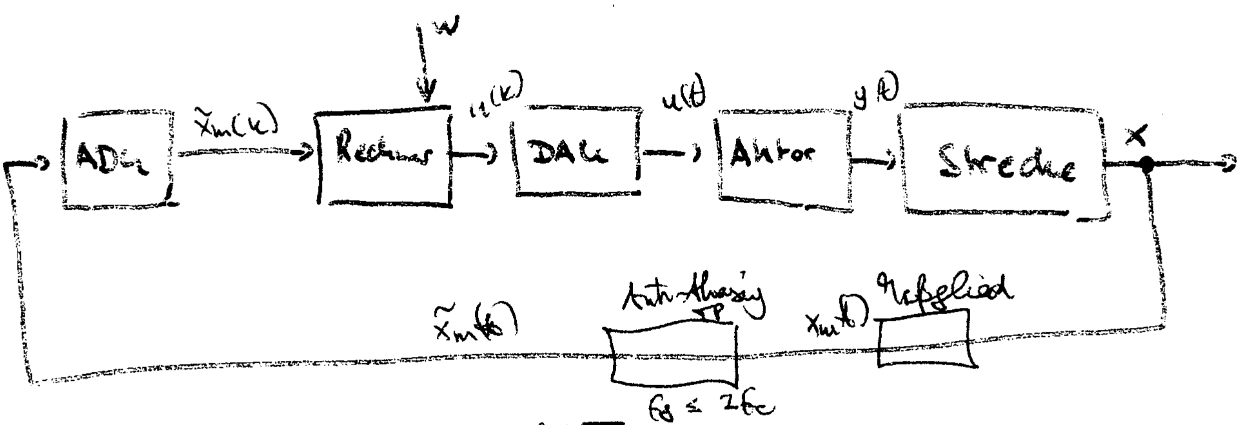
$s^2 + 5s + K = 0 \Rightarrow s_{1/2} = \frac{-5 \pm \sqrt{25 - 4K}}{\ldots}$

Keine Überschwingen: $25 - 4K = 0 \Rightarrow K = \frac{25}{4} = \underline{6{,}25}$

$\Rightarrow$ PI-Regler: $G_R(s) = 6{,}25 \, \frac{1+s}{s}$

$T_I = 1 \quad K_{PI} = 6{,}25$

(c)



(d) PI: $G(s) = K \, \frac{1+Ts}{s}$

$$G_z(z) = K \, \frac{1 + T\frac{2}{T_A}\frac{z-1}{z+1}}{\frac{2}{T_A}\frac{z-1}{z+1}} = \frac{Y(z)}{X(z)}$$

$$= \frac{T_A(z+1) + 2Tz - 1}{2(z-1)} = \frac{Y(z)}{X(z)}$$

$$\Rightarrow \quad X(z)\left[T_A(z+1) + 2Tz - 1\right] = Y(z)\left[z-1\right]$$

$$X(z)\,z\,T_A + X(z)T_A + X(z)2Tz - X(z) = Y(z)z - Y(z) \mid :z$$

$$X(z)T_A + z^{-1}T_A X(z) + 2T X(z) - z^{-1}X(z) = Y(z) - z^{-1}Y(z)$$

$$y_k = y_{k-1} + T_A x_k + T_A x_{k-1} + 2T x_k - x_{k-1}$$

$$\boxed{y_k = y_{k-1} + T_A\left[x_k + x_{k-1}\right] - x_{k-1} + 2T x_k}$$

Aufgabe 1.2

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

Pole: $F_o(j\omega) = \dfrac{1}{j\omega(\alpha^2-\omega^2)} = -j\,\dfrac{1}{\omega(\alpha^2-\omega^2)}$

$F_o(j0) = -j\infty \qquad F(j\infty) = 0$

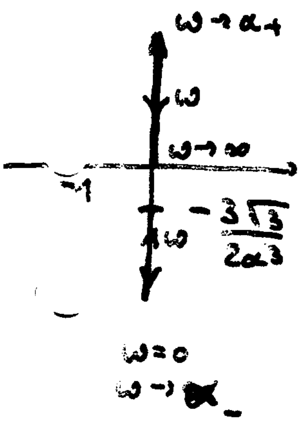
läuft Richtung Null, dann wieder Richtung $-j\infty$, springt dann nach $+j\infty$ und läuft nach 0

Extremum auf j-Achse:

$$\left[\frac{1}{\omega(\alpha^2-\omega^2)}\right]' = \frac{-\left[(\alpha^2-\omega^2)+\omega(-2\omega)\right]}{\omega^2(\alpha^2-\omega^2)^2}$$

$$= \frac{-\alpha^2+\omega^2+2\omega^2}{\omega^2(\alpha^2-\omega^2)^2} \Rightarrow -\alpha^2+3\omega^2 = 0$$

$$\Rightarrow \omega^2 = \frac{\alpha^2}{3} \Rightarrow \omega = \pm\frac{\alpha}{\sqrt{3}}$$



$$F_o\left(\frac{\alpha}{\sqrt{3}}\right) = -j\,\frac{1}{\frac{\alpha}{\sqrt{3}}\left(\alpha^2-\frac{\alpha^2}{3}\right)}$$

$$= -j\,\frac{1}{\frac{\alpha}{\sqrt{3}}\,\frac{2}{3}\alpha^2}$$

$$= -j\,\frac{3\sqrt{3}}{2\alpha^3}$$

(b) $N_\oplus = a_0\frac{\pi}{2} + r_0\pi; \quad a_0 = 3, \quad r_0 = 0$

$= 3\frac{\pi}{2}$

Winkeländerung bezüglich der -1:

$\frac{\pi}{2}$ für alle α. $\Rightarrow$ geschlossener RK

Aufgabe 2

(a) Behälter 1:

$$V_1 = A_1 h_1$$

$$dV_1 = (q_E - q)\,dt \Rightarrow \frac{dV_1}{dt} = q_E - q$$

$$\Rightarrow \frac{dh_1}{dt} = \frac{q_E - q}{A_1}$$

$$\Rightarrow \dot{h}_1 = \frac{1}{A_1} q_E - \frac{1}{A_1}\frac{1}{r_1}(p_1 - p_2)$$

$$= \frac{1}{A_1} q_E - \frac{\rho g}{A_1 r_1}(h_1 - h_2)$$

Behälter 2: $\frac{dV_2}{dt} = q - q_A$

$$\Rightarrow \dot{h}_2 = \frac{q - q_A}{A_2} = -\frac{1}{A_2} q_A + \frac{\rho g}{A_2 r_1}(h_1 - h_2)$$

$\Rightarrow$ Zustandsgleichungen:

$$\dot{h}_1 = -\frac{\rho g}{A_1 r_1} h_1 + \frac{\rho g}{A_1 r_1} h_2 + \frac{1}{A_1} q_E$$

$$\dot{h}_2 = \frac{\rho g}{A_2 r_1} h_1 \cancel{+} - \frac{\rho g}{A_2 r_1} h_2 - \frac{1}{A_2} \cancel{q_A} \frac{\rho g}{r_2} h_2$$

$$y_A = \frac{\rho g}{r_2} h_2$$

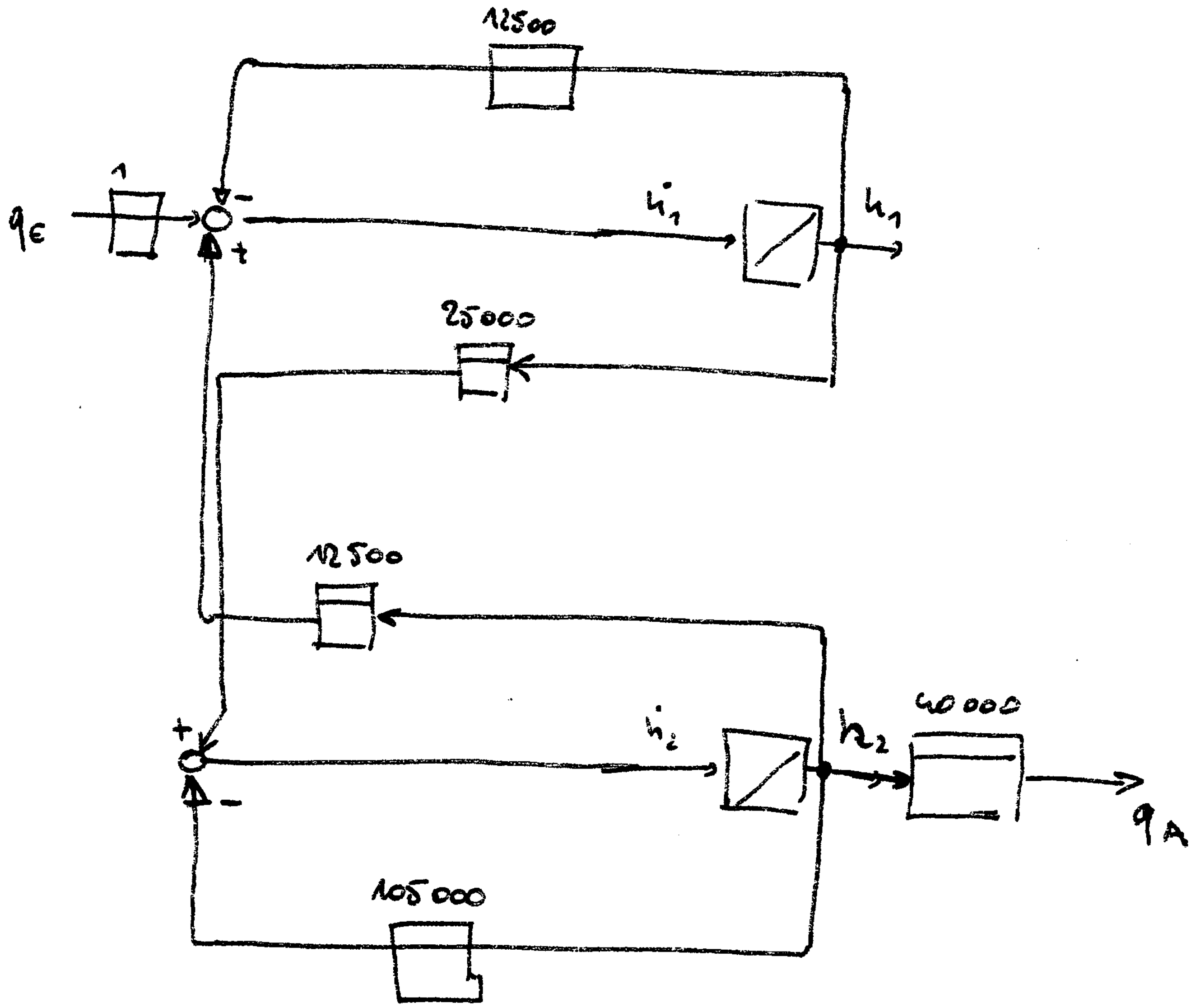
Matrixdarstellung:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{pmatrix}}_{\underline{\dot{x}}} = \underbrace{\begin{pmatrix} -\frac{\rho g}{A_1 r_1} & \frac{\rho g}{A_1 r_1} \\ \frac{\rho g}{A_2 r_1} & -\frac{\rho g}{A_2}\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right) \end{pmatrix}}_{\underline{A}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix}}_{\underline{x}} + \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{A_1} \\ 0 \end{pmatrix}}_{\underline{B}} \cdot \underbrace{q_E}_{u}$$

(b) $$\frac{\rho \cdot g}{A_1 r_1} = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} \, 10 \frac{m}{s^2}}{0{,}8 \frac{kg}{m^4 s} \; 1 m^2} = 12{,}500$$

$$\frac{\rho g}{A_2 r_1} = 25\,000 \qquad \frac{\rho g}{A_2}\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) = 105\,000$$

$$\frac{1}{A_1} = 1 \qquad \frac{\rho g}{r_2} = 40\,000$$



(c) $$s H_1(s) = -12500\, H_1(s) + 12500\, H_2(s) + Q_E(s)$$

$$\Rightarrow H_1(s) = \frac{12500\, H_2(s) + Q_E(s)}{s + 12500}$$

$$s H_2(s) = 25000\, H_1(s) - 105000\, H_2(s)$$

$$H_2(s) = \frac{25000\, H_1(s)}{}$$

$\cancel{H_2(s) = 25000 \, 12500 \, H_2(s)}$

$$s H_2(s) = 25000 \, \frac{12500 \, H_2(s)}{s+12500} - 105000 \, H_2(s) + 25000 \, \frac{Q_E(s)}{s+12500}$$

$$H_2(s) \left[s - \frac{25000 \cdot 12500}{s+12500} - 105000 \right] = \frac{25000 \, Q_E(s)}{s+12500}$$

Rechenfehler

$$H_2(s) = \frac{\frac{25000 \, Q_E(s)}{s+12500}}{s - \frac{25000 \cdot 12500}{s+12500} - 105000}$$

$$= \frac{25000 \, Q_E(s)}{s^2 + 12500 s - 105000 s + 12500 \cdot 105000 - 25000 \cdot 12500}$$

$$= \frac{25000 \, Q_E(s)}{s^2 + 2000 s}$$

Aufgabe 3 $\quad G(s) = \dfrac{10}{s^3 + 7s^2 + 10s} = \dfrac{10}{s(s^2 + 7s + 10)}$

$$s^2 + 7s + 10 = 0 \quad \Rightarrow \quad s_{1/2} = \frac{-7 \pm \sqrt{49 - 40}}{2} = \frac{-7}{2} \pm \frac{3}{2}$$

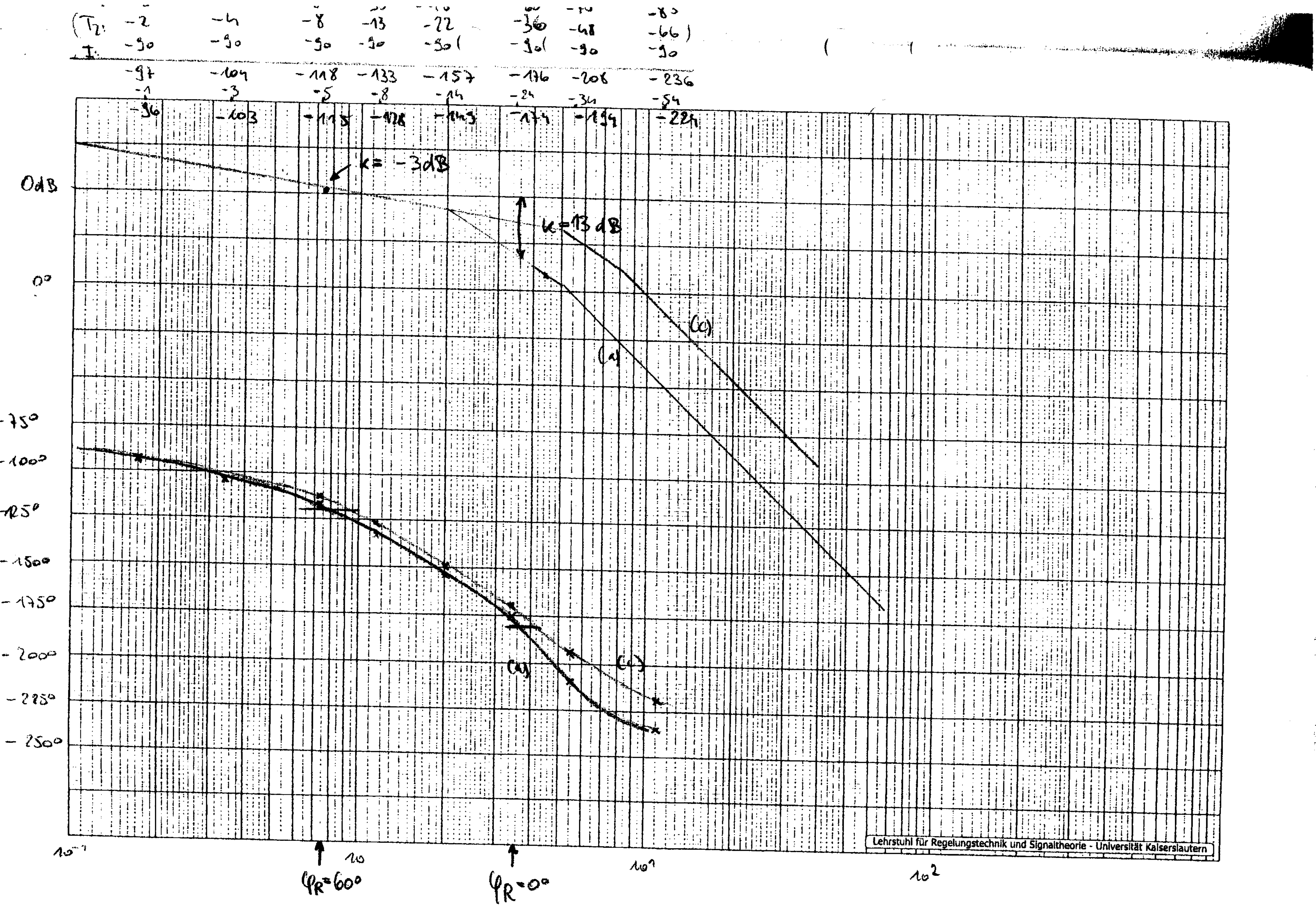
$$\Rightarrow s_1 = \frac{-7}{2} + \frac{3}{2} = -\frac{4}{2} = -2 \qquad s_2 = -\frac{10}{2} = -5$$

$$\Rightarrow \quad F_K(s) = K_P \frac{10}{s(s+2)(s+5)} = K_P \frac{\cancel{10}}{\cancel{2 \cdot 5} \cdot \left(\frac{1}{2}s+1\right)\left(\frac{1}{5}s+1\right)}$$

$$= \frac{K_P}{s\left(\frac{1}{2}s+1\right)\left(\frac{1}{5}s+1\right)}$$

$T_1 = 2$ [illegible]

$T_2 = 5$ [illegible]



T2: -2 -4 -8 -13 -22 -36 -48 -66
I: -90 -90 -90 -90 -90 -90 -90 -90
-97 -104 -118 -133 -157 -176 -208 -236
-1 -3 -5 -8 -14 -24 -34 -54
-96 -103 -113 -128 -143 -174 -194 -224
k = -3dB
k = 13 dB
0dB
0°
-75°
-100°
-125°
-150°
-175°
-200°
-225°
-250°
(a)
(c)
10^{-1}
10
10^{1}
10^{2}
$\varphi_R = 60°$
$\varphi_R = 0°$
Lehrstuhl für Regelungstechnik und Signaltheorie - Universität Kaiserslautern

(a) $K_{dB} = -3 \Rightarrow k = 0{,}708$ 7

(b) $k_{DB} = 13 \Rightarrow k = 4{,}46$

(c) Realer PID-Regler:

$$G_R(s) = K \frac{(1+T_1 s)\cancel{(1+T_2 s)}}{1+T_N s}$$

Wähle $T_1 = \frac{1}{2}$ (größte Streckenzeitkonst.)

$$\Rightarrow T_N = \frac{1}{4} T_1 = \frac{1}{8}$$

$$F_K(s) = \frac{K}{s(\frac{1}{5}s+1)(\frac{1}{8}s+1)}$$

$$\varphi_R = 60° \Rightarrow K = 0\,dB = 1$$

(d) $\varphi_R = 0° \Rightarrow k = 17\,dB = 7$

(e) PD-Regler, weil ω_D größer $\Rightarrow$ schneller!

Aufgabe 4

$$F_0(s) = K \cdot \frac{5}{s^3+6s^2+5s} = K \frac{5}{s(s^2+6s+5)}$$

Nullstellen: keine

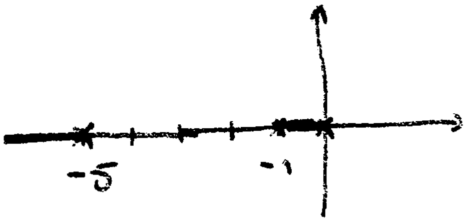
Pole: p_1: $s = 0$

$p_{2/3}$: $s^2+6s+5 = 0 \Rightarrow s_{1/2} = \frac{-6 \pm \sqrt{36-20}}{2} = \frac{-6 \pm 4}{2}$

$s_1 = -1 \quad s_2 = -5$

p_2: $s = -1$

a) $n = 3 \quad m = 0 \Rightarrow n - m = 3$ Äste der WOK laufen ins Unendliche



- Bereich der reellen Achse zwischen $-\infty$ u. -5 und zwischen -1 und 0 ist Teil der WOK.

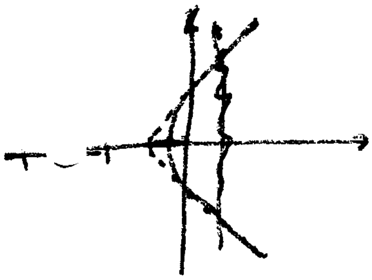
- Schnittpunkt d. Asymptote (Wurzelschwerpunkt):

$$\sigma_w = \frac{\sum \mathrm{Re}\, p - \sum \mathrm{Re}\, n}{n-m} = \frac{-6}{3} = -2$$

- Schnittwinkel d. Asymptoten

$$\sphericalangle \varphi_i = (2i+1)\frac{\pi}{n-m}$$

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{3} \qquad \varphi_1 = \pi \qquad \varphi_3 = \frac{5\pi}{3}$$



- Verzweigungspunkte

$$\sum_{\lambda=1}^{n+m} \frac{c_\lambda}{s - s_\lambda} = 0$$

$$\frac{-1}{s} + \frac{-1}{s+1} + \frac{-1}{s+5} = 0$$

$$(s+1)(s+5) + s(s+5) + s(s+1) = 0$$

$$s^2 + 6s + 5 + s^2 + 5s + s^2 + s = 0$$

$$3s^2 + 12s + 5 = 0$$

$$s_{1/2} = \frac{-12 \pm \sqrt{144 - 60}}{6} = -2 \pm \frac{\sqrt{84}}{6} = -2 \pm \frac{\sqrt{21}}{3}$$

$-2 - \frac{\sqrt{21}}{3}$ liegt nicht auf der WOK

- Schnittwinkel in den Verzw.pkt.:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$$

- Schnittpunkte mit der imaginären Achse:

$$5K + s^3 + 6s^2 + 5s = 0 \quad | s \to j\omega$$

$$5K + j\omega(-\omega^2) - 6\omega^2 + 5j\omega = 0$$

(I) $5K - 6\omega^2 = 0$ (II) $5\omega - \omega^3 = 0$

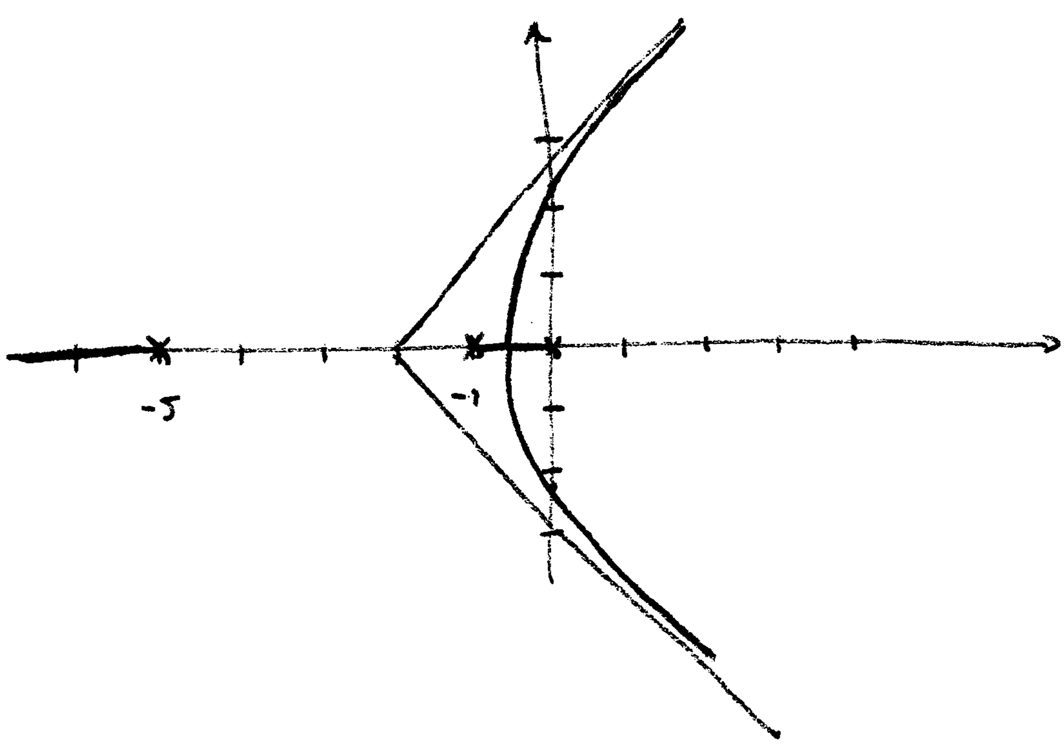
$$\omega(5-\omega^2) = 0$$

$$\omega = 0 \lor \omega^2 = 5$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{\omega = \pm\sqrt{5}}}$$

$$\approx \pm 2{,}2$$

- Austrittswinkel in den krit. Stellen:
  direkt ersichtlich
  p_1: $\varphi = \pi$
  p_2: $\varphi = 0$
  p_3: $\varphi = \pi$



(b) $K_{min} = 0$

K_{max}: $5K - 6 \cdot 5 = 0$

$5K = 30 \Rightarrow K = 6$

RK ist stabil für $0 < k < 6$.

(c) $\omega_0 = \sqrt{5}$

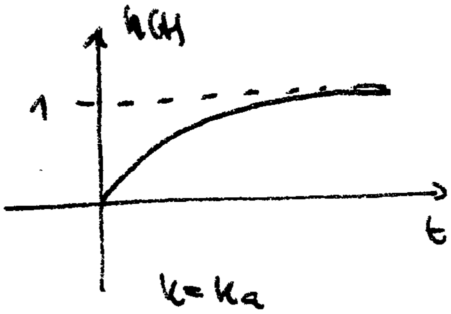
(d) Doppelte Polstelle für Verzweigungspunkt:

$$s = -2 + \frac{\sqrt{21}}{3}$$

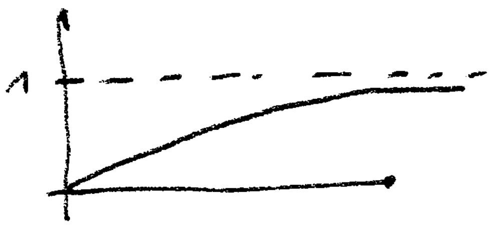
$$K = \frac{\left|-2+\frac{\sqrt{21}}{3}+1\right| \left|-2+\frac{\sqrt{21}}{3}+5\right| \left|-2+\frac{\sqrt{21}}{3}\right|}{1}$$

$= 0{,}5275 \cdot 4{,}5275 \cdot +0{,}4725$

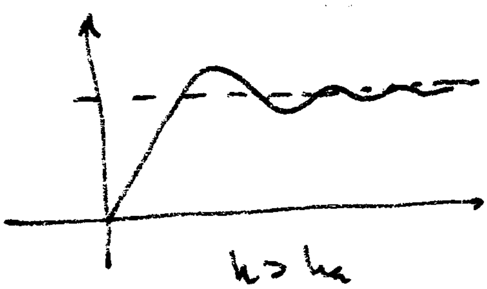
$= \underline{\underline{1{,}128}} = K_a$



k=ka



k<ka



k>ka

(e) Geschl. RK: $\frac{5K}{s^3+6s^2+5s+5K} = F_w(s)$ | ⇒ geschl. RK ist für <u>alle</u> k stationär

$\lim_{t\to\infty} h(t) = \lim_{s\to 0} s\, F_w(s) \cdot \frac{1}{s} = F_w(0) = \frac{5K}{5K} = 1$

Aufgabe 5

(a) 1. Falsch: $\lim_{t\to\infty} h(t) = \lim_{s\to 0} s \cdot \frac{1+Ts}{s} \cdot \frac{1}{s} = \lim_{s\to 0} \frac{1+Ts}{s} \to \infty$

$\Rightarrow$ instabil.

2. Falsch: Die WOK beschreibt Bahn der Pole des geschlossenen RK ...

3. Falsch: Gegenbeispiel:

Regler: $G_{PD} = K_R (1+T_R s)$

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

$F_W(s) = \frac{k_R(1-T_R s)}{(s+1)(s+2) + k_R(1-T_R s)}$

$F_W(s) = \frac{k_R(1-T_R s)}{s^2+3s+3+k_R - k_R T_R}$

$k_R T_R > 3$ kein H.P. instabil!

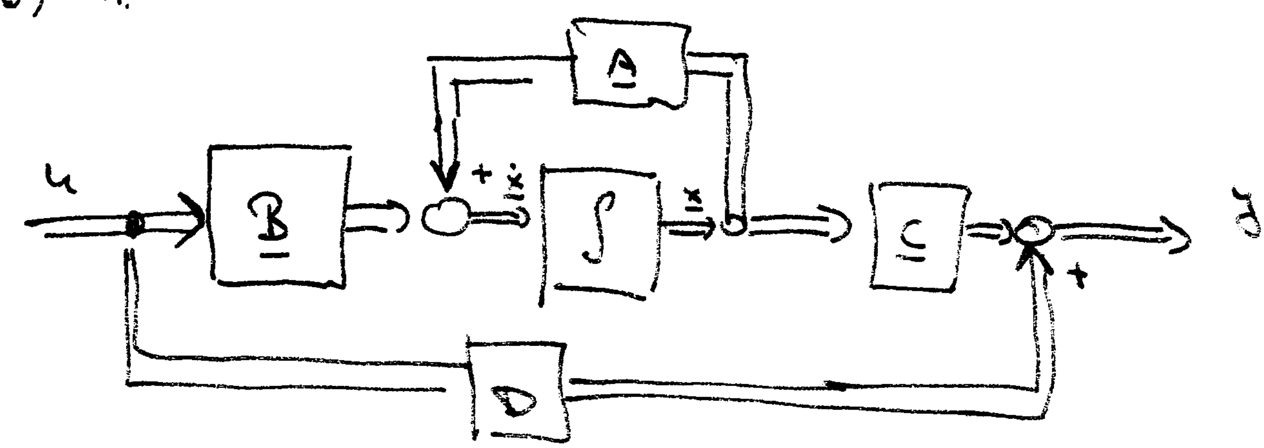
4. Falsch,

$$G_{PI} = \frac{K_R(1-T_1 s)}{s}$$

$$G_S(s) = \frac{1}{(T_2 s+1)(1-T_1 s)}$$

$$F_W(s) = \frac{K_R}{T_2 s^2 + s + K_R}$$ ← HP ⇒ stabil

(b) 1.



2.

A: $n \times n$

B: ~~[illegible]~~ $n \times p$

$p \times n$

C: $q \times n$

D: $q \times p$

3.

$$\underline{\dot{x}} = \underline{A}x + \underline{B}u$$

$$y = \underline{C}x + \underline{D}u$$

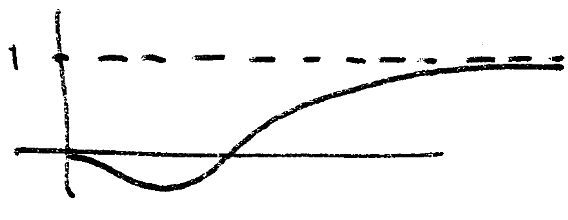
$$\cancel{sX(s) = AX(s) + Bu(s)}$$

$$\boxed{G(s) = \underline{c}^T(sI - \underline{A})^{-1}\,\underline{b} + d}$$

1. Nichtminimalphasig

2. Pole oder Nullstellen i. d. rechten Halbebene

Sprungantwort schlägt zunächst in die der Endwert entgegengesetzte Richtung aus



NAME: MATRIKELNUMMER:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik / Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Pandit

02. Oktober 2000

DIPLOMHAUPTPRÜFUNG IM FACH REGELUNGSTECHNIK I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder **nicht**programmierbarer Taschenrechner, Schreib- und Zeichenmaterial. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke, lose Blätter oder programmierbare Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, halblogarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1. Schreiben Sie auf **jedes** Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer, insbesondere auf Millimeter- und halblogarithmisches Papier.
2. Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluss an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).
3. Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern können nur dann berücksichtigt werden, wenn Verweise hierzu auf den vorbereiteten Lösungsblättern stehen und die Blätter mit Namen und Matrikelnummern versehen sind.
4. Schreiben Sie nicht mit Bleistift. Zeichnungen dürfen mit Bleistift ausgeführt werden. Bitte keinen Rotstift verwenden.
5. Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel (auch Schmierblätter) in die Doppelbögen gehüllt ab.
6. Die Klausur muss wieder in gehefteter Form abgegeben werden.

Aufgabe 1.1: Nyquist-Kriterium

Gegeben sei ein Regelkreis mit der Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises

$$F_o(s) = \frac{1}{s \cdot (s^2 + \alpha^2)}; \qquad \alpha \in \mathbb{R}$$

(a) Skizzieren Sie den qualitativen Verlauf der Ortskurve des **offenen** Regelkreises in Abhängigkeit von α.

(b) Bestimmen Sie mit Hilfe des Kriteriums von Nyquist, ob bzw. für welche α der **geschlossene** Regelkreis (negative Einheitsrückführung) stabil ist.

Aufgabe 1.2: Ortskurve und Stabilität

Gegeben ist der Verlauf der Ortskurve des Frequenzgangs $F_o(j\omega)$ eines offenen Regelkreises in Abbildung 1.2:

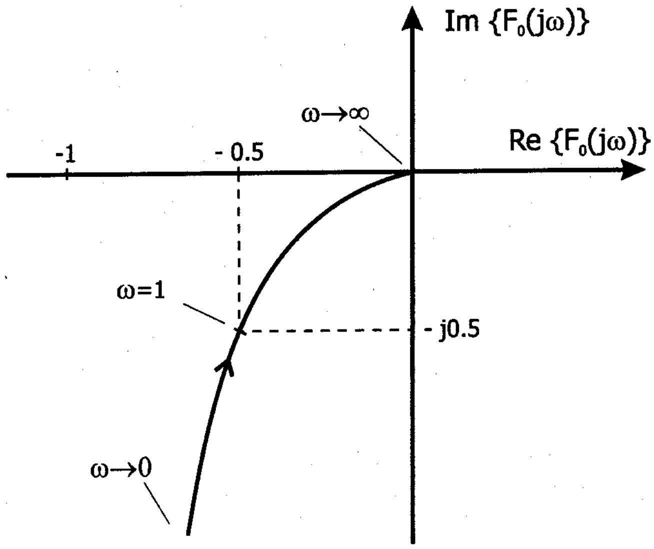


Abb. 1.2: Ortskurve des offenen Regelkreises

(a) Ist der **offene** Regelkreis sprungantwortstabil? Begründung angeben!

(b) Der Regelkreis sei nun über negative Einheitsrückführung geschlossen. Ist der **geschlossene** Regelkreis sprungantwortstabil? (Begründung angeben!) Welche Voraussetzungen muss die Übertragungsfunktion des offenen Kreises erfüllen, so dass das von Ihnen verwendete Kriterium angewendet werden kann.

(c) Wie lautet die Übertragungsfunktion des Gliedes, dessen Ortskurve oben dargestellt ist?

(d) Welche stationäre Regelabweichung weist der geschlossene Regelkreis auf?

(e) Es sei $F_o(j\omega)$ ergänzt durch ein Totzeitglied. Wie verläuft die Ortskurve des Frequenzgangs des neuen Übertragungsgliedes?

Aufgabe 3: Frequenzkennlinien

Gegeben sei die folgende Übertragungsfunktion einer Regelstrecke $G(s)$:

$$G(s) = \frac{10}{s^3 + 7s^2 + 10s}.$$

Als Regler werde zunächst ein P-Regler mit der Übertragungsfunktion $G_R(s) = k_P$ eingesetzt.

(a) Entwerfen Sie mit Hilfe des Frequenzkennlinienverfahrens den P-Regler so, dass der geschlossene Regelkreis stabil und möglichst schnell ist, und eine Phasenreserve von $\varphi_R = 60°$ besitzt.

(b) Bestimmen Sie den Stabilitätsbereich des Regelkreises in Abhängigkeit des Reglerparameters k_P.

Die Regelstrecke sei nun mit einem **realen** PD-Regler zu regeln. Beachten Sie hierzu auch die unten angegebenen Hinweise.

(c) Entwerfen Sie den realen PD-Regler mit den Anforderungen aus Aufgabenteil (b) (Stabilität, Schnelligkeit, $\varphi_R = 60°$). Geben Sie die Übertragungsfunktion des Reglers an.

(d) Geben Sie für die neue Anordnung den Stabilitätsbereich in Abhängigkeit von k_{PD} an. k_{PD} ist hier der Verstärkungsfaktor des PD-Reglers.

(e) Welchen der zuvor entworfenen Reglertypen würden Sie für die gegebene Regelstrecke einsetzen? (Begründung angeben!)

Hinweise:

- Zeichnen Sie die Frequenzkennlinien aus (a) und (c) in ein Diagramm.
- Folgender Maßstab erweist sich als zweckmäßig für beide Aufgabenstellungen:
  - 1 cm entspricht 10 dB
  - 1 cm entspricht 25°
- Wählen Sie für den realen PD-Regler T_N zu $T_N = \frac{1}{4} \cdot T_D$.

4/5

Aufgabe 4: Wurzelortskurve

Gegeben ist der Regelkreis in Abb. 4.1 bestehend aus einer Strecke, einem idealen PD-Regler und einer Einheitsrückführung.

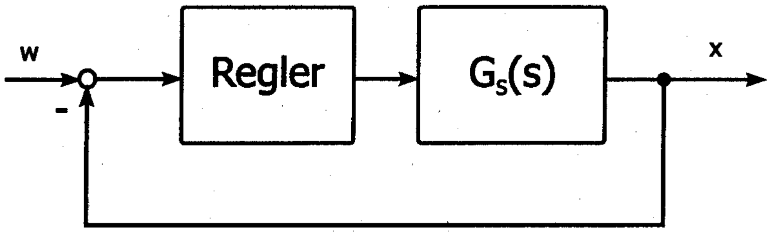


Abb. 4.1: Regelkreis mit Einheitsrückführung

Die Übertragungsfunktion $G_{PD1}(s)$ des idealen PD-Reglers sowie die Übertragungsfunktion $G_S(s)$ der Regelstrecke seien gegeben durch:

$$G_{PD1}(s) = K \cdot (s+2) \qquad\qquad G_S(s) = \frac{1}{s^2 + 2 \cdot s + 2}$$

(a) Konstruieren Sie die Wurzelortskurve zu obigem Regelkreis. Verwenden Sie hierzu das bereitgestellte Millimeterpapier.
Berechnen Sie hierzu u.a. auch:

- Anstiegswinkel der Asymptoten
- Verzweigungspunkte
- Stabilitätsbereich in Abhängigkeit von der Reglerverstärkung
- Anstiegswinkel in den kritischen Stellen

(b) Für welche Werte der Reglerverstärkung K treten keine Überschwinger nach Sollwertsprüngen auf?

(c) Für welche Reglerverstärkungen $K = K_{max}$ ist die Dämpfung des Regelkreises am geringsten? Wie groß ist in diesem Falle die Dämpfung d_{max}?

(d) Der ideale PD-Regler werde nun durch einen realen PD-Regler mit folgender Übertragungsfunktion ersetzt:

$$G_{PD2}(s) = K \cdot \frac{s+2}{0.2 \cdot s + 1}$$

Man skizziere den prinzipiellen Verlauf der Wurzelortskurve.

Hinweis: Es existieren bei diesem Aufgabenteil keine Verzweigungspunkte.

5/5

Aufgabe 5: Allgemeine Fragen zur Regelungstechnik

(Bitte in kurzen Stichworten, bzw. mit Hilfe von Skizzen beantworten!)

(a) Was können Sie zur Richtigkeit der folgenden Aussagen sagen? Antworten mit Begründung – Gegenbeispiele sind als Begründung zugelassen!

1. Die Stabilitätskriterien Nyquist-Kriterium und Wurzelortskurvenverfahren gelten auch für Regelkreise mit höchstens einem nichtlinearen statischen Übertragungsglied.
2. Stabile Regelkreise sind immer stationär genau.
3. Stationär genaue Regelkreise sind immer stabil.
4. Die Stabilitätsanalyse mit Hilfe der Wurzelortskurve ist bei Regelkreisen mit Totzeiten durchführbar.

(b) Die Übertragungsfunktion eines linearen, zeitinvarianten Übertragungsgliedes sei gegeben durch

$$G(s) = \frac{2}{s^2 + 7 \cdot s + 6}$$

Bestimmen Sie die Antwort im Zeitbereich ($0 \leq t < \infty$), wenn das Übertragungsglied mit der Einheits-Sprungfunktion $\sigma(t)$ beaufschlagt wird. Wie groß sind die Überschwingweite Δü und die Anregelzeit t_{an} für einen Toleranzschlauch von ± 5 % um den Endwert?

(c) Was versteht man unter einer *Kaskadenregelung*? Wie ist sie aufgebaut? Schildern Sie kurz die Vorgehensweise beim Entwurf.

(d) Gegeben ist der folgende Regelkreis mit einem Totzeitglied:

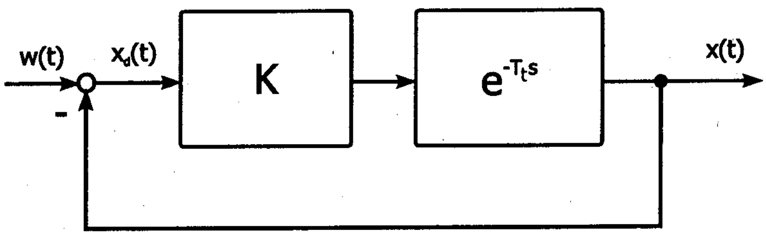


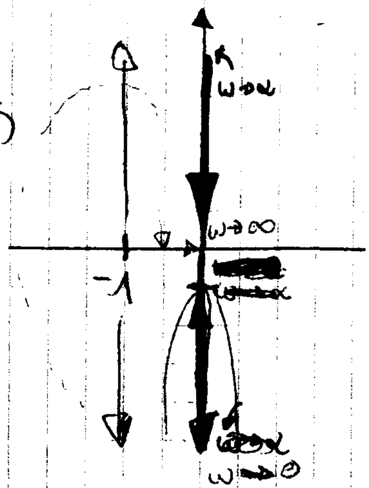
Abb. 5.1: Regelkreis mit Totzeitglied

1. Für welche K ist der geschlossene Regelkreis stabil?
2. Berechnen Sie die Sprungantwort $h(t)$ des Regelkreises für $0 \leq t \leq 4 \cdot T_t$ für $w(t) = \sigma(t)$. Für Zeitpunkte $t < 0$ gelte $x(t) \equiv 0$. K sei so gewählt, dass der geschlossene Regelkreis stabil ist. Geben Sie weiterhin $\lim_{t\to\infty}\{h(t)\}$ an.
3. Skizzieren Sie die Sprungantwort $h(t)$ im Zeitbereich.

(e) Geben Sie den PI-Algorithmus für einen digitalen Regler in rekursiver Form an.

H00

11. a) $F_o(s) = \frac{1}{s(s^2+\alpha^2)} \Rightarrow F_o(j\omega) = \frac{1}{j\omega((j\omega)^2+\alpha^2)} = \frac{-j}{\omega(\alpha^2-\omega^2)}$



$F_o(j\omega) = -\frac{j}{\omega(\alpha^2-\omega^2)}$ (kein Realteil!)

b) $a_o = 1$ $\quad W_+ \overset{!}{=} \frac{\pi}{2} \neq \frac{3\pi}{2}$ instabil

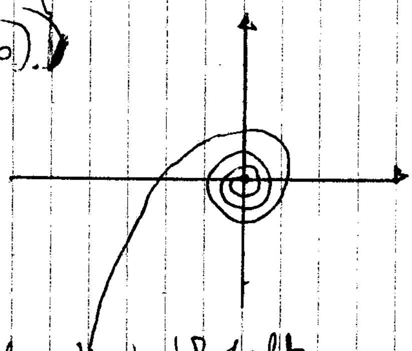
1.2 a) Nein, da $F_o(0) = \infty$

b) $a_o \leq 2$ $\quad r_o = 0$ spezielles Nyquist-Kriterium erfüllt!

c) $F_o(s) = \frac{1}{s(s+1)}$

d) Keine, da I-Verhalten $(F_o(0) = \infty)$.

e) $F_o(s) = \frac{e^{-T_t s}}{s(s+1)} = \ldots$



5a. 1. Nur für LTI-Systeme 2. Nur solche mit I-Verhalten

3. Stationäre Genauigkeit bedingt Stabilität 4. Ja Lösung $1 + F_o(s) = 0$ ist lösbar!

b) $H(s) = \frac{2}{s(s+1)(s+6)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s+1} + \frac{C}{s+6}$

$A(s+1)(s+6) + B(s)(s+6) + Cs(s+1) = 2$

$As^2 + A7s + 6A + Bs^2 + B6s + Cs^2 + Cs = 2$

$A = \frac{1}{3}$ $\quad \frac{1}{3}s^2 + Bs^2 + Cs^2 = 0$ $\quad \frac{7}{3} + 6B + C = 0$

$B = C - \frac{1}{3}$ $\quad B = \frac{-C-\frac{7}{3}}{6} = -\frac{C}{6} - \frac{7}{18}$

$C - \frac{1}{3} = -\frac{C}{6} - \frac{7}{18}$

$\frac{7}{6}C = -\frac{7}{18} + \frac{1}{3} = -\frac{1}{18}$ $\quad C = -\frac{1}{21}$ $\quad B = -\frac{8}{21}$

$h(t) = \frac{1}{3} + \frac{1}{21}e^{-6t} + \frac{8}{21}e^{-t}$

d) $k < 1$

$\lim_{t\to\infty} w(t) = \frac{1}{1+k}$

e) $Y_{pi} = k \cdot x_i$ $\quad Y_{Ii} = Y_{i-1} + kT x_i$ $\quad \Rightarrow Y_i = Y_{pi} + Y_{Ii}$

2. a) Nach. Vereinfachungen ($\cos\alpha = 1$, $\sin\alpha = \alpha$, $\dot\alpha^2 \sin\alpha = 0$)

$$(M+m)\ddot x - ml\ddot\alpha = F \quad \& \quad -ml\ddot x + ml^2\ddot\alpha - mlg\alpha = 0$$

teile durch (ml).

$$(1) \quad \frac{(M+m)}{ml}\ddot x - \ddot\alpha = \frac{F}{ml} \quad \& (2) \quad -\ddot x + l\ddot\alpha - g\alpha = 0$$

$$(1) + \frac{1}{l}(2) \Rightarrow \quad (3) \quad \frac{M}{ml}\ddot x - g/l\,\alpha = F/ml$$

$$\Rightarrow \quad \ddot x = \frac{F}{M} + \frac{g\cdot m}{M}\alpha$$

$$(1) + \left(\frac{M+m}{ml}\right)(2) \Rightarrow (4) \quad -\ddot\alpha + \frac{M+m}{m}\ddot\alpha - \frac{g}{ml}(M+m)\alpha = \frac{F}{ml}$$

$$\Rightarrow \quad \cancel{\ddot\alpha \left(\frac{M+m}{m}\right)}\ \ddot\alpha = \frac{F}{ML} + \frac{g}{ML}(M+m)\alpha$$

Linearisierung:

$$\Delta\ddot x = \frac{1}{M}\Delta F + \frac{g\cdot m}{M}\Delta\alpha$$

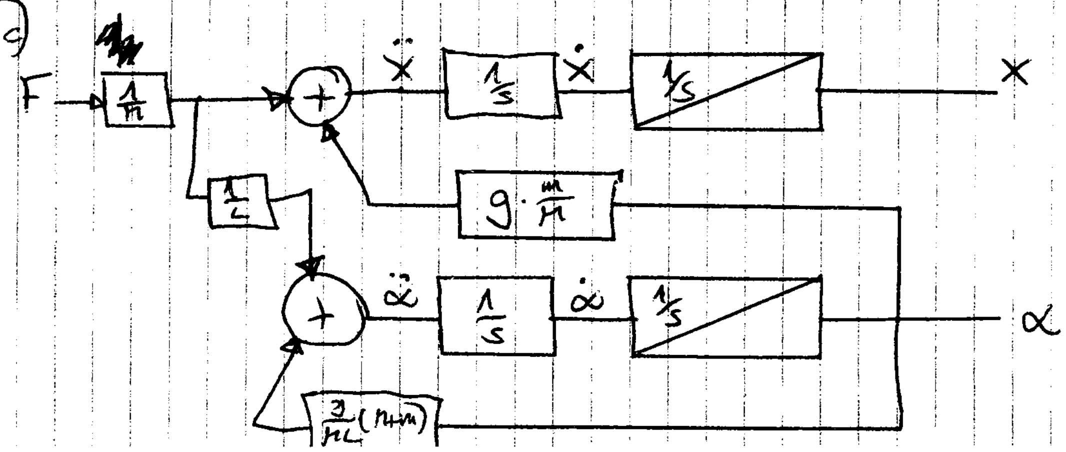
$$\Delta\ddot\alpha = \frac{1}{ML}\Delta F + \frac{g}{ML}(M+m)\Delta\alpha$$

b)

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot x \\ \dot\alpha \\ \ddot x \\ \ddot\alpha \end{pmatrix}}_{\dot{\underline{x}}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{g\cdot m}{M} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{g}{ML}(M+m) & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{\underline{A}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} x \\ \alpha \\ \dot x \\ \dot\alpha \end{pmatrix}}_{\underline{x}} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/M \\ 1/ML \end{pmatrix}}_{\underline{B}} \cdot \underbrace{F}_{\underline{u}}$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x \\ \alpha \end{pmatrix}}_{\underline{y}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{\underline{C}} \underbrace{\begin{pmatrix} x \\ \alpha \\ \dot x \\ \dot\alpha \end{pmatrix}}_{\underline{x}} + \underbrace{[0]}_{\underline{D} = [0]}$$

c)



115

NAME: MATRIKELNUMMER:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik / Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Pandit

04. Oktober 1999

DIPLOMHAUPTPRÜFUNG IM FACH REGELUNGSTECHNIK I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder **nicht**programmierbarer Taschenrechner, Schreib- und Zeichenmaterial. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke oder lose Blätter oder programmierbare Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, halblogarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1. Schreiben Sie auf **jedes** Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer
2. Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluss an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).
3. Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern werden bei der Korrektur **nicht** berücksichtigt!
4. Schreiben Sie nicht mit Bleistift. Zeichnungen dürfen mit Bleistift ausgeführt werden.
5. Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel in den Doppelbögen gehüllt ab.
6. Die Klausur muss wieder in gehefteter Form abgegeben werden.

NAME: 10/99 MATRIKELNUMMER:

Aufgabe 1.1: Ziegler-Nichols

Ein Verfahren zur empirischen Bestimmung der Reglerparameter ist das Verfahren nach Ziegler-Nichols.

(a) Beschreiben Sie kurz die Vorgehensweise beim Reglerentwurf nach der **Schwingversuchmethode** von Ziegler-Nichols.

(b) Bestimmen Sie — ausgehend von der Messung in Abb. 1.1 — die Reglerparameter eines PI-Reglers (Messdiagramm aufgenommen mit $K = 1.7$). Geben Sie hierzu auch die zugrundeliegende Übertragungsfunktion des Reglers an.

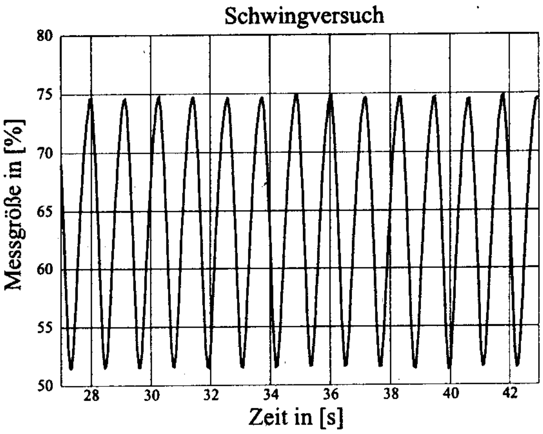


Abb. 1.1: Messdiagramm zur Schwingversuchmethode

Aufgabe 1.2: Linearisierung

Gegeben ist das nichtlineare Modell eines Ofens zur Erwärmung von metallischen Körpern. Unter vereinfachten physikalischen Betrachtungen erhält man die Beziehung zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen zu

$$\dot{T}_K(t) = K \cdot [T_O^4(t) - T_K^4(t)]$$

Hierbei bedeuten: $T_O(t)$ die Ofentemperatur (=Eingangsgröße), $T_K(t)$ die Temperatur des erwärmten Metallkörpers (=Ausgangsgröße), t die Zeit und K eine physikalische Konstante.

Zum Zeitpunkt $t = 0$ habe der zu erwärmende Körper die Temperatur $T_K(0) = T_{K0}$

(a) Zeichnen Sie das Strukturbild des Ofenmodells.

(b) Die Ofentemperatur $T_O(t)$ wird sprunghaft auf den Wert $T_{O,AP}$ verändert. Welche Temperatur nimmt der Körper im stationären Zustand an?

(c) Linearisieren Sie das System um den Arbeitspunkt $T_{O,AP}$, $T_{K,AP}$ und zeichnen Sie das Strukturbild des linearisierten Ofenmodells.

(d) Wie lautet die Übertragungsfunktion der linearisierten Strecke?

Aufgabe 2: Zustandsraum

Zwei zylindrische Flüssigkeitsbehälter mit den Querschnittsflächen A_1 und A_2, sowie den Füllhöhen h_1 und h_2 sind über eine Rohrleitung mit Ventil 1 miteinander verbunden (siehe Abb. 2.1). Der Abfluss wird über Ventil 2 gesteuert. Der Zu- und Abfluss des Gesamtsystems ist in der Abbildung mit q_E und q_A gekennzeichnet.

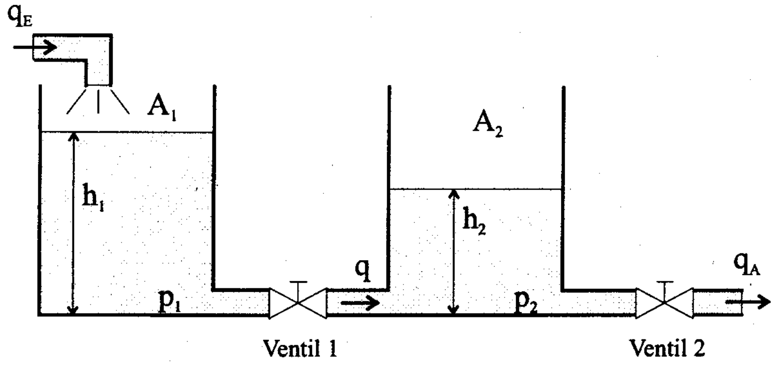


Abb. 2.1: Gekoppelte Flüssigkeitsbehälter

Drosselgleichungen:
$q(t) = \frac{1}{r_1} \cdot (p_1(t) - p_2(t))$
$q_A(t) = \frac{1}{r_2} \cdot p_2(t)$
mit r_i: Drosselbeiwert

Weitere Gleichungen:
$p_1(t) = \rho \cdot g \cdot h_1(t)$
$p_2(t) = \rho \cdot g \cdot h_2(t)$
mit ρ: Dichte des Mediums,
g: Erdbeschleunigung

Für die Beziehungen zwischen Volumenstrom q und Druck p gelten die oben angegebenen Beziehungen der Drosselgleichungen. Die Abhängigkeiten der Drücke p_i von den jeweiligen Füllhöhen h_i sind ebenfalls neben Abb. 2.1 angegeben. Die Drücke p_1 und p_2 gelten jeweils am Boden des entsprechenden Behälters, bzw. in den angeschlossenen Rohrleitungsstücken.

(a) Stellen Sie die Zustandsgleichungen des Systems auf mit der Eingangsgröße $u(t) = q_E(t)$ und der Ausgangsgröße $y(t) = q_A(t)$ und geben Sie diese in Matrixschreibweise an. Wählen Sie hierbei die Zustandsgrößen zu: $x_1(t) = h_1(t)$ und $x_2(t) = h_2(t)$.

Hinweis:

- Stellen Sie zuerst die Volumenbilanzen der Einzelbehälter auf.
- Die Volumina in den Rohrleitungsstücken sind vernachlässigbar

Für die Aufgabenstellungen (b) und (c) seien folgende Angaben gegeben:
$\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$; $g = 10 \frac{m}{s^2}$; $r_1 = 0,8$; $r_2 = 0,25$; $A_1 = 1\ m^2$; $A_2 = 0,5\ m^2$;
Falls Sie Aufgabenteil (a) nicht lösen konnten verwenden Sie bitte folgende Werte:

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 6 \\ 1,5 & -3 \end{bmatrix};\ b = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix};\ c^T = [0 \quad 5];\ d = 0$$

(b) Zeichnen Sie das regelungstechnische Strukturbild der Anordnung.

(c) Vereinfachen Sie das Strukturbild nach den Ihnen bekannten Umformungsregeln und geben Sie die Gesamtübertragungsfunktion $G_S(s) = Q_A(s)/Q_E(s)$ an.

NAME: MATRIKELNUMMER:

Aufgabe 4: Wurzelortskurve

Gegeben ist der Regelkreis mit Einheitsrückführung in Abb. 4.1

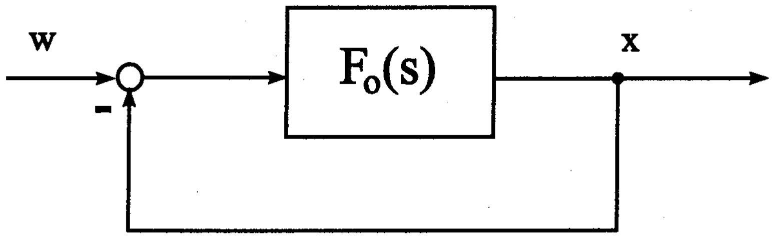


Abb. 4.1: Regelkreis mit Einheitsrückführung

mit folgender Übertragungsfunktion:

$$F_o(s) = k \cdot \frac{s-1}{s^2 - 2s + 5}$$

(a) Konstruieren Sie die Wurzelortskurve zu obigem Regelkreis (Millimeterpapier verwenden).
Berechnen Sie hierzu auch:

- Verzweigungspunkte
- Schnittwinkel der Äste in den Verzweigungspunkten
- Anstiegswinkel in den kritischen Stellen
- Schnittpunkte mit der imaginären Achse

(b) Für welche Werte von k ist der geschlossene Regelkreis stabil?

(c) Für eine Anwendung ist eine Dämpfung von d > 0.7 und w = 1 $1/s$ gefordert. Gibt es einen Wert für k, für den diese Bedingungen eingehalten werden können?
Wenn ja, für welchen Wert k ist diese Bedingung erfüllt?
Wenn nein, Begründung angeben.

515

NAME: 10/99 MATRIKELNUMMER:

Aufgabe 5: Allgemeine Fragen zur Regelungstechnik

(Bitte in kurzen Stichworten, bzw. mit Hilfe von Skizzen beantworten!)

(a) Geben Sie das Schaltbild eines PI-Reglers an, der durch eine Operationsverstärkerschaltung realisiert ist.

(b) Was können Sie zur Richtigkeit der folgenden Aussagen sagen? Antworten mit Begründung – Gegenbeispiele sind als Begründung zugelassen!

1. Ein minimalphasiges System ist immer stabil.
2. Ein stabiles System ist immer minimalphasig.
3. Ein Regelkreis mit Einheitsrückführung bestehend aus einem Regler und einer Strecke mit jeweils stabilen Übertragungsfunktionen ist immer stabil.

(c) Gegeben sei der Regelkreis in Abb. 5.1:

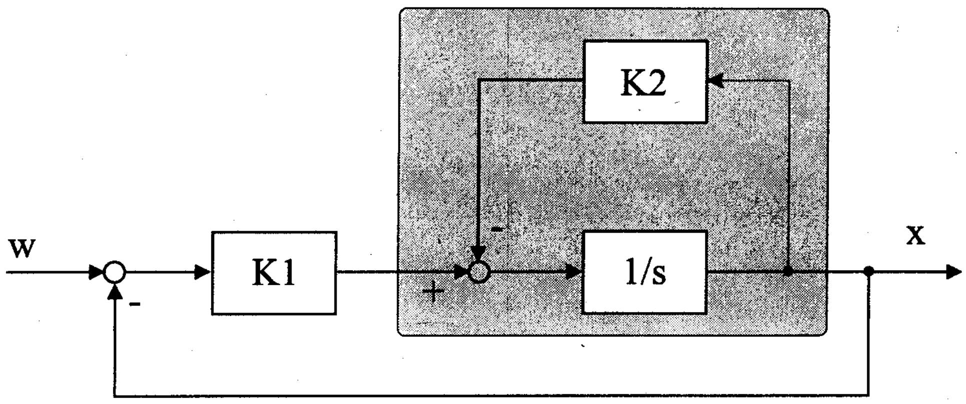


Abb. 5.1: Regelkreis

1. ~~Für welche $K1 \in]-\infty,\infty[$ und $K2 \in]-\infty,\infty[$ ist der Regelkreis~~ stabil?
2. Für welche Werte von $K2 \in]-\infty,\infty[$ ist der Regelkreis stationär genau? Begründung!
3. Geben Sie eine vereinfachte Darstellung des grau hinterlegten Teilregelkreises an.

(d) Gegeben sei folgende Übertragungsfunktion:

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

1. Wie nennt man ein solches Übertragungsglied?
2. Welche typischen Besonderheiten weist dieses Übertragungsglied auf (z.B. bei Anregung durch eine bestimmte Testfunktion)?

1/7

Name: Matrikelnr.:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik/Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. M. Pandit

29.03.1999

Diplomhauptprüfung im Fach Regelungstechnik I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder nichtprogrammierbarer Taschenrechner, Schreib- und Zeichenzeug. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke oder lose Blätter oder **programmierbare Taschenrechner** gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, logarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1) Schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer.

2) Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluß an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).

3) Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern werden nicht bei der Korrektur berücksichtigt!

4) Schreiben Sie nicht mit Bleistift.

5) Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel in den Doppelbogen gehüllt ab.

6) Die Klausur muß wieder in **gehefteter** Form abgegeben werden!

03/99 2/7

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 1

a) Reglereinstellung nach Ziegler-Nichols

Beschreiben Sie die Vorgehensweise beim Reglerentwurf nach der Sprungantwortmethode von Ziegler-Nichols.

Gegeben sei nun die gemessene Sprungantwort einer Regelstrecke (siehe nächstes Blatt).

Ermitteln Sie mit Hilfe der Sprungantwortmethode nach Ziegler-Nichols die Reglerparameter für einen PI-Regler.

b) Digitale Regelung

1) Zeichnen Sie die Anordnung einer digitalen Regelung mit Strecke, Stellglied, Regler und AD, bzw. DA-Umsetzern. Bezeichnen Sie jeweils die Zeitverläufe als Funktionen von t (für den kontinuierlichen Bereich) bzw. als Funktionen von $k*T$ im zeitdiskreten Bereich.

2) Gegeben sei nun ein Regler beschrieben durch

$$\dot{x}_d(t) + 3x_d(t) = \frac{1}{k_R} \cdot \dot{u}(t)$$

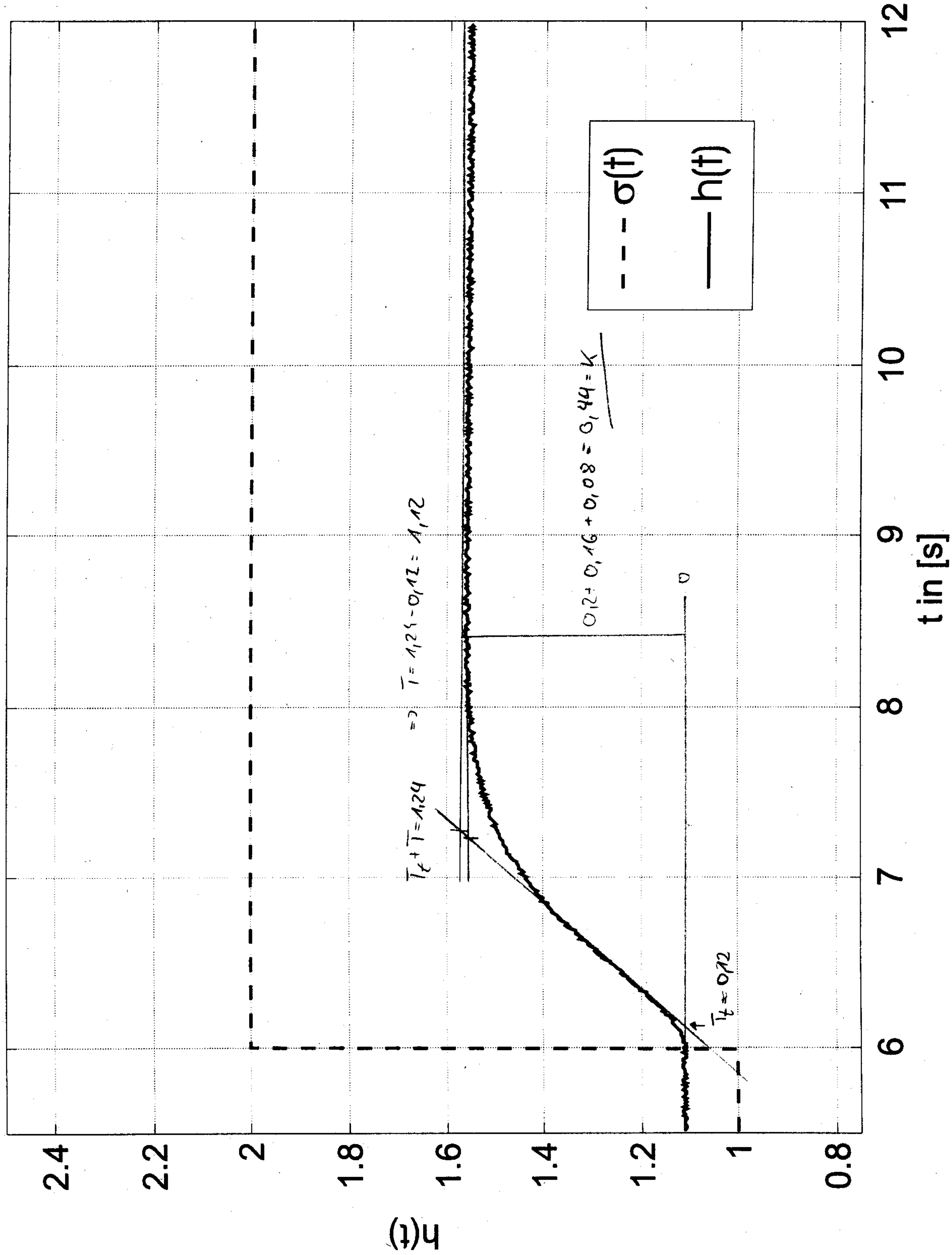
mit $x_d(t)$: Regeldifferenz am Reglereingang und $u(t)$ Stellgrösse am Reglerausgang. Stellen Sie die Übertragungsfunktion des Reglers auf.

Um welchen Reglertyp handelt es sich?
Es ist nun ein Regler als digitaler Regler zu implementieren. Bestimmen Sie den Regelalgorithmus des digitalen Reglers.

Hinweis: Tustin-Transformation: $s \rightarrow \frac{2}{T_A} \cdot \frac{z-1}{z+1}$

3/7

Name: Matrikelnr.:

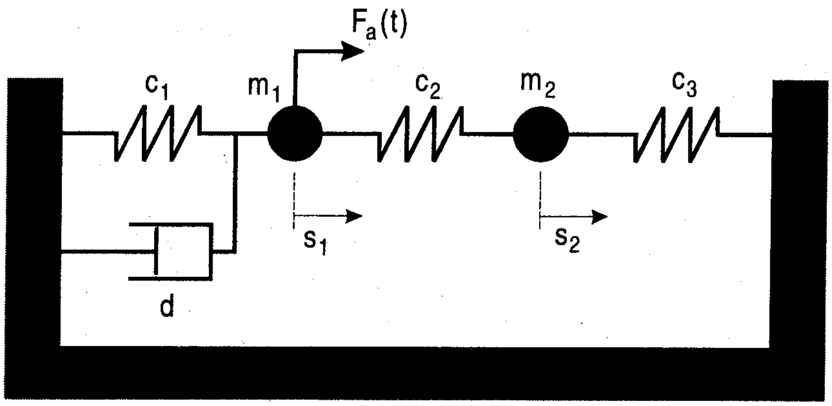


4/7

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 2

Gegeben ist folgendes Feder-Masse-Dämpfer-System mit den Massen m_1 , m_2 und den Federkonstanten c_1 , c_2 , c_3 und einem Dämpfungsglied.



Die Position der Massen ist $s_1(t)$ bzw. $s_2(t)$, ihre Geschwindigkeit ist $v_1(t)$ bzw. $v_2(t)$. Die Dämpfung ist geschwindigkeitsproportional und wird mit der Konstanten d beschrieben. Die Kraft $F_a(t)$ soll als Eingangsgröße und die Bewegung der Masse m_2 als Ausgangsgröße betrachtet werden. Die Zustandsgrößen des Systems sind:

$$x_1 = s_1 \qquad x_2 = v_1 = \dot{x}_1$$

$$x_3 = s_2 \qquad x_4 = v_2 = \dot{x}_3$$

Hinweise: die Erdanziehung der Massen m_1 und m_2 ist zu vernachlässigen. Die Federn, das Dämpfungsglied, sowie die Verbindungen werden als masselos betrachtet.

a) Stellen Sie die Zustandsgleichungen des Systems auf und geben Sie diese in Matrixschreibweise an (Hinweis: Stellen Sie hierzu die Kräftebilanzen für die beiden Massen auf; für die Kraft, die das Dämpfungsglied ausübt, ist die Geschwindigkeit $v_1(t)$ maßgebend).

b) Zeichnen Sie ein Strukturbild des Systems, in das Sie die Zustandsgrößen eintragen. Verwenden Sie, soweit dies möglich ist, für die einzelnen Blöcke die Darstellung mit der Übertragungsfunktion.

c) Ist das System linear (Begründung)?

d) Geben Sie – soweit dies möglich ist – die Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{S_2(s)}{F_a(s)}$$

im Laplace-Bereich an.

e) Berechnen Sie den Endwert von $s_2(t)$ für $t \to \infty$ für eine Sprunganregung $F_a(t) = \sigma(t)$.

5/7

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 3

Gegeben ist folgender Regelkreis:

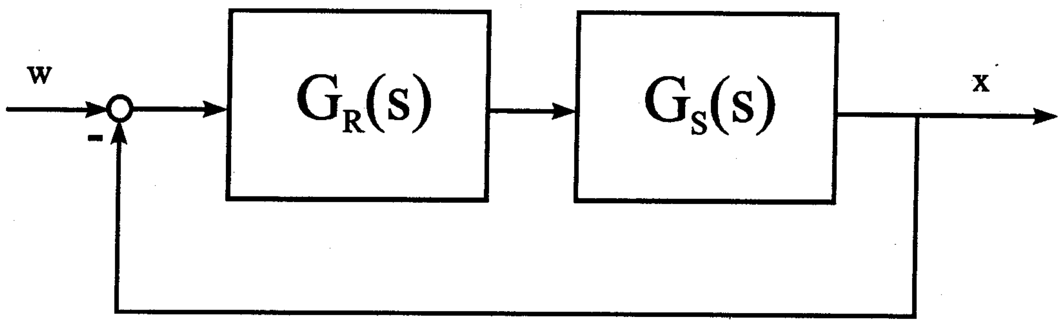


Abb. 3.1: Regelkreis

mit der Regelstrecke

$$G_S(s) = \frac{1}{(1+10s)(1+2s)(1+0,3s)},$$

Für die Anordnung ist ein ***realer PID-Regler*** zu entwerfen mit den Zeitkonstanten $T_I > T_2$ und $T_N = \frac{1}{4} * T_2$

a) Bestimmen Sie die Reglerparameter k, T_I, T_2 und T_N so, daß sich eine Phasenreserve von 60° ergibt.
Hinweis: Phase betrachten bei $\omega[s^{-1}]$ = 0,2 0,5 0,7 1 2 3 4 6 10
Maßstab: 1 cm entspricht 10 dB
1 cm entspricht 30°

Der Streckenfrequenzgang muß nicht gesondert gezeichnet werden!

b) Ist der geschlossene Regelkreis stationär genau? (Begründung !)

c) Für welche Werte von k ist der geschlossene Regelkreis stabil, wenn T_I, T_2 und T_N wie in Aufgabenteil a) gewählt werden?

6 (7

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 4

Gegeben ist der Regelkreis mit Einheitsrückführung in Abb. 4.1

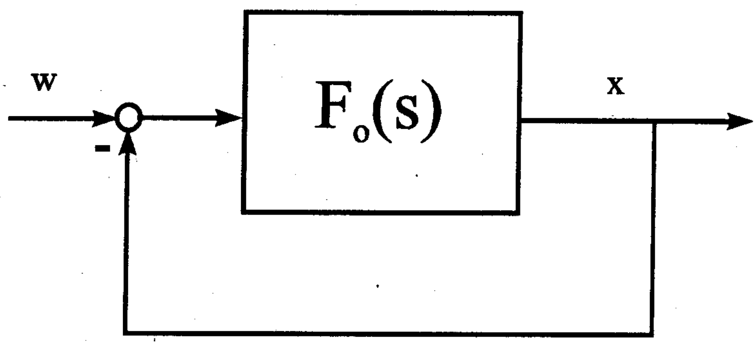


Abb. 4.1: Regelkreis

mit folgender Übertragungsfunktion:

$$F_o(s) = k\,\frac{s-1}{s^2-2s+5}$$

a) Konstruieren Sie die Wurzelortskurve zu obigem Regelkreis (Millimeterpapier verwenden).

Berechnen Sie hierzu auch:

- Verzweigungspunkte
- Schnittwinkel der Äste in den Verzweigungspunkten
- Anstiegswinkel in den kritischen Stellen
- Schnittpunkte mit der imaginären Achse

b) Für welche Werte von k ist der geschlossene Regelkreis stabil?

c) Für eine Anwendung ist eine Dämpfung von $d > 0.7$ und $\omega = 1\ ^1/_s$ gefordert.
Gibt es einen Wert für k, für den diese Bedingungen eingehalten werden können?
Wenn ja, für welchen Wert k ist diese Bedingung erfüllt?
Wenn nein, Begründung angeben.

03/99 7/7

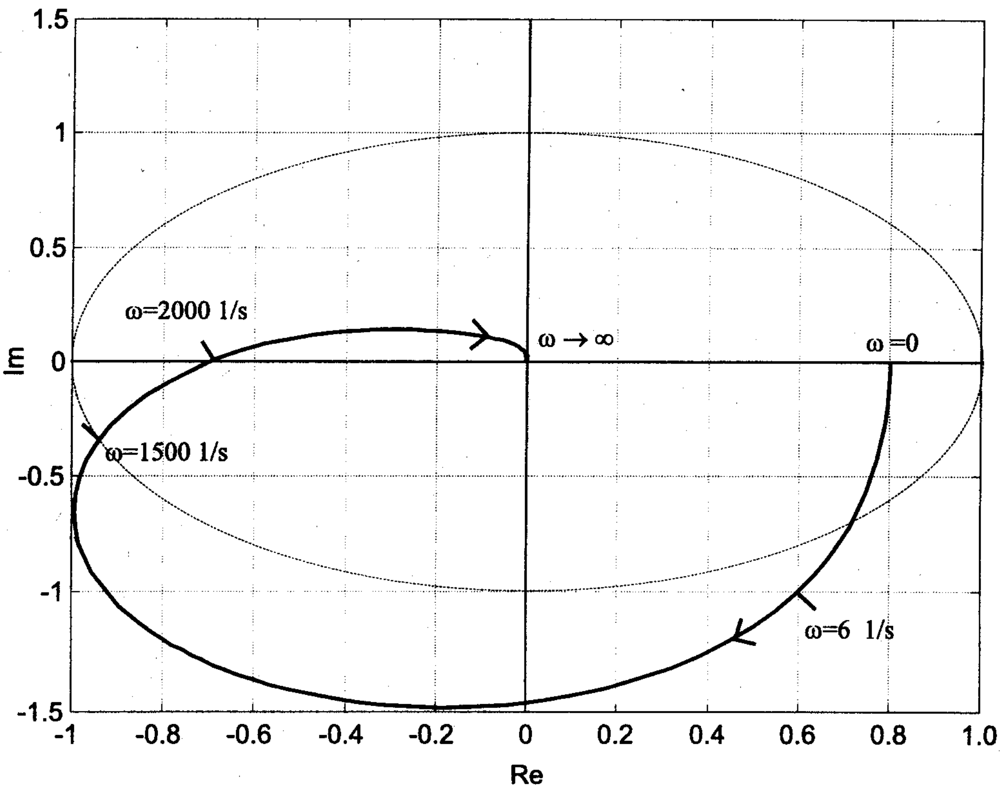
Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 5

a) Wie ist eine Kaskadenregelung (Regelkreis mit unterlagerter innerer Schleife) aufgebaut (Strukturbildskizze)? Wie ist die Vorgehensweise beim Entwurf einer Kaskadenregelung?

b) Was ist ein *Anti-Reset-Windup* und wo wird er eingesetzt?

c) Gegeben ist die Ortskurve eines offenen Regelkreises $F_o(j\omega)$:



1) Welche Aussagen lassen sich über den Regelkreis bezüglich Frequenzverhalten (ω=0.. ∞) und das Verhältnis von Zähler- und Nennergrad machen?
2) Ist der mit Einheitsrückführung geschlossene Regelkreis stabil?
3) Der offene Regelkreis werde mit der Sinusgrösse $u(t)=3*\sin(6*t)$ angeregt. Geben Sie die Antwort des offenen Regelkreises im Zeitbereich an.

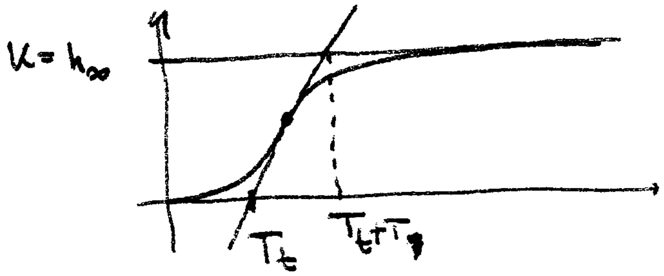
d) Welche Eigenschaften von Stellglied, Regelstrecke und Messeinrichtung grenzen den Bereich der erreichbaren Regelgüte ein?

Regler-Klausur FJ 1999

Aufgabe 1

a) – Sprungerregung des Systems

– aus der Sprungantwort: Ablesen von K, T und T_t:



Tangente im Wendepunkt der Sprungantwort
⇒ Schnittpunkte mit Nulllinie u. h_∞-Linie

– Bestimmung von T_{krit} und K_{krit} mit den Formeln

$$T_{krit} = 4\,T_t \qquad K_{krit} = \frac{2T}{K \cdot T_t}$$

– Festlegen der Regler-Parameter mit den Formeln

PI-Regler: $$G_R(s) = 0{,}45\,K_{krit}\left(\frac{1+0{,}85\,T_{krit}\,s}{0{,}85\,T_{krit}\,s}\right)$$

PID-Regler: $$G_R(s) = 0{,}6\,K_{krit}\left(1+\frac{2}{T_{krit}\,s}+\frac{T_{krit}}{8}\,s\right)$$

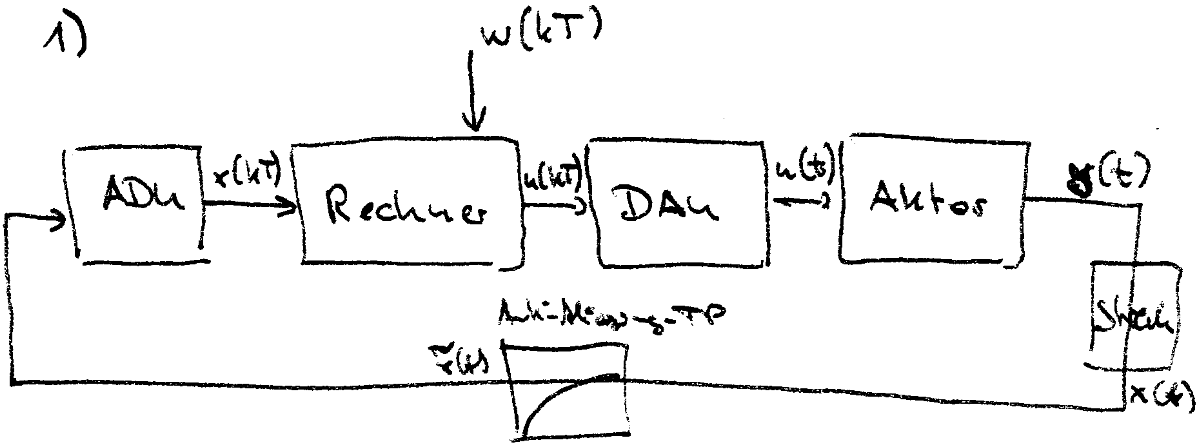
Aus Sprungantwort: $T_t = 0{,}12$ $\quad T_t + T = 1{,}24 \Rightarrow T = 1{,}12$

$K = 0{,}44$

$$\Rightarrow T_{krit} = 0{,}48 \;;\quad K_{krit} = \frac{2{,}24}{0{,}44 \cdot 0{,}12} = 42{,}4$$

$$\Rightarrow \text{PI-Regler:} \quad G_R(s) = 19\left(\frac{1+0{,}408\,s}{0{,}408\,s}\right)$$

b) 1)



2)

$$s X_d(s) + 3 X_d(s) = \frac{1}{K_R} s U(s)$$

$$X_d(s)\,[s+3] = {}^{s}/_{K_R}\, U(s)$$

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{X_d(s)} = \frac{s+3}{s/K_R} = K_R \cdot \frac{s+3}{s}$$

Es handelt sich um einen PI-Regler.

$$G_R(z) = K_R \frac{\frac{2}{T_A}\frac{z-1}{z+1} + 3}{\frac{2}{T_A}\frac{z-1}{z+1}} =$$

$$\frac{2}{T_A}\frac{z-1}{z+1} U(z) = K_R\left(\frac{2}{T_A}\frac{z-1}{z+1} + 3\right) X_d(z)$$

$$2(z-1)U(z) = K_R\left(2(z-1) + 3T_A(z+1)\right) X_d(z) \quad \Big| : z$$

$$2U(z) - 2z^{-1}U(z) = K_R\left(2 - 2z^{-1} + 3T_A + 3T_A z^{-1}\right) X_d(z)$$

$$U(z) = z^{-1}U(z) + K_R\left(1 + \tfrac{3}{2}T_A\right) X_d(z) + K_R\left(\tfrac{3}{2}T_A - 1\right) z^{-1} X_d(z)$$

$$\boxed{u_k = u_{k-1} + K_R\left(1+\tfrac{3}{2}T_A\right) x_{dk} + K_R\left(\tfrac{3}{2}T_A - 1\right) x_{dk-1}}$$

Aufgabe 2

a) Masse 1: $m_1 \ddot{s}_1 = -d\dot{s}_1 - c_1 x_1 + (s_2 - s_1)c_2 + F_A(t)$

$$\Rightarrow \boxed{\ddot{s}_1 = \cancel{\ldots} - \frac{c_1+c_2}{m_1}s_1 + \frac{c_2}{m_1}s_2 - \frac{d}{m_1}\dot{s}_1 + \frac{1}{m_1}F_A(t)}$$

Masse 2: $m_2 \ddot{s}_2 = -(s_2 - s_1)c_2 + (-s_2)\cdot c_3$

$$\boxed{\ddot{s}_2 = -\frac{c_2+c_3}{m_2}s_2 + \frac{c_2}{m_2}s_1}$$

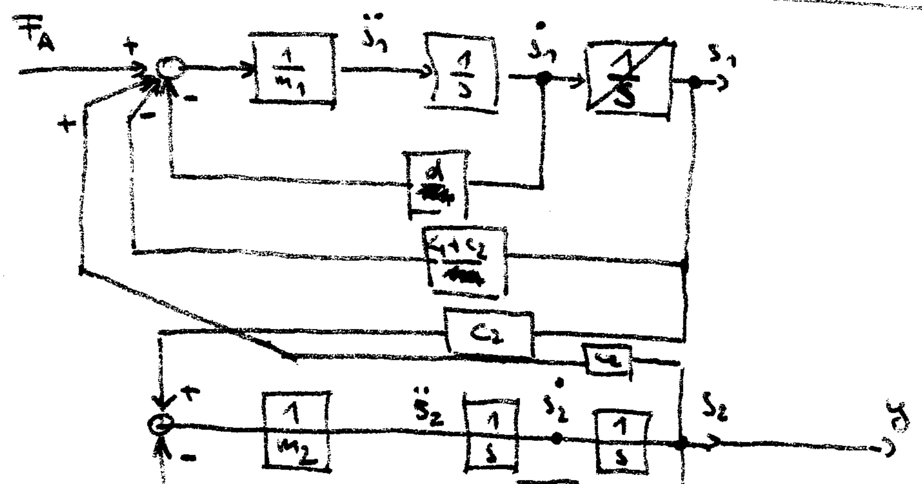
Ausgang: $\boxed{y = s_2}$

Matrixdarstellung: $\underline{x} = \begin{pmatrix} s_1 \\ \dot{s}_1 \\ s_2 \\ \dot{s}_2 \end{pmatrix}$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{s}_1 \\ \ddot{s}_1 \\ \dot{s}_2 \\ \ddot{s}_2 \end{pmatrix}}_{\dot{\underline{x}}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{c_1+c_2}{m_1} & -\frac{d}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_2}{m_2} & 0 & -\frac{c_2+c_3}{m_2} & 0 \end{pmatrix}}_{\underline{A}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} s_1 \\ \dot{s}_1 \\ s_2 \\ \dot{s}_2 \end{pmatrix}}_{\underline{x}} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{\underline{B}} \cdot \underbrace{F_A(t)}_{u}$$

$$\underbrace{y}_{y} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}}_{\underline{C}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} s_1 \\ \dot{s}_1 \\ s_2 \\ \dot{s}_2 \end{pmatrix}}_{\underline{x}} + \underbrace{0}_{\underline{D}} \cdot \underbrace{F_A(t)}_{u}$$

b)



c) Das System ist linear, weil die Matrizen der Zustandsmatrix ausschließlich Konstanten enthalten.

d) $$G(s) = \frac{S_2(s)}{F_A(s)}$$

(I) $$s^2 S_1(s) = -\frac{c_1+c_2}{m_1} S_1(s) + \frac{c_2}{m_1} S_2(s) - \frac{d}{m_1} s S_1(s) + \frac{1}{m_1} F_A(s)$$

$$S_1(s)\left[s^2 + \frac{d}{m_1}s + \frac{c_1+c_2}{m_1}\right] = \frac{c_2}{m_1} S_2(s) + \frac{1}{m_1} F_A(s)$$

$$S_1(s) = \frac{c_2 S_2(s) + F_A(s)}{m_1 s^2 + ds + c_1 + c_2}$$

(II) $$s^2 S_2(s) = -\frac{c_2+c_3}{m_2} S_2(s) + \frac{c_2}{m_2} S_1(s)$$

$$s^2 S_2(s) = -\frac{c_2+c_3}{m_2} S_2(s) + \frac{c_2}{m_2}\frac{c_2}{m_1 s^2 + ds + c_1 + c_2} S_2(s) + \frac{c_2}{m_2}\frac{F_A(s)}{m_1 s^2 + ds + c_1 + c_2}$$

$$S_2(s)\left[s^2 + \frac{c_2+c_3}{m_2} + \frac{c_2^2}{m_2(m_1 s^2 + ds + c_1 + c_2)}\right] = \frac{c_2}{m_2}\frac{F_A(s)}{m_1 s^2 + ds + c_1 + c_2}$$

$$G(s) = \frac{S_2}{F_A} = \frac{\frac{c_2}{m_2}\frac{1}{m_1 s^2 + ds + c_1 + c_2}}{s^2 + \frac{c_2+c_3}{m_2} + \frac{c_2^2}{m_2(m_1 s^2 + ds + c_1 + c_2)}}$$

$$= \frac{c_2}{m_2 s^2(m_1 s^2 + ds + c_1 + c_2) + (c_2+c_3)[m_1 s^2 + ds + c_1 + c_2] + c_2^2}$$

e) $$\lim_{t\to\infty} h_2(t) = \lim_{s\to 0} s\, G(s)\cdot\frac{1}{s} = G(0) = \frac{c_2}{(c_2+c_3)(c_1+c_2) + c_2^2}$$

$$= \frac{c_2}{c_2 c_1 + c_2^2 + c_3 c_1 + c_3 c_2 + c_2^2} = \frac{c_2}{2c_2^2 + c_1 c_2 + c_1 c_3 + c_2 c_3}$$

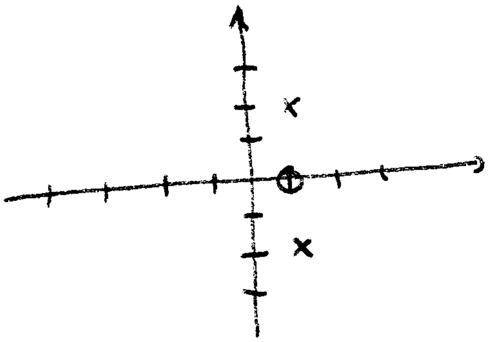
Aufgabe 4

a) $$F_o(s) = k \frac{s-1}{s^2-2s+5}$$

Nullstellen: n_1: $s = 1$

Pole: $s^2-2s+5=0$

$$s_{1,2} = \frac{2 \pm \sqrt{4-20}}{2} = 1 \pm \frac{4i}{2} = 1 \pm 2i$$



- $n-m = 2-1 = 1$ Ast läuft ins Unendliche
- Bereich der reellen Achse von $-\infty$ bis $+1$ ist Teil der WOK
- nur 1 Asympt. $\Rightarrow$ kein Wurzelschwerpunkt
- Anstiegswinkel d. Asympt. $= \pi$
- Verzweigungspunkt: $\sum \frac{\varepsilon_\nu}{s-s_\nu} = 0$

$$\frac{1}{s-1} - \frac{1}{s-1-2i} - \frac{1}{s-1+2i} = 0$$

$\Rightarrow \quad s^2-2s+5 - (s-1)(s-1+2i) - (s-1)(s-1-2i) = 0$

$\Rightarrow \quad s^2-2s+5 - 2(s-1)^2 = 0$

$\Rightarrow \quad s^2-2s+5-2(s^2-2s+1) = 0$

$\Rightarrow \quad -s^2+2s+3 = 0 \quad \Rightarrow \quad s_{1,2} = \frac{-2 \pm \sqrt{4+12}}{-2}$

$$= 1 \pm \frac{4}{-2} = 1 \pm 2$$

$\Rightarrow \quad s_1 = -1 \qquad s_2 = 3$

nur $s_1 = -1$ liegt auf d. WOK $\Rightarrow$ Verzweigungspunkt b. $\boxed{s_1 = -1}$

- Schnittwinkel i. Verzweigungspunkt: $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$
- Schnittpunkte mit d. j-Achse:

$$k(j\omega-1) + (j\omega)^2 - 2j\omega + 5 = 0$$
$$k(j\omega-1) - \omega^2 - 2j\omega + 5 = 0$$

Re: $-k-\omega^2+5 = 0$ Im: $k\omega - 2\omega = 0$

$3 = \omega^2$ $\omega(k-2) = 0$

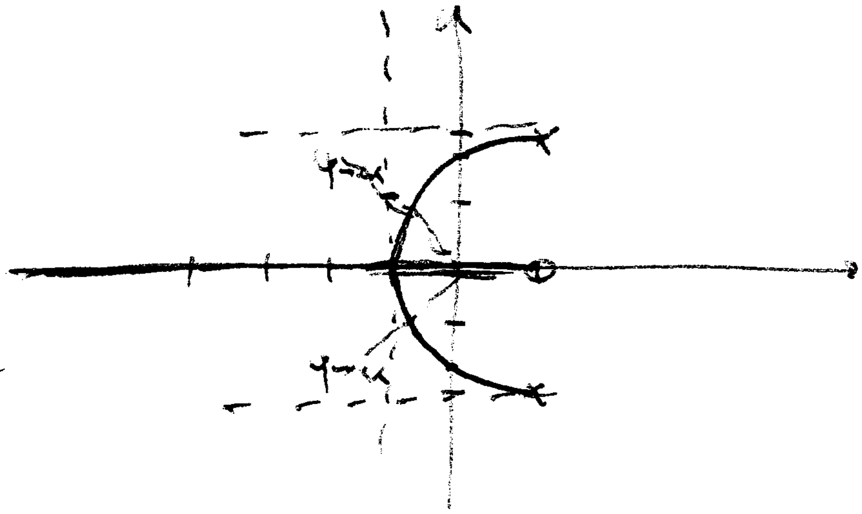
$\Rightarrow \omega = \pm\sqrt{3} \approx \pm 1{,}7$ $\omega = 0 \lor k-2 = 0$, $k = 2$

- Austrittswinkel: krit. Stelle

n_1: π

p_1: $-\pi$

p_2: $-\pi$



b) $K_{1krit} = 2$

$$K_{2krit} = \frac{|-1-2i|\,|-1+2i|}{|0-1|} = \frac{1^2+2^2}{1} = 5$$

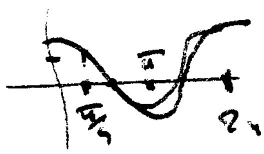
$\boxed{2 < k < 5}$ Stabilitätsbereich

c) $d = 0{,}7 \rightarrow \varphi = 45°$

für $d = 0{,}7$ ist $\omega < 1$

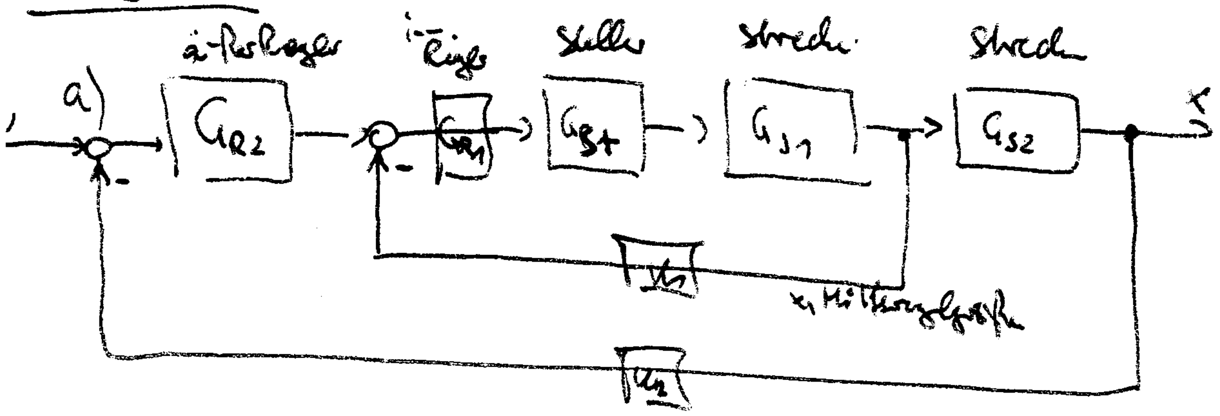
für $d > 0{,}7$ wird φ kleiner und ω kleiner

$\Rightarrow$ es gibt kein solches k.



Aufgabe 5

a)



I) Entwurf des inneren Reglers

II) Zusammenfassen des inneren Regelkreises zu einem Block (d. geregelte innere Schleife)

III) Entwurf des äußeren Reglers

b) ~~verhindert, dass~~ bei Reglern mit I-Verhalten und beschränkter Stellgröße ~~der Regler~~ würde die Regeldifferenz aufintegriert, wenn die maximale Stellgröße nicht ausreicht.

Wenn das Vorzeichen der Regeldifferenz wechselt, wird zunächst das übermäßig ~~angesammelt~~ aufintegrierte abintegriert, bevor eine entsprechende Stellgröße erzeugt werden kann.

Anti-Reset-Windup verhindert dieses Problem, indem es nach einem Vorzeichenwechsel der Stellgröße ~~bei~~ von der maximalen bzw. minimalen Stellgröße ausgeht.

Wird bei industriellen PI und PID-Reglern eingesetzt.

10

c) 1) Tiefpassverhalten

Nennergrad um 3 größer als Zählergrad

stabil

2) Ja, läßt −1 links liegen

3) $\omega = 6$: $|F_0(j6)| = 0{,}6^2 + 1^2 = \sqrt{1{,}36}$

$\angle F_0(j6) = \arctan \frac{-1}{0{,}6} = -70^\circ = -1{,}03$

-59°

$\Rightarrow \quad y(t) = 1{,}36 \cdot 3 \sin(6t + 1{,}03)$

d) Stellglied: beschränkt

Regelstrecke: träge, nichtlinear

Messeinrichtung: ungenau, verrauscht

RegTe - Klausur H 99

Aufgabe 1.1

(a) - Es wird experimentell bestimmt, ab welcher Verstärkung K_{krit} der Regelkreis instabil wird.

- Die Frequenz ω_{krit} mit der der Regelkreis bei dieser Verstärkung schwingt, wird ebenfalls ermittelt.
- Aus K_{krit} und $T_{krit} = \frac{1}{\omega_{krit}}$ werden dann die Reglerparameter berechnet.

Für PI-Regler: $G_R(s) = 0{,}45\, K_{krit}\left(\frac{1+0{,}85\, T_{krit}\cdot s}{0{,}85\, T_{krit}\cdot s}\right)$

PID-Regler: $G_R(s) = 0{,}6\, K_{krit}\left(1+\frac{2}{T_{krit}\, s}+\frac{T_{krit}}{8}\, s\right)$

(b) 7 Perioden in $(38-30)s$

$$\omega_{krit}.\cancel{f} = \frac{7}{8s} \Rightarrow T_{krit} = \frac{8}{7}s$$

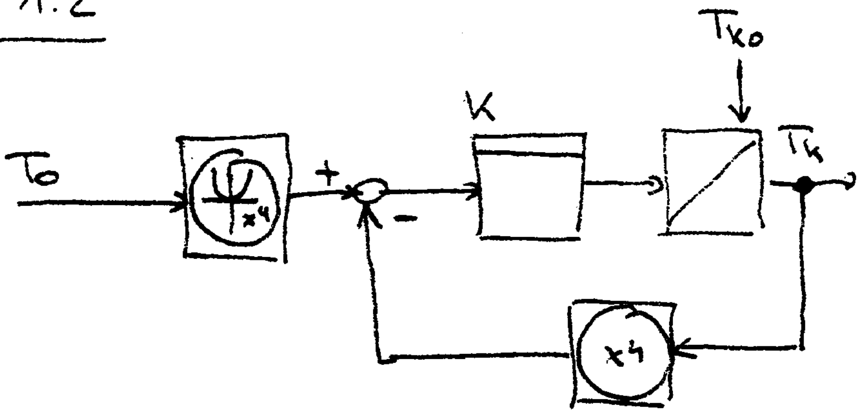
$$K_{krit} = 1{,}7$$

$$G_R(s) = 0{,}45\, K_{krit}\left(\frac{1+0{,}85\, T_{krit}\cdot s}{0{,}85\, T_{krit}\cdot s}\right)$$

$$= 0{,}765\left(\frac{1+0{,}971\, s}{0{,}971\, s}\right) = 0{,}788\left(\frac{1+0{,}971\, s}{s}\right)$$

Aufgabe 1.2

(a)



(b) stat. Zustand: Eingänge der Integrierglieder Null

$$K\left(T_0^4(t) - T_K^4(t)\right) = 0$$

$$\Rightarrow \quad T_0^4(t) = T_K^4(t)$$

$$\Rightarrow \quad T_K\big|_{AP} = T_0\big|_{AP}$$

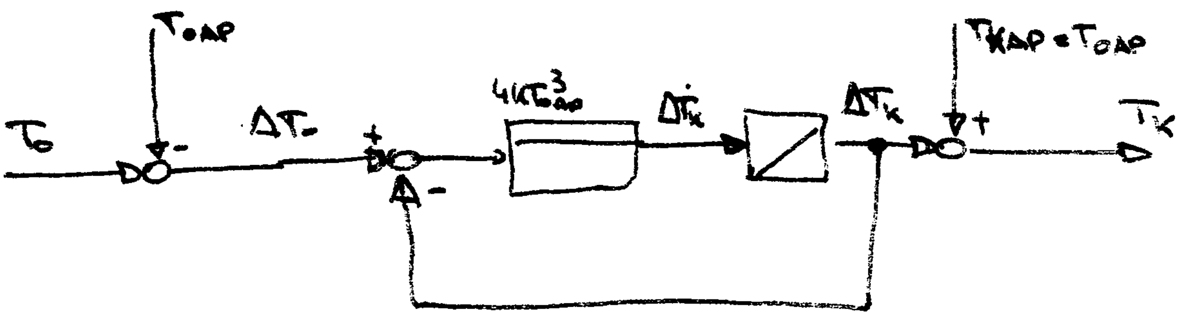
Der Körper nimmt die Temperatur $T_{0,AP}$ an.

(c) Linearisierung:

$$\Delta\dot{T}_K(t) = K\left[4T_0^3\big|_{AP}\cdot\Delta T_0 - 4T_K^3\big|_{AP}\cdot\Delta T_K\right]$$

$$= K\left[4T_{0AP}^3\,\Delta T_0 - 4T_{0AP}^3\,\Delta T_K\right]$$

$$= 4KT_{0AP}^3\left[\Delta T_0 - \Delta T_K\right]$$



(d) $$sT_K(s) = 4KT_{0AP}^3\left[T_0(s) - T_K(s)\right]$$

$$T_K(s)\left[s + 4KT_{0AP}^3\right] = 4KT_{0AP}^3\,T_0(s) \Rightarrow G(s) = \frac{T_K(s)}{T_{\ldots}} = \frac{4KT_{0AP}^3}{\ldots}$$

Aufgabe 2

(a) $dV_1(t) = [q_E(t) - q(t)]\, dt$

$$\Rightarrow \dot{V}_1 = q_E - q_A \Rightarrow \dot{h}_1 = \frac{1}{A_1} q_E - \frac{1}{A_1} q = \frac{1}{A_1} q_E - \frac{1}{A_1 r_1}(p_1 - p_2)$$

$$\boxed{\dot{h}_1 = \frac{1}{A_1} q_E - \frac{\rho g}{A_1 r_1} h_1 + \frac{\rho g}{A_1 r_1} h_2}$$

$dV_2(t) = [q(t) - q_A(t)]\, dt$

$$\Rightarrow \dot{V}_2 = q - q_A \Rightarrow \dot{h}_2 = \frac{1}{A_2 r_1}(p_1 - p_2) - \frac{1}{A_2 r_2} p_2$$

$$\boxed{\dot{h}_2 = \frac{\rho g}{A_2 r_1} h_1 - \frac{\rho g}{A_2}\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) h_2}$$

$$\boxed{y = q_A = \frac{\rho g}{r_2} h_2}$$

Matrixdarstellung:

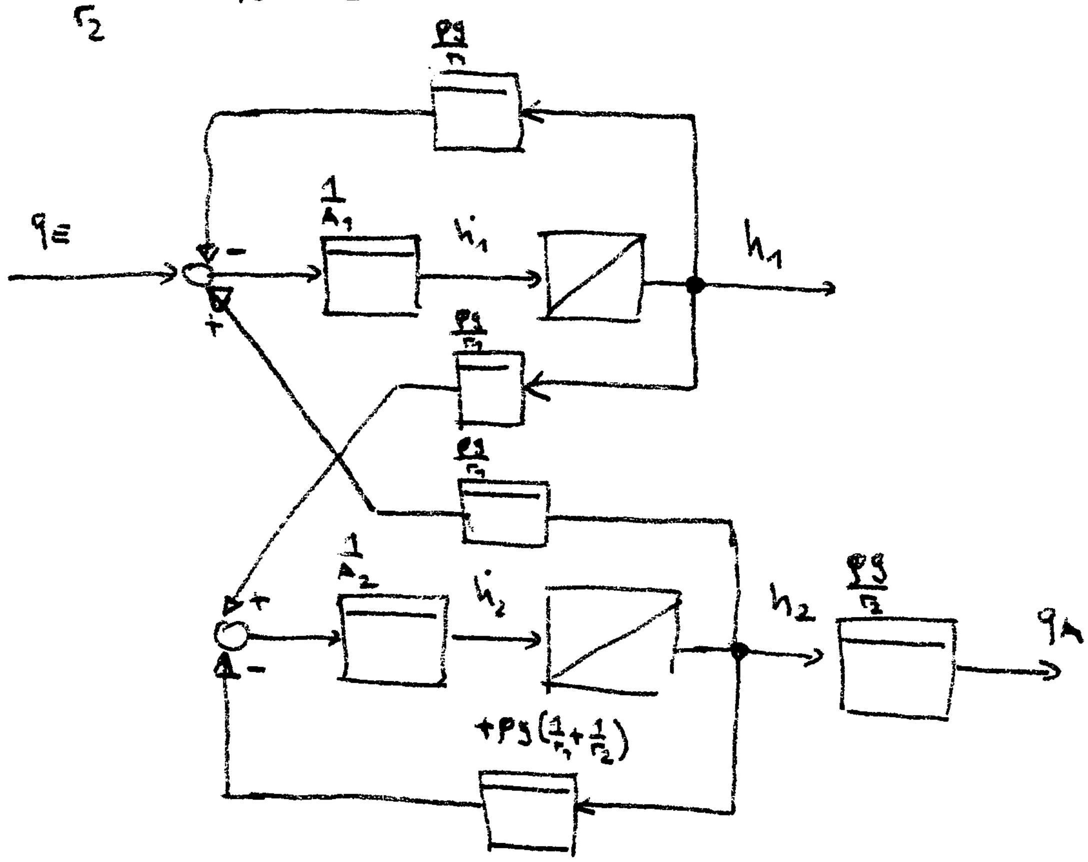
$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{pmatrix}}_{\underline{\dot{x}}} = \underbrace{\begin{pmatrix} -\frac{\rho g}{A_1 r_1} & \frac{\rho g}{A_1 r_1} \\ \frac{\rho g}{A_2 r_1} & -\frac{\rho g}{A_2}\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) \end{pmatrix}}_{\underline{A}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix}}_{\underline{x}} + \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{A_1} \\ 0 \end{pmatrix}}_{\underline{B}} \cdot \underbrace{q_E}_{\underline{u}}$$

$$\underbrace{q_A}_{\underline{y}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & \frac{\rho g}{r_2} \end{pmatrix}}_{\underline{c}} \underbrace{\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix}}_{\underline{x}} + \underbrace{0}_{\underline{D}} \cdot \underbrace{q_E}_{\underline{u}}$$

(b) $\dfrac{\rho g}{A_1 r_1} = 12\,500 \qquad \dfrac{\rho g}{A_2 r_1} = 25\,000$

$$\frac{\rho g}{A_2}\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) = 105\,000 \qquad \frac{1}{A_1} = 1$$

$$\frac{\rho g}{r_2} = 40\,000$$



(c)

$$G_S(s) = \underline{C}\left(s\underline{I} - \underline{A}\right)^{-1}\underline{B} + \underline{D}$$

$$s\underline{I} - A = \begin{pmatrix} s+12\,500 & s-12\,500 \\ s-25\,000 & s+105\,000 \end{pmatrix}$$

$$\left(s\underline{I} - A\right)^{-1} = \frac{1}{(s+12\,500)(s+105\,000) - (s-25\,000)(s-12\,500)} \begin{pmatrix} s+105\,000 & 12\,500-s \\ 25\,000-s & s+12\,500 \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{s^2 + 117\,500s + 1\,312\,500\,000 - \left[s^2 - 37\,500s + 312\,500\,000\right]} \begin{pmatrix} \ldots \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{80\,000\,s + 10^9} \begin{pmatrix} \ldots \end{pmatrix}$$

5

$$(sI-A)^{-1}\underline{B} = \frac{1}{8\cdot10^5 s + 10^9}\begin{pmatrix} s+105000 & 12500-s \\ 25000-s & s+12500 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{8\cdot10^5 s + 10^9}\begin{pmatrix} s+105000 \\ 25000-s \end{pmatrix}$$

$$\underline{c}(sI-A)^{-1}\underline{B} = \frac{1}{8\cdot10^5 s + 10^9}\begin{pmatrix} 0 & 40000 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} s+105000 \\ 25000-s \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{8\cdot10^5 s + 10^9}(40000)(25000-s)$$

$$\boxed{G(s) = \frac{4}{80s + 10^5}(25000-s) = \frac{4(25000-s)}{80s + 100000}}$$

Aufgabe 3

(a) PI-Regler: $G_R(s) = K_R \frac{1+T_1 s}{s}$

$$F_{oSM} = \cancel{12{,}5\cdot10^{-3}}\ 14{,}7\ \frac{1}{(1+12{,}5\cdot10^{-3}s)}\cdot\frac{1}{s}$$

$14{,}7 \hat{=} 23{,}3\,dB$ $\qquad T_1 = 12{,}5\cdot10^{-3} \Rightarrow \omega_1 = 80$

Streckenzeitkonstante kürzen geht nicht ⇒ System wird instabil!

I-Anteil des Reglers ⇒ Konst. $-90°$

Faktor $(1+T_1 s)$ ⇒ Drehung von $0° \to +90°$

Verschiebe Phasenwinkel, so dass Durchtrittsfrequenz möglich hoch (solange nach rechts schieben wie möglich)

$\Rightarrow \omega_D \approx 20 \Rightarrow T_1 = \frac{1}{6} = 0{,}166$

$$\Rightarrow F_u = K_R\cdot14{,}7\ \frac{1+\frac{1}{6}s}{(1+\frac{1}{80}s)}\cdot\frac{1}{s^2}$$

$$\Rightarrow G_R(s) = 6{,}8\ \frac{1+\frac{1}{6}s}{s}$$

0 dB = 14,7 · K_R

⇒ K_R … dB … $\cancel{K_R}$ … [illegible]

Aufgabe 4

$$F_0(s) = k\,\frac{s-1}{s^2-2s+5}$$

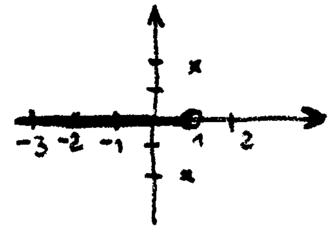
(a) – Nullstellen: $\boxed{n_1:\ s=1}$

Pole: $s^2-2s+5=0 \Rightarrow s_{1/2} = \frac{2\pm\sqrt{4-20}}{2} = 1 \pm \frac{\sqrt{-16}}{2}$

$= 1 \pm 2i$

$\boxed{p_1:\ s = 1+2i}$ $\boxed{p_2:\ s = 1-2i}$

– $n-m = 2-1 = 1$ Ast läuft ins Unendliche



– Bereich von $-\infty$ bis 1 der reellen Achse ist Teil der WOK

– nur eine Asymptote $\Rightarrow$ kein Wurzelschwerpunkt

– Verzweigungspunkte:

$$\sum_{\lambda=1}^{m+n} \frac{e_\lambda}{s-\lambda} = 0 \Rightarrow \frac{1}{s+1} + \frac{-1}{s-1-2i} + \frac{-1}{s-1+2i} = 0$$

$$\Rightarrow s^2-2s+5-(s+1)(s-1+\cancel{2i})-(s+1)(s-1-\cancel{2i}) = 0$$

$$\Rightarrow s^2-2s+5-2(s+1)(s-1) = 0$$

$$\Rightarrow s^2-2s+5-2(s^2-1) = 0$$

$$\Rightarrow -s^2-2s+3 = 0 \Rightarrow s^2+2s-3=0$$

$$\Rightarrow s_{1/2} = \frac{-2\pm\sqrt{4+12}}{2} = \frac{-2\pm 4}{2}$$

$s_1 = 1$ liegt auf Pol $\boxed{s_2 = -3}$ Verzweigungspunkt

$\boxed{3 - d - 1}$

– Schnittwinkel im Verzweigungspunkt $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$

– Schnittpunkte mit der j-Achse:

$k(s-1)+s^2-2s+5 = 0 \quad | \; s \to j\omega$

Re: $-k-\omega^2+5=0$ (I) Im: $k\omega-2\omega=0$ (II)

$-2+5=\omega^2$ $\omega(k-2)=0$

$\omega^2=3$ $\boxed{\omega=0} \vee k=2$ in (I)

$\boxed{\omega_{1,2}=\pm\sqrt{3}}$

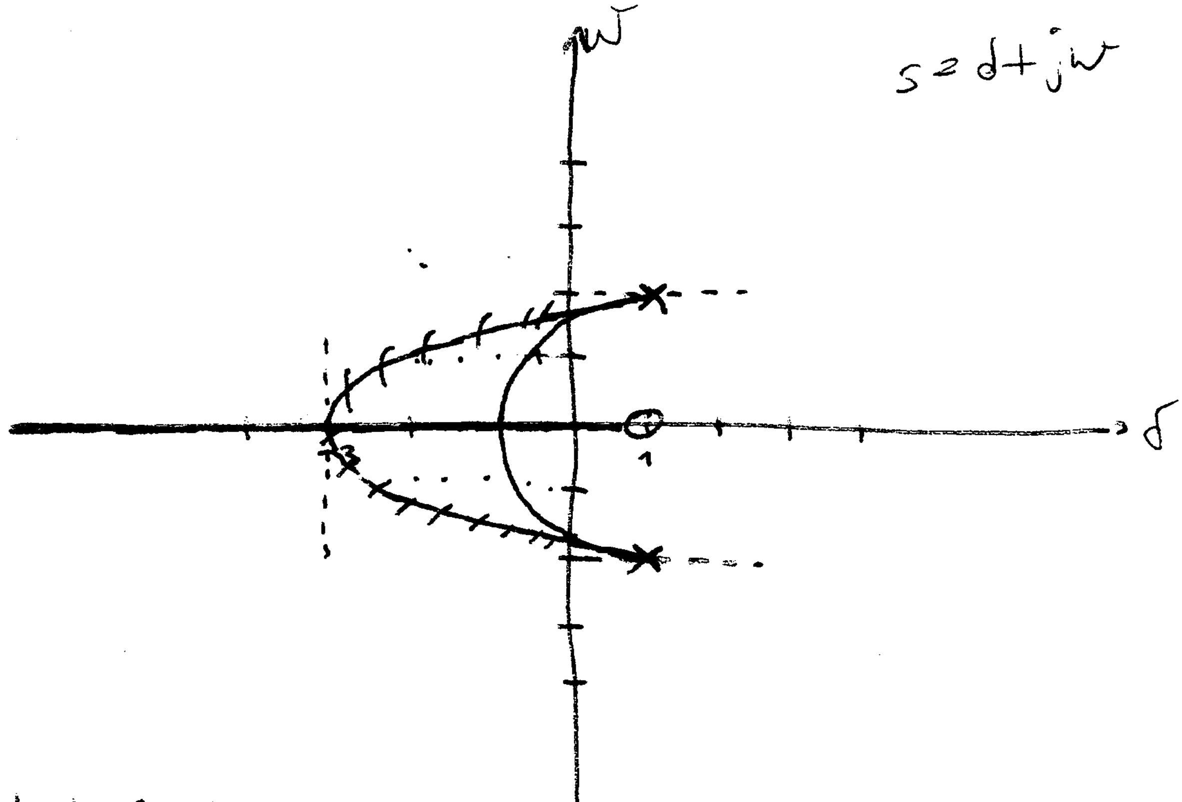
– Austrittswinkel in den krit. Stellen:

n_1: $\varphi_{10}=\frac{-1}{e_{1r}}\sum e_\chi \angle s_1-s_\chi+\frac{\pi}{e_{1r}}$

$=\frac{-1}{1\cdot 1}\left[(-1)\left(-\frac{\pi}{2}\right)+(-1)\left(\frac{\pi}{2}\right)\right]+\frac{\pi}{1\cdot 1}=\underline{\underline{\pi}}$

p_1: $\varphi_{20}=\frac{-1}{-1\cdot 1}\left[(1)\frac{\pi}{2}+(-1)\frac{\pi}{2}\right]+\frac{\pi}{-1\cdot 1}=\underline{\underline{-\pi}}$

p_2: $\varphi_{30}=\frac{-1}{-1\cdot 1}\left[(1)\left(-\frac{\pi}{2}\right)+(-1)\left(-\frac{\pi}{2}\right)\right]+\frac{\pi}{-1\cdot 1}=\underline{\underline{-\pi}}$



$s=\sigma+j\omega$

b) stabil für $k_1<k<k_2$

$k_1=\frac{|j\sqrt{3}-1-2i|\;|j\sqrt{3}-1+2i|}{|j\sqrt{3}-1|}=\cancel{\ldots}=6{,}186$

$$k_2 = \frac{|-1-2i|\,|-1+2i|}{|-1|} = \frac{1^2+4}{1} = 5$$

$$k_1 = \frac{\sqrt{1^2+(\sqrt{3}-2)^2}\;\sqrt{1^2+(\sqrt{3}+2)^2}}{\sqrt{1^2+3}}$$

$(8-2\sqrt{3})(8+$
$= 8^2 -$

$$= \frac{\sqrt{(1+3-2\sqrt{3}+4)(1+3+2\sqrt{3}+4)}}{2} = \frac{\sqrt{\cancel{64}\; 16}}{2}$$

$$= \underline{\underline{2}}$$

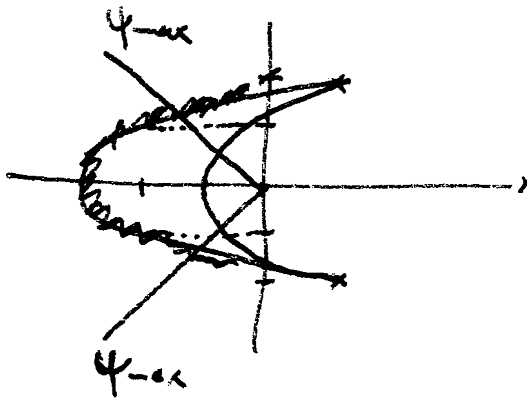
⇒ Der RK ist stabil für $\underline{\underline{2 < k < 5}}$

(c) $d > 0{,}7$ und $\omega = 1$

$d = \cos\varphi$

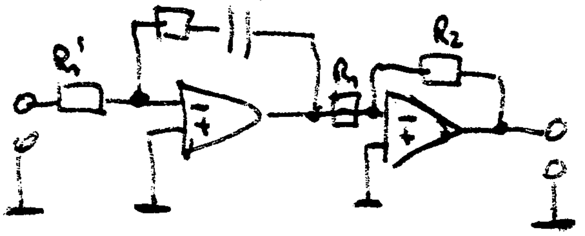
$d > 0{,}7 \Rightarrow \varphi < 45°$

$\varphi \leq 45°$ führt in
bei $\omega < 1$
⇒ nicht erfüllbar



Aufgabe 5

(a)



(b) 1. Richtig, minimalphasig: alle Pole u. Nst. in d. ~~recht~~ linken Halbebene ⇒ stabil

2. falsch $\frac{s-1}{s^2+2s+1}$ ist stabil weil Nenner HP, also nicht minimalphasig

3. $F_K(s) = \frac{Z_1}{N_1} \cdot \frac{Z_2}{N_2}$

$$F_W(s) = \frac{Z}{Z+N} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 Z_2 + N_1 N_2}$$ 3)

Geg.beispiel: Strecke $G_S(s) = \frac{s-1}{s+1}$

Regler $= 1$

$$F_K(s) = \frac{s-1}{s+1}$$

$$F_W(s) = \frac{s-1}{s+1+s-1} = \frac{s-1}{2s}$$

instabil

(c) $X(s) = \left[(W-X)K_1 - XK_2\right] \cdot \frac{1}{s}$

$$X = \frac{WK_1}{s} - \frac{XK_1}{s} - \frac{XK_2}{s} \quad | \cdot s$$

$$sX = WK_1 - XK_1 - XK_2$$

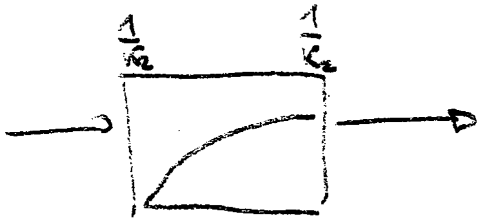
$$X\left[s + K_1 + K_2\right] = WK_1$$

$$\Rightarrow \frac{X}{W} = \frac{K_1}{s+K_1+K_2} \qquad 1.)\ K_1 + K_2 > 0$$

2.) $G(0) = \frac{K_2}{K_1+K_2}$ stat. Genauigkeit für $K_2 = 0$

3.) $sY = -K_2 Y + X \Rightarrow [s+K_2]\, Y = X \Rightarrow \frac{Y}{X} = \frac{1}{s+K_2} = \frac{1}{K_2} \ldots$

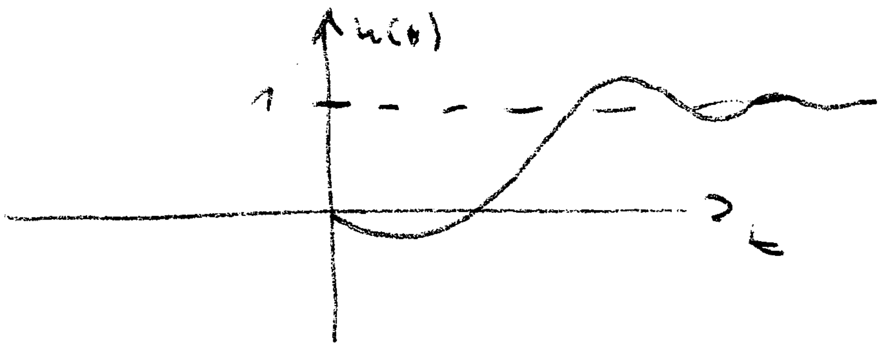
3.



VZ1-Glied

(d) $$G(s) = \frac{s-2}{(s+1)(s+3)}$$

1. Nichtminimalphasig
2. Die Sprungantwort schlägt zunächst in der Endwert entgegengesetzten Richtung aus.



1/6

Name: Matrikelnr.:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik/Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. M. Pandit

05.10.1998

Diplomhauptprüfung
im Fach
Regelungstechnik I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder nichtprogrammierbarer Taschenrechner, Schreib- und Zeichenzeug. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke oder lose Blätter oder **programmierbare Taschenrechner** gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, logarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1) Schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer.

2) Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluß an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).

3) Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern werden nicht bei der Korrektur berücksichtigt!

4) Schreiben Sie nicht mit Bleistift.

5) Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel in den Doppelbogen gehüllt ab.

6) Die Klausur muß wieder in **gehefteter** Form abgegeben werden!

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 1

Gegeben ist folgendes Feder-Masse-System mit den Massen m_1, m_2 und den Federkonstanten c_1, c_2 und einem Dämpfungsglied.

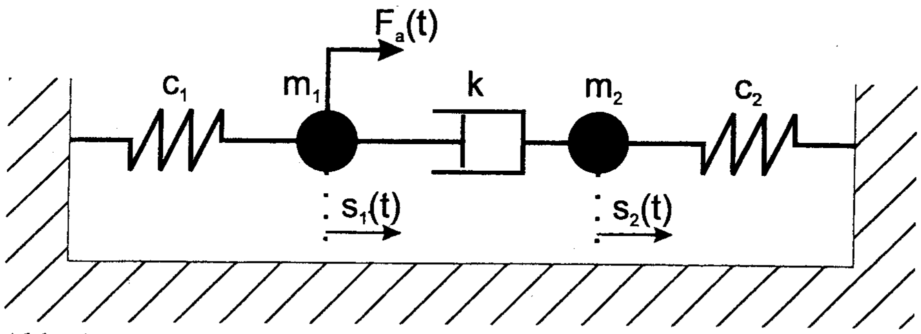


Abb. 1.1: Feder-Masse-Dämpfer-System

Die Position der Massen ist $s_1(t)$ bzw. $s_2(t)$, ihre Geschwindigkeit ist $v_1(t)$ bzw. $v_2(t)$. Die Dämpfung ist geschwindigkeitsproportional und wird mit der Konstanten k beschrieben. Die Kraft $F_a(t)$ soll als Eingangsgröße und die kinetische Energie der Anordnung

$$E_{Kin} = \frac{1}{2}\, m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2}\, m_2 \cdot v_2^2$$

als Ausgangsgröße betrachtet werden (die Erdanziehung ist zu vernachlässigen). Die Zustandsgrößen des Systems sind:

$$x_1 = s_1 \qquad x_2 = v_1 = \dot{x}_1$$
$$x_3 = s_2 \qquad x_4 = v_2 = \dot{x}_3$$

a) Stellen Sie die Zustandsgleichungen des Systems auf und geben Sie diese in Matrixschreibweise an (Hinweis: Stellen Sie hierzu die Kräftebilanzen für die beiden Massen auf; für die Kraft, die das Dämpfungsglied ausübt, ist die Differenz von $v_2(t)$ und $v_1(t)$ maßgebend).

b) Zeichnen Sie ein Strukturbild des Systems, in das Sie die Zustandsgrößen eintragen. Verwenden Sie, soweit dies möglich ist, für die einzelnen Blöcke die Darstellung mit der Übertragungsfunktion.

c) Ist das System linear (Begründung)?

d) Berechnen Sie den Wert der Zustandsgrößen $\underline{x}_0$ und des Ausganges y_0 für $t \to \infty$, wenn $F_a(t) = F_0 \cdot \sigma(t)$ (F_0 = const.$\neq 0$).

3/6

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 2

Gegeben ist ein offener Regelkreis $F_0(s)$:

$$F_o(s) = \frac{s - 1}{(s + 1)(s - p)}$$

a) Für welche Pollagen p ist der **geschlossene** Regelkreis bei negativer Einheitsrückführung (Standardregelkreis) stabil?

b) Wie groß ist die stationäre Regelabweichung in Abhängigkeit von p bei konstantem Sollwert (Sollwert $w(t) = 1$)?

c) Wie groß ist die Durchtrittsfrequenz ω_D in Abhängigkeit von p?

d) Existiert die Durchtrittsfrequenz ω_D für stabile Regelkreise?

e) Skizzieren Sie die Ortskurve von $F_0(j\omega)$ für $p = 0$.

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 3

Gegeben ist folgender Regelkreis:

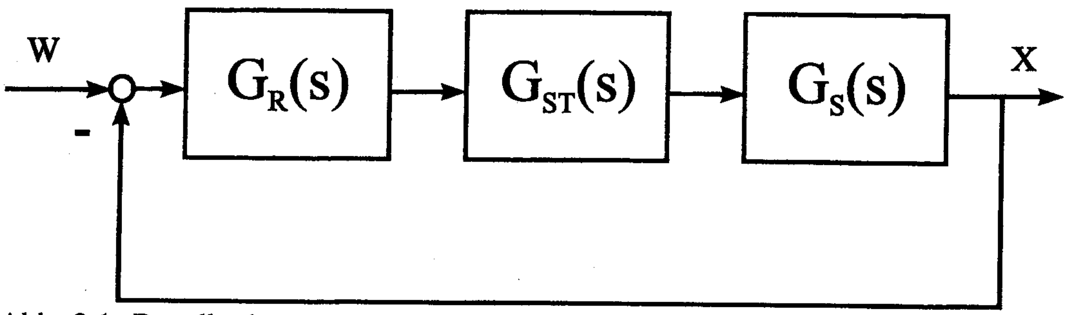


Abb. 3.1: Regelkreis

mit der Regelstrecke

$$G_S(s) = \frac{1}{(1 + 10s)(1 + 2s)(1 + 0{,}3s)},$$

der Stelleinrichtung

$$G_{ST}(s) = \frac{2}{s}$$

und dem Regler

$$G_R(s) = k\,\frac{1 + T_R s}{1 + 0{,}09s}.$$

a) Bestimmen Sie die Reglerparameter k und T_R so, daß sich eine Phasenreserve von 45° ergibt.
Hinweis: Phase betrachten bei $\omega[s^{-1}]$ = 0,2 0,4 0,8 2 4 8
Maßstab: 1 cm entspricht 10 dB
1 cm entspricht 50°

Der Streckenfrequenzgang muß nicht gesondert gezeichnet werden!

b) Ist der geschlossene Regelkreis stationär genau?

c) Für welche Werte von k ist der geschlossene Regelkreis stabil, wenn T_R wie in Aufgabenteil a) gewählt wird?

d) Wie nennt man den verwendeten Reglertyp?

5/6

Name:

Matrikelnr.:

Aufgabe 4

Gegeben ist der Regelkreis in Abb. 4.1

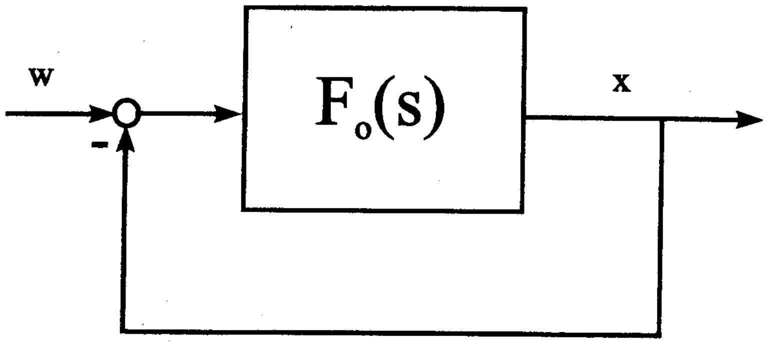


Abb. 4.1: Regelkreis

mit folgender Übertragungsfunktion:

$$F_o(s) = k \frac{s + 1}{s^2(s + 10)}$$

a) Konstruieren Sie die Wurzelortskurve zu obigem Regelkreis (Millimeterpapier verwenden).

Berechnen Sie hierzu auch:

- Anstiegswinkel der Asymptoten
- Verzweigungspunkte
- Schnittpunkte mit der imaginären Achse

b) Existieren Mehrfachpole bei geeigneter Wahl des Verstärkungsfaktors ***k***? Falls ja, wo liegen sie und bei welchen Werten von ***k*** stellen sie sich ein?

c) Für welche Werte von ***k*** ist der geschlossene Regelkreis stabil?

10/98

6/6

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 5

a) Ein Auto mit der Masse m, dessen Eingangsgröße die Antriebskraft F_A sei, bewegt sich gegen die geschwindigkeitsproportionale Reibkraft F_R, Ausgangsgröße ist die Position x.

a1) Zeichnen Sie ein Strukturbild des Systems.

b) In einer Abfüllanlage werden Kunstdünger in Säcke abgefüllt. Zur Herstellung bestimmter Sorten werden aus Silos über Förderbänder bestimmte Substanzen in einen Mischbehälter transportiert und dort vermischt.

b1) Durch welchen Systemtyp wird ein Förderband beschrieben (Eingangsgröße: Zufluß aus Silo; Ausgangsgröße: Abfluß in Mischbehälter)? (Begründung !)

- PT1(=VZ1)-Glied - PT2(=VZ2)-Glied - Totzeitglied - Integrierglied

c)

c1) Was ist ein Nichtminimalphasenglied, bzw. wodurch ist es gekennzeichnet?

c2) Ist ein Nichtminimalphasenglied immer instabil (Begründung oder Beispiel, bzw. Gegenbeispiel)?

c3) Ist ein Minimalphasenglied immer stabil (Begründung oder Beispiel, bzw. Gegenbeispiel)?

c4) Ist ein Integrierer ein Nichtminimalphasenglied (Begründung)?

d) Ein Student bearbeitet zur Vorbereitung auf die Klausur Regelungstechnik I eine Aufgabe zum Frequenzkennlinienverfahren. Dabei benutzt er das Phasenlineal (inkl. Neigungsskala) zum Zeichnen der Frequenzkennlinien, d. h. er setzt die Betragskennlinie aus Geradenstücken zusammen. Anschließend überprüft er sein Ergebnis mit einem CAE-Tool, das ihm zur Verfügung steht. Zu seiner Verblüffung stellt er fest, daß sich z. B. bei der Durchtrittsfrequenz Abweichungen zwischen seinen und den Werten des CAE-Tools ergeben.

d1) Was ist der konstruktionsbedingte Grund für die Abweichungen?

d2) Welche Gründe könnten die Abweichungen noch verursacht haben (mindestens 2)?

RegTe-Klausur H 98

Aufgabe 1

a) Masse 1:

$$m_1 \ddot{s}_1 = F_A(t) - c_1 s_1 - k(\dot{s}_1 - \dot{s}_2)$$

$$\boxed{\ddot{s}_1 = -\frac{c_1}{m_1} s_1 - \frac{k}{m_1}\dot{s}_1 + \frac{k}{m_1}\dot{s}_2 + \frac{F_A}{m_1}}$$

Masse 2:

$$m_2 \ddot{s}_2 = k(\dot{s}_1 - \dot{s}_2) - c_2 s_2$$

$$\boxed{\ddot{s}_2 = -\frac{c_2}{m_2} s_2 + \frac{k}{m_2}\dot{s}_1 - \frac{k}{m_2}\dot{s}_2}$$

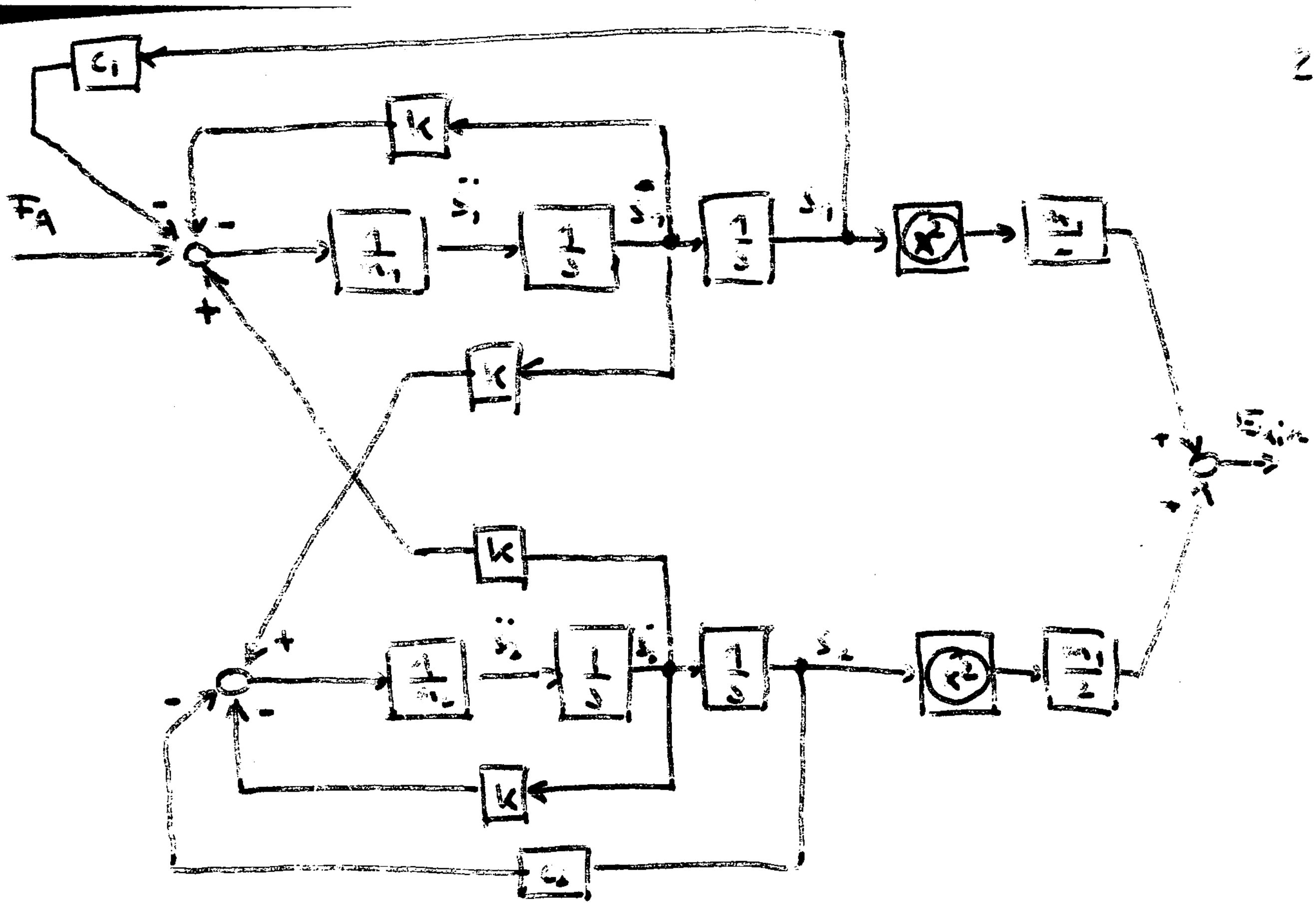
Ausgang:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 \dot{s}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{s}_2^2$$

Matrixdarstellung:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{s}_1 \\ \ddot{s}_1 \\ \dot{s}_2 \\ \ddot{s}_2 \end{pmatrix}}_{\underline{\dot{x}}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{c_1}{m_1} & -\frac{k}{m_1} & 0 & \frac{k}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{k}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} & -\frac{k}{m_2} \end{pmatrix}}_{\underline{A}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} s_1 \\ \dot{s}_1 \\ s_2 \\ \dot{s}_2 \end{pmatrix}}_{\underline{x}} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{\underline{B}} \cdot \underbrace{F_A}_{u}$$

$$\underbrace{E_{kin}}_{y} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2} m_1 \dot{s}_1 & 0 & \frac{1}{2} m_2 \dot{s}_2 \end{pmatrix}}_{\underline{C}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} s_1 \\ \dot{s}_1 \\ s_2 \\ \dot{s}_2 \end{pmatrix}}_{\underline{x}} + \underbrace{0}_{D} \cdot \underbrace{F_A}_{u}$$



c) Nein, da zwei nichtlineare Glieder (Quadrierer) vorkommen. Auch erkennbar an der Matrix $\underline{C}$, die von s_1 und s_2 abhängig – also nicht konstant – ist.

d) Zustandsgrößen im stat. Zustand:

– Setze Eingänge der Integrierer zu Null.

$\underline{\dot{s}_1 = 0 \quad \ddot{s}_1 = 0 \; ; \quad \dot{s}_2 = 0 \quad \ddot{s}_2 = 0}$

$\Rightarrow \quad 0 = F_A - c_1 s_1 \quad \Rightarrow \quad s_1 = \frac{F_A}{c_1} = \frac{F_0}{c_1}$

$0 = -c_2 s_2 \quad \Rightarrow \quad s_2 = 0$

$\Rightarrow \quad \underline{x}_0 = \begin{pmatrix} F_0/c_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ $\qquad y_0 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$

$= 0 + 0 = 0$

$$F_0(s) = \frac{s-1}{(s+1)(s-p)}$$

a) $$F_w(s) = \frac{s-1}{(s+1)(s-p)+s-1} = \frac{Z(s)}{N(s)}$$

$$N(s) = s^2 - ps + s - p + s - 1$$

$$= s^2 + s(2-p) + (-1-p)$$

N(s) muss Hurwitz-Polynom sein.

→ Polynom 2. Ordnung ⇒ notw. u. hinreich. Bed.: alle Koeff. > 0

s^2: $1 > 0$ ✓

s^1: $2 - p > 0 \Rightarrow p < 2$

s^0: $-1 - p > 0 \Rightarrow p < -1$

⇒ Der geschlossene RK ist stabil für alle $p \in \mathbb{R}$, $p < -1$.

b) $$\lim_{t\to\infty} h(t) = \lim_{s\to 0} s F_w(s) \cdot \frac{1}{s} = F_w(0)$$

$$= \frac{-1}{-1-p} = \frac{1}{1+p}$$

$$\text{Regelabweichung} = 1 - h_\infty = 1 - \frac{1}{1+p} = \frac{1+p-1}{1+p}$$

$$= \underline{\underline{\frac{p}{1+p}}}$$

c) Durchschnittsfrequenz: $|F_w(s)| = 1$ mit $s = j\omega$

$$\left| \frac{j\omega - 1}{-\omega^2 + j\omega(2-p) + (-1-p)} \right| = \frac{\omega^2 + 1}{(-1-p-\omega^2)^2 + \omega^2(2-p)^2}$$

$$\Rightarrow \quad \omega^2 + 1 = (1 + p + \omega^2)^2 + \omega^2 (2 - p)^2$$

$$\omega^2 + 1 = (1+p)^2 + 2(1+p)\omega^2 + \omega^4 + \omega^2 (4 - 4p + p^2)$$

$$\underline{\omega^2} + \cancel{1} = \cancel{1} + 2p + p^2 + \underline{2\omega^2} + \underline{2p\omega^2} + \omega^4 + \underline{4\omega^2} \; \underline{-4p\omega^2} + \underline{p^2\omega^2}$$

$$\omega^4 + \omega^2 (1 - 2 - 4 - 4p - 2p - p^2) - 2p - p^2 = 0$$

$$\omega^4 + \omega^2 (-p^2 - 6p - 5) - p - p^2 = 0$$

Subst: $z = \omega^2$

$$z_{1/2} = \frac{p^2 + 6p + 5 \pm \sqrt{(p^2 - 6p - 5)^2 + 4(p - p^2)}}{2}$$

---

c) Durchtrittsfrequenz: $|F_o(j\omega)| = 1$

$$\frac{|j\omega - 1|}{|j\omega + 1| \, |j\omega - p|} = \frac{\cancel{\omega^2 + 1}}{\cancel{(\omega^2 + 1)}(\omega^2 + p^2)} = 1$$

$$\Rightarrow \quad 1 = \omega^2 + p^2 \quad \Rightarrow \quad \omega^2 = 1 - p^2$$

$$\Rightarrow \quad \omega = \pm \sqrt{1 - p^2}$$

d) $p < -1$ für stab. RK

$$\Rightarrow \quad 1 - p^2 < 0 \quad \Rightarrow \quad \omega \text{ ex. nicht.}$$

e) $$F(j\omega) = \frac{s - 1}{s(s+1)} = \frac{j\omega - 1}{j\omega (j\omega + 1)}$$

$$= \frac{j\omega - 1}{-\omega^2 + j\omega} = \frac{(j\omega - 1)(-\omega^2 - j\omega)}{\omega^4 + \omega^2} = \frac{-j\omega^3 + \omega^2 + \omega^2 + j\omega}{\omega^4 + \omega^2}$$

$$= \frac{2\omega^2}{\omega^2(\omega^2 + 1)} + j \, \frac{\omega - \omega^3}{\omega^2(\omega^2 + 1)} = \frac{2}{\omega^2 + 1} + j \, \frac{1 - \omega^2}{\omega(\omega^2 + 1)}$$

$2 + j\infty$

$F_0(j\infty) = 0$

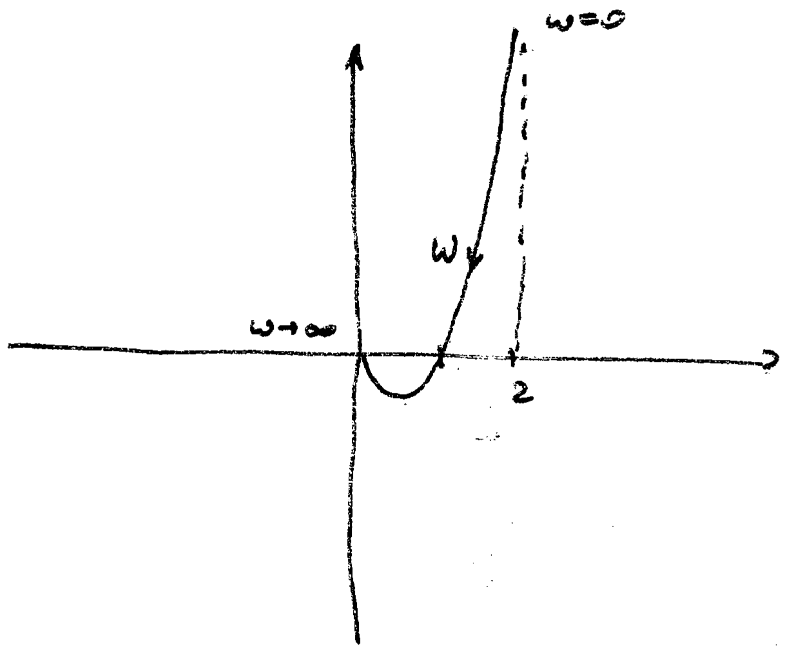
Realteil i--o > 0

Imaginärteil wechselt Vorzeichen bei $\omega = 1$

$\Rightarrow \quad Re(F(j1)) = \cancel{2} \ 1$

$\arg F_0(j\omega) = \operatorname{atan} \frac{1-\omega^2}{\omega \cdot 2}$

$\arg F_0(j\omega) = \operatorname{atan}(-\infty)$
$= -\frac{\pi}{2}$



Aufgabe 3

a) Wähle T_R so, dass größte Streckenzeitkonstante gekürzt wird.

$\Rightarrow T_R = 10$

$\Rightarrow F_K(s) = K \dfrac{2}{s(1+2s)(1+0{,}3s)(1+0{,}09s)}$

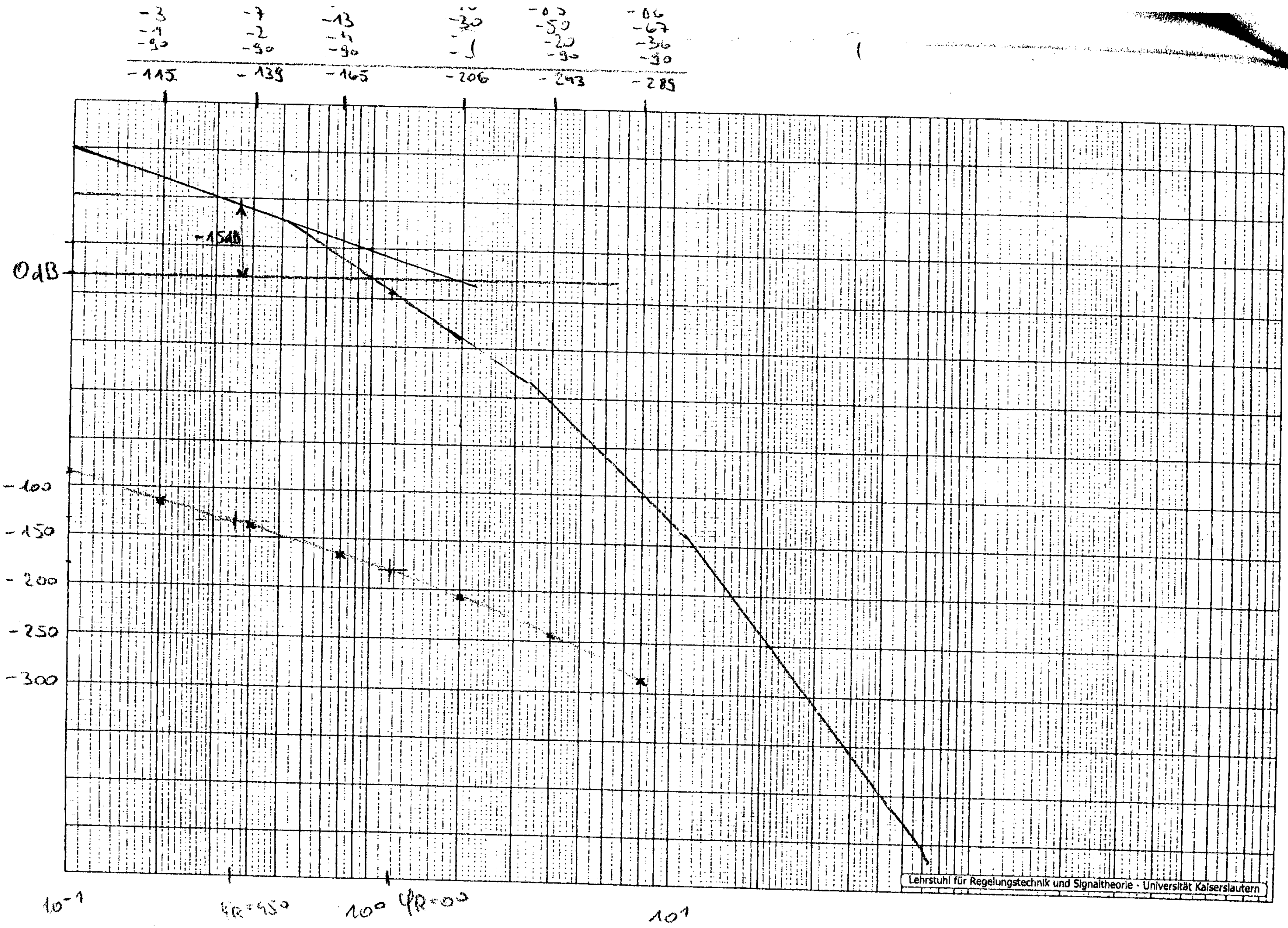
$\omega_1 = \frac{1}{2}$ „Knick"

$\omega_2 = 3{,}\overline{3}$ „Knick"

$\omega_3 = 11{,}\overline{1}$ „Knick"

$K_R = -15\,dB = \underline{\underline{0{,}177}}$

b) Ja, wegen I-Anteil: $F_w(s) = \dfrac{2K}{s(\ldots)(\ldots) + 2K}$


-115
-139
-165
-206
-243
-289
0dB
-15dB
-100
-150
-200
-250
-300
10^{-1}
10^{0}
10^{1}
$\varphi_R = 0°$
Lehrstuhl für Regelungstechnik und Signaltheorie - Universität Kaiserslautern

$\lim_{t\to\infty} h(t) = \lim_{s\to 0} s \, F_w(s) \frac{1}{s} = F_w(0) = \frac{2k}{2k} = 1$

$\Rightarrow$ stationär genau

c) $K_{krit} = 3\,dB$

stabil für $k < k_{krit} = 1{,}41$

d) $k \dfrac{1+T_R s}{1+T_N s}$ Realer PD-Regler

Aufgabe 4

$$F_0(s) = k\frac{s+1}{s^2(s+10)}$$

a) - Nullstellen: n_1: $s = -1$

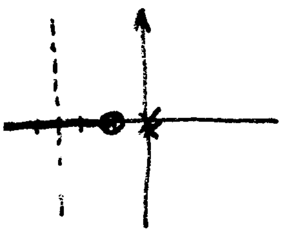
Pole: $p_{1/2}$: $s = 0$ (doppelt)

p_3: $s = -10$

- Bereich zwischen -10 u. -1 d. reelle Achse i.T. d. WOK
- $n-m = 3-1 = 2$ Äste der WOK laufen ins Unendliche
- Anstiegswinkel der Asymptoten

$$\varphi_1 = (2i+1)\frac{\pi}{n-m} = \frac{\pi}{2}$$

$$\varphi_2 = \frac{3\pi}{2}$$



- Wurzelschwerpunkt $s_w = \dfrac{\sum \mathrm{Re}\, p - \sum \mathrm{Re}\, n}{n-m}$

$$s_w = \frac{-10-0-0-(-1)}{2} = \frac{-9}{2} = -4{,}5$$

- Verzweigungspunkte: $\sum \dfrac{\varepsilon_\lambda}{s-s_\lambda} = 0$

$$\frac{1}{s+1} + \frac{-1}{s-0} + \frac{-1}{s-0} + \frac{-1}{s+10} = 0$$

$$\frac{1}{s+1} - \frac{2}{s} - \frac{1}{s+10} = 0$$

$s+10) - 2(s+1)(s+10) - s(s+1) = 0$

$2 + 10s - 2(s^2+11s+10) - (s^2+s) = 0$

$-2s^2 - 13s - 20 = 0$

$$s_{1/2} = \frac{13 \pm \sqrt{169 - 160}}{-4} = \frac{13}{-4} \pm \frac{3}{-4}$$

$$s_1 = \frac{16}{-4} = -4 \qquad s_2 = \frac{10}{-4} = -2,5$$

=) 2 Verzweigungspunkte bei $s_1 = -6,5$ und $s_2 = -2,5$

- Schnittwinkel in den Verzweigungspunkten:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{\pi}{3}$$

- Schnittpunkte mit d. j-Achse:

$$k(s+1) + s^2(s+10) = 0$$

$$k(j\omega+1) - \omega^2(j\omega+10) = 0$$

Realteil: $k - 10\omega^2 = 0$

Imaginärteil: $k\omega - \omega^3 = 0 \Rightarrow \omega(k-\omega^2) = 0$

$\omega = 0 \vee \omega^2 = k$

$$k - 10k = 0$$

$$k(1-10) = 0 \Rightarrow k = 0$$

=) Schnittpunkt mit d. j-Achse bei $\omega = 0$ und $k = 0$

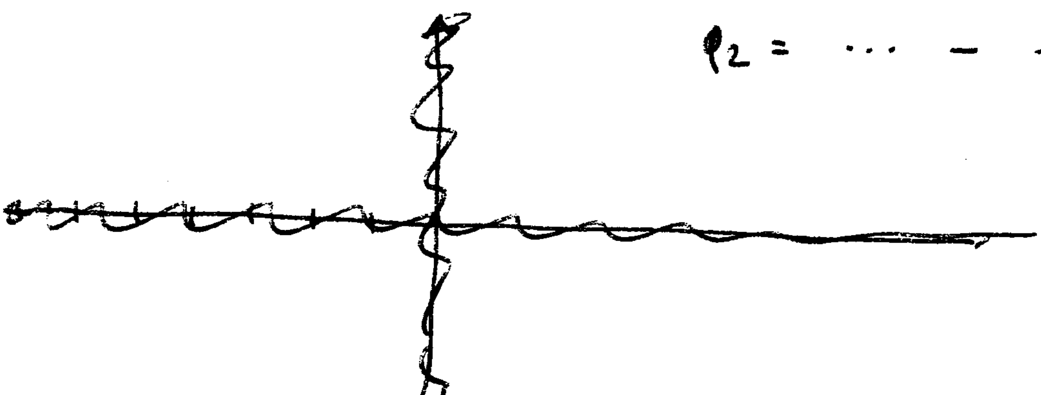
- Anstiegswinkel in den krit. Stellen

$\rho_3 : 0$

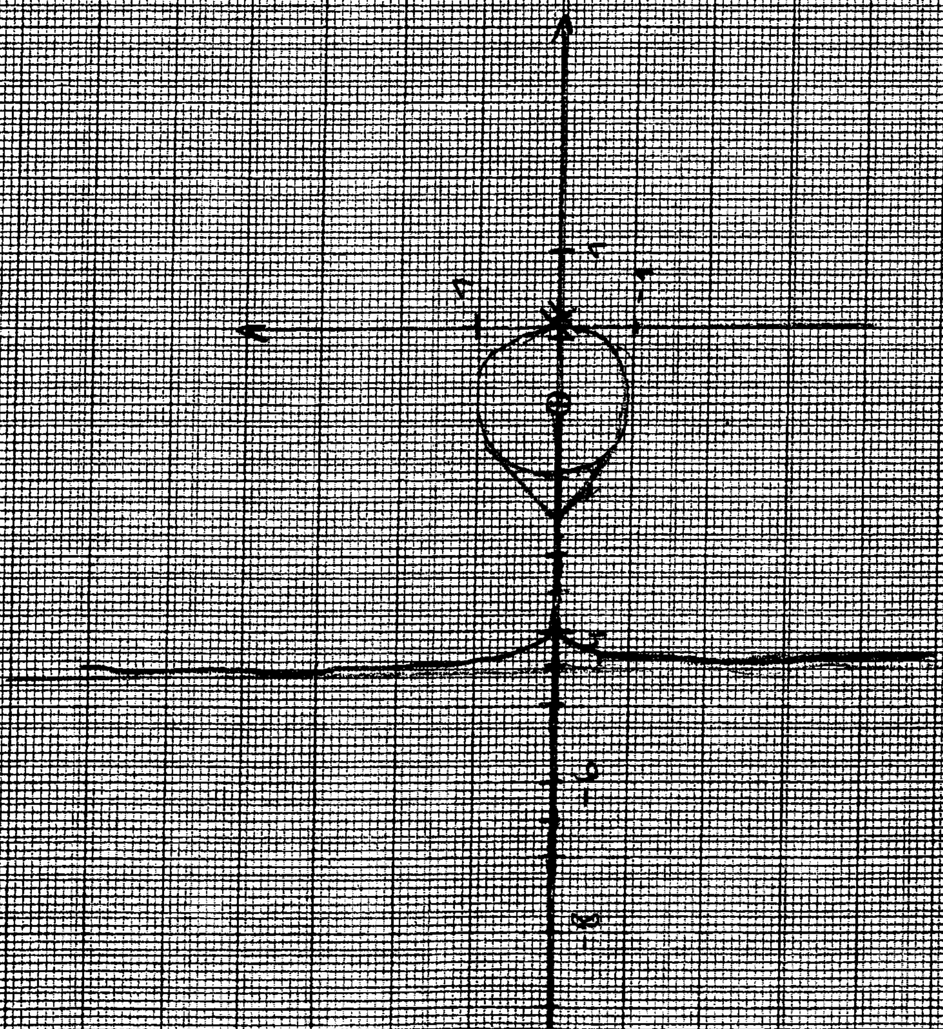
$n : \pi$

$$\rho_{sp} = \frac{-1}{-1\cdot 2}\left((-1)\pi + (1)\pi\right) + \frac{\pi}{-1\cdot 2} = -\frac{\pi}{2}$$

$$\rho_2 = \ldots - \frac{3\pi}{2}$$



7a



Ja: $k=0$ Mehrfachpol bei 0

Mehrfachpol bei $-2{,}5$

für $$k = \frac{|-2{,}5-0|\,|-2{,}5-0|\,|-2{,}5+10|}{|-2{,}5+1|}$$

$$= \frac{2{,}5 \cdot 2{,}5 \cdot 7{,}5}{1{,}5} = \underline{\underline{31{,}25}}$$

Mehrfachpol bei -4

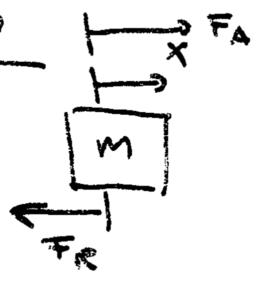
$$k = \frac{|-4|\,|-4|\,|-4+10|}{|-4+1|}$$

$$= \frac{4 \cdot 4 \cdot 6}{3} = \underline{\underline{32}}$$

c) geschlossener RK ist stabil für alle $k>0$.

Aufgabe 5

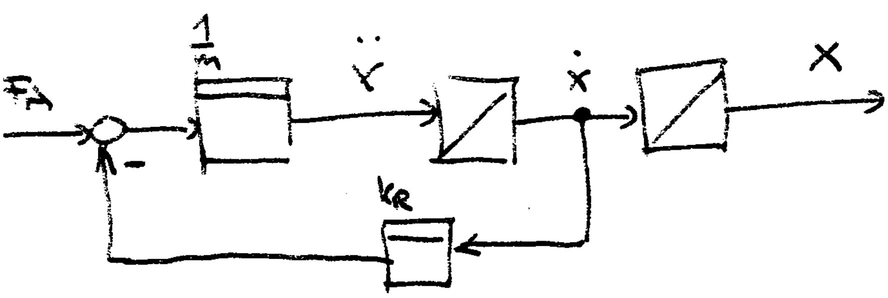
a)



$$m\ddot{x} = F_A - k_R \cdot \dot{x}$$

$$m\ddot{x} + k_R\dot{x} = F_A$$

$$\ddot{x} = \frac{F_A}{m} - \frac{k_R}{m}\dot{x}$$



otzeitglied: Abfluß = (Zufluß zeitverschoben)

1) Hat Pole oder Nullstellen rechts der j-Achse.
=> negative Zeitkonstanten

2) Nein: Gegenbeispiel

$$G(s) = \frac{s-1}{s+1}$$ stabil, da einziger Pol links der j-Achse liegt.

3) Nein: Gegenbeispiel Integrierer

$$G_I(s) = \frac{1}{s}$$ instabil, da Pol auf j-Achse

$G(0) \to \infty$

4) Nein, ein Integrierer ist ein Minimalphasenglied, da er weder Pole noch Nullstellen rechts der j-Achse besitzt.

d) 1) Verfahren mit Phasenlineal ist eine Näherung (gezeichnet nach den Asymptoten), das CAE-Tool rechnet den genauen Verlauf aus => Abweichungen bei der Durchtrittsfrequenz

2) - Numerische Rechengenauigkeit d. CAE-Tools
- Bedienungsfehler des Studenten

7/6

Name: Matrikelnr.:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik/Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. M. Pandit

23.03.1998

Diplomhauptprüfung
im Fach
Regelungstechnik I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder nichtprogrammierbarer Taschenrechner, Schreib- und Zeichenzeug. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke oder lose Blätter oder **programmierbare Taschenrechner** gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, logarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1) Schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer.

2) Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluß an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).

3) Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern werden nicht bei der Korrektur berücksichtigt!

4) Schreiben Sie nicht mit Bleistift.

5) Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel in den Doppelbogen gehüllt ab.

6) Die Klausur muß wieder in **gehefteter** Form abgegeben werden!

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 1

Gegeben ist ein offener Regelkreis $F_o(s)$:

$$F_o(s) = \frac{s - 1}{(s + 1)(s - p)}$$

a) Für welche Pollagen p ist der **geschlossene** Regelkreis bei negativer Einheitsrückführung (Standardregelkreis) stabil?

b) Wie groß ist die stationäre Regelabweichung in Abhängigkeit von p bei konstantem Sollwert (Sollwert $w(t) = 1$)?

c) Wie groß ist die Durchtrittsfrequenz ω_D in Abhängigkeit von p?

d) Existiert die Durchtrittsfrequenz ω_D für stabile Regelkreise?

e) Skizzieren Sie die Ortskurve von $F_o(j\omega)$ für $p = 0$.

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 2

Gegeben ist folgendes gekoppeltes Feder-Masse-System mit den Massen m_1 und m_2 und den Federkonstanten c_1, c_2 und c_3. Die Kraft $F_a(t)$ soll als Eingangsgröße und die Position $s_1(t)$ der linken Masse als Ausgangsgröße betrachtet werden (die Erdanziehung ist zu vernachlässigen).

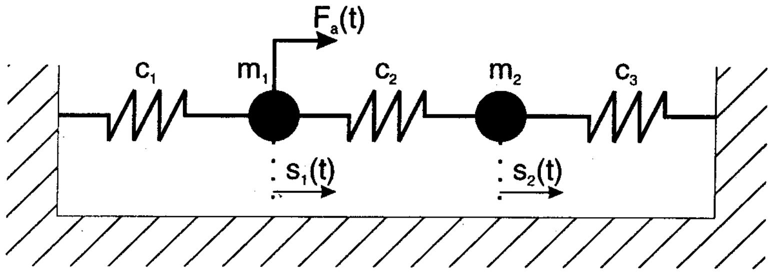


Abb. 2.1: Feder-Masse-System

a) Stellen Sie die Zustandsgleichungen des Systems auf und geben Sie diese in Matrixschreibweise an (Hinweis: Stellen Sie hierzu die Kräftebilanzen für die beiden Massen auf und beachten Sie, daß die Stauchung der mittleren Feder durch die Differenz von $s_2(t)$ und $s_1(t)$ beschrieben werden kann).

b) Zeichnen Sie ein Strukturbild des Systems.

c) Im allgemeinen wird die Zahl der Zustandsgrößen gleich der Anzahl der Speicherelemente angesetzt. Warum genügen in diesem Beispiel weniger Zustandsgrößen zur Beschreibung des Systems?

d) Berechnen Sie den Wert der Zustandsgrößen für $t \rightarrow \infty$, wenn $F_a(t) = F_1 =$ const. ($F_1 \neq 0$).

e) Besitzt das gegebene System Durchgriff? (Kurze Begründung.)

4/6

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 3

Gegeben ist folgender Regelkreis:

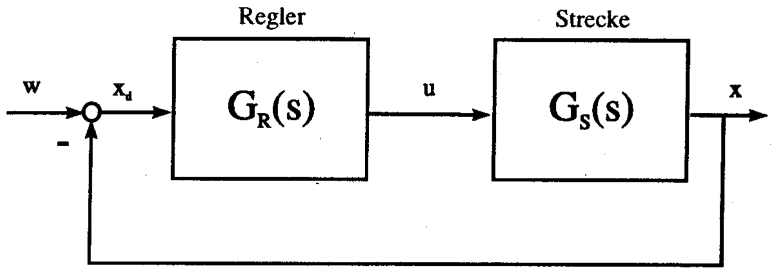


Abb. 3.1: Regelkreis

Die Strecke besitzt die Übertragungsfunktion $\boldsymbol{G_S(s)}$:

$$G_S(s) = \frac{0,9(s+20)}{s(s+3)(s+6)}$$

Als Regler wird ein P-Regler eingesetzt:

$$G_R(s) = K$$

a) Zeichnen Sie die Frequenzkennlinien des offenen Regelkreises (Logarithmisches Papier verwenden).

Hinweis: Phase betrachten bei $\omega[s^{-1}]$ = 1 2 4 7 10 20
Maßstab: 1 cm entspricht 10 dB
1 cm entspricht 50°

b) Bestimmen Sie den Stabilitätsbereich des geschlossenen Regelkreises für $\boldsymbol{K} > 0$ anhand der Frequenzkennlinien.

Der Strecke wird nun eine Totzeit nachgeschaltet, so daß sich die Streckenübertragungsfunktion $\boldsymbol{G_{S2}(s)}$ ergibt:

$$G_{S2}(s) = \frac{0,9(s+20)}{s(s+3)(s+6)} \cdot e^{-0,2s}$$

c) Zeichnen Sie die Frequenzkennlinien des neuen offenen Regelkreises (Logarithmisches Papier verwenden, beachten Sie den Hinweis aus a)).

d) Bestimmen Sie den Stabilitätsbereich des neuen geschlossenen Regelkreises für $\boldsymbol{K} > 0$ anhand der Frequenzkennlinien.

5/6

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 4

Gegeben ist der Regelkreis in Abb. 4.1

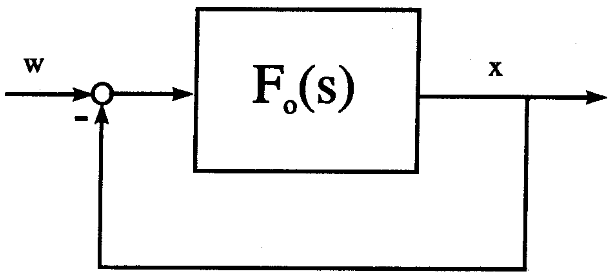


Abb. 4.1: Regelkreis

mit folgender Übertragungsfunktion:

$$F_o(s) = k \frac{s + 1}{s^2(s + 9)}$$

a) Konstruieren Sie die Wurzelortskurve zu obigem Regelkreis (Millimeterpapier verwenden).

Berechnen Sie hierzu auch:

- Anstiegswinkel der Asymptoten
- Verzweigungspunkte
- Schnittpunkte mit der imaginären Achse

b) Existiert ein Mehrfachpol bei geeigneter Wahl des Verstärkungsfaktors ***k****?* Falls ja, wo liegt er und bei welchem Wert von ***k*** stellt er sich ein?

c) Für welche Werte von ***k*** ist der geschlossene Regelkreis stabil?

03/98 6/6

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 5

a)

a1) Welche Probleme können auftreten, wenn ein Regler, der mit Hilfe eines CAE-Tools entworfen wurde, an der realen Anlage eingesetzt wird (nennen Sie mindestens 3 Aspekte)?

a2) Nennen Sie mindestens je einen Grund, der für oder gegen den Einsatz von CAE-Tools in der Regelungstechnik spricht.

b) Kann es sinnvoll sein, einen im Sinne der Sprungantwortstabilität instabilen Regelalgorithmus zur Regelung einzusetzen (Begründung und Beispiel, bzw. Gegenbeispiel)?

c) Gegeben ist folgende Übertragungsfunktion:

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

c1) Wie nennt man ein solches Übertragungsglied?

c2) Welche Besonderheiten weist ein solches Übertragungsglied auf (z. B. bei Anregung durch eine bestimmte Testfunktion)?

d) Geben Sie die Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

des in folgender Abbildung gegebenen Systems an.

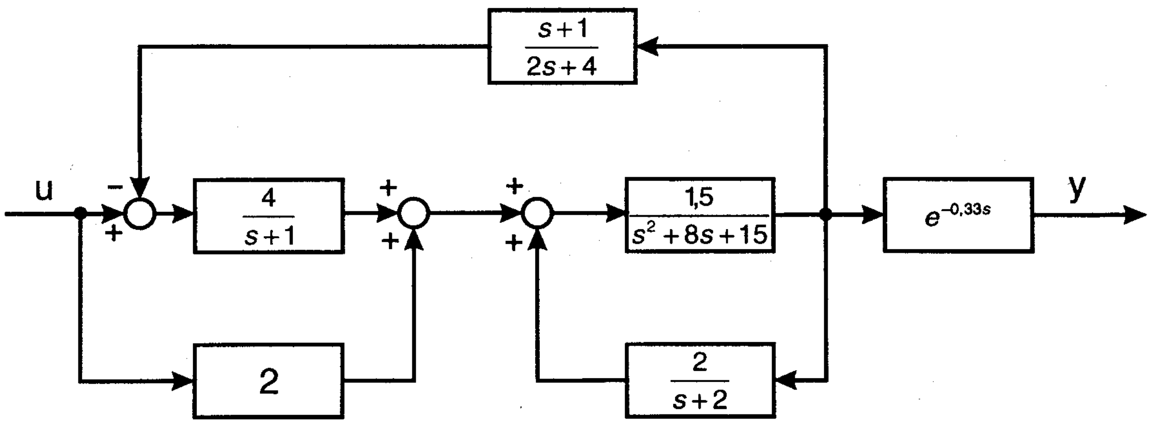


Abb. 5.1: Dynamisches System

$\boxed{1}$ $\boxed{+98}$

① $F_0(s) = \dfrac{(s-1)}{(s+1)\cdot(s-p)}$ $p=1$

$$F_W(s) = \frac{(s-1)}{(s+1)(s-p) + (s-1)} = \frac{(s-1)}{s^2 - ps + 1s - p + s - 1}$$

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

stabil für Hurwitzp.

$2-p > 0$ und $-p-1 > 0$

$2 > p$ $-1 > p$

$p=1$ und für $p < -1$ ist geschlossen RK. stabil

② $x_d(\infty) = 1 - h(\infty) = \dfrac{1}{1 + F_0(s \to 0)}$

$$\lim_{s \to 0} F_0(s) = \frac{-1}{+1 \cdot -p} = \frac{-1}{-p} = \frac{1}{p}$$

$$x_d(\infty) = \frac{1}{1 + \frac{1}{p}} = \frac{p}{p+1}$$

③ $\dfrac{\cancel{\quad}\ |s-1|}{|s+1||s-p|} = 1$ $\dfrac{1}{|s-p|} = 1$

$\dfrac{1}{\sqrt{\omega^2 + p^2}} = 1$ $\omega_D^2 + p^2 = 1$

$\omega_D^2 = 1 - p^2$

$\omega_D = +\sqrt{1-p^2}$

④ $\omega_D = \pm\sqrt{1 - p^2}$ für $p=1$ und $p<-1$ sind stabil RK.

für $p<-1$ ist ω_D = komplex $\Rightarrow$ es existiert kein ω_D für stabile RK außer $p=1$ $\omega_D = 0$!

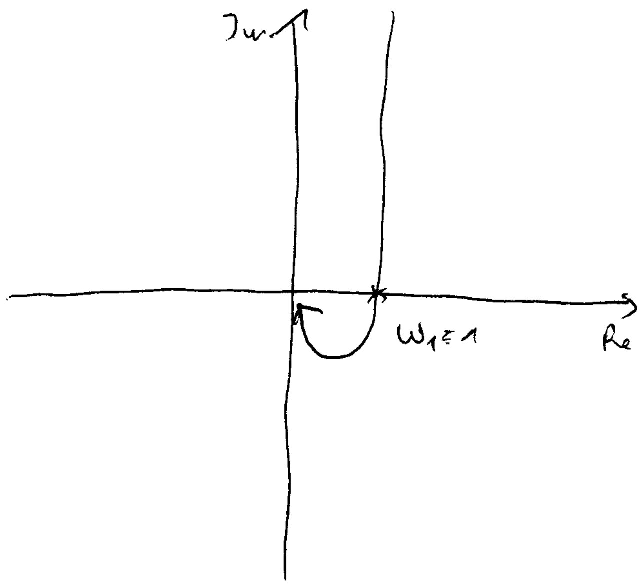
⑤ $F_O(s) = \dfrac{(s-1)}{(s+1)\, s}$ (nicht minimalphasiges Glied)

$= \dfrac{(s-1)}{(s+1)\, s}$

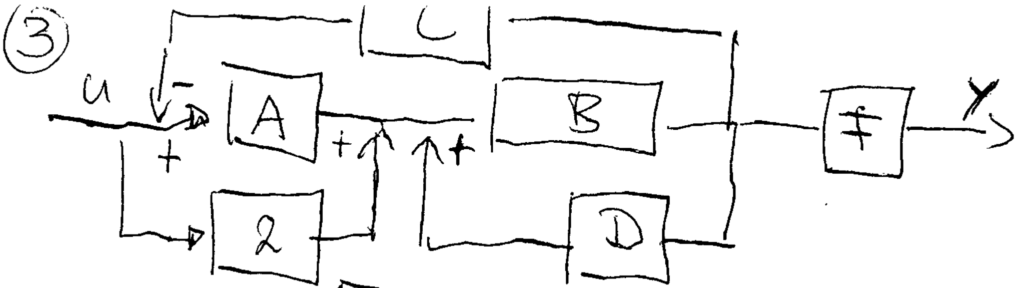
$$F_O(j\omega)\Big|_{\omega\to 0} = \frac{(j0-1)}{(j\omega+1)\cdot j\omega} = -j\frac{-1}{(+1)\,\omega} = \infty$$

$\Rightarrow$ kommt aus $+\infty$

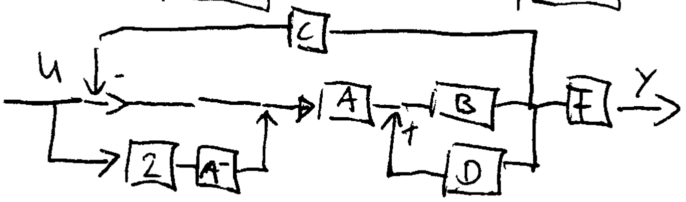
$$F_O(j\omega)\Big|_{\omega\to\infty} = \frac{(j\omega-1)}{(j\omega+1)\,j\omega} = \frac{\left(1-\frac{1}{j\omega}\right)j\omega}{(j\omega+1)\,j\omega} = \frac{1+j0}{(j\omega+1)} = 0$$



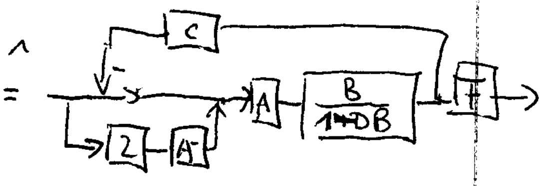
(3)



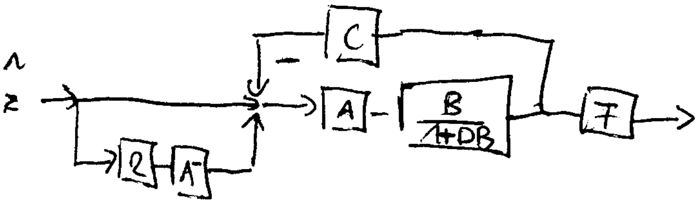
$=$



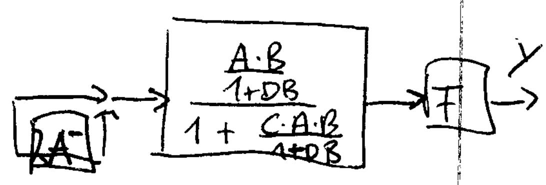
$=$



$=$

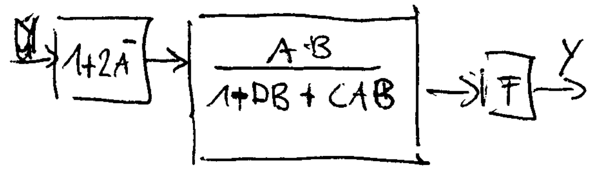


$=$



$(u + u\,2A^{-})\cdot$

$=$



$$G(s) = \frac{Y}{U} = \frac{(1+2A^{-1})\,F\cdot A\cdot B}{1+DB+ABC}$$

$$= \frac{Y}{U} = \frac{FAB + 2FB}{1+DB+ABC} = FB\,\frac{\cancel{AB+2B}\,(A+2)}{1+DB+ABC} = F\,\frac{\cancel{B}\,(A+2)}{\cancel{B}\,(B^{-1}+D+AC)}$$

$$= \frac{F\,(A+2)}{B^{-1}+D+AC} = e^{-0{,}33s}\,\frac{\frac{4}{s+1} + \frac{2(s+1)}{s+1}}{\frac{s^2+8s+15}{15} + \frac{2}{s+2} + \frac{4\cdot\cancel{(s+1)}}{\cancel{(s+1)}(2s+4)}} = \frac{e^{-0{,}33s}}{s+1}\,\frac{4+2s+2}{\frac{(s+3)(s+5)}{15} + \frac{2}{s+2} + \frac{4}{2s+4}}$$

$$= e^{-0{,}33s}\,\frac{2s+6}{(s+1)\left[\frac{(s+3)(s+5)}{15} + \frac{2}{s+2} + \frac{4}{2s+4}\right]} = e^{-0{,}33s}\,\frac{2s+6}{(s+1)\left[\frac{(s+3)(s+5)}{15} + \frac{2}{s+2} + \frac{2\cdot\cancel{2}}{\cancel{2}(s+2)}\right]}$$

$$= e^{-0{,}33s}\,\frac{2(s+3)}{(s+1)\left[\frac{(s+3)(s+5)}{15} + \cancel{\frac{4}{s+2}}\right]} =$$

$$= e^{-0{,}33s}\,\frac{30}{(s+1)(s+5)}$$

798

3

$$T_0(s) = \frac{k \cdot 0{,}9\,(s+20)}{s\,(s+3)\,(s+6)} = \frac{k \cdot 0{,}9 \cdot 20\,(\frac{1}{20}s+1)}{3s\,(\frac{1}{3}s+1)\,(\frac{1}{6}s+1)\cdot 6}$$

$$= k\,\frac{(\frac{1}{20}s+1)}{s\,(\frac{1}{3}s+1)\,(\frac{1}{6}s+1)}$$

$\omega_1 = 3$

$\omega_2 = 6$

$\omega_3 = 20$

zu ① ② ~~ste~~ siehe Beiblatt

5

1a) - Plausibilitätskontrolle (numerische Näherungsverfahren!)

- Anti-Reset-Windup (Realität gibt es Begrenzungen von Integrierer, usw)
- Modellbildungen sind ungenau oder fehlerhaft

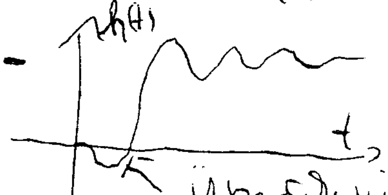
b) ~~für:~~ Kurze Entwicklungszeiten, geringer Entwicklungskosten, Simulationsmöglichkeit

gegen:

- Lizensierungskosten für Software
- Abweichung Simulation, Modell Realität

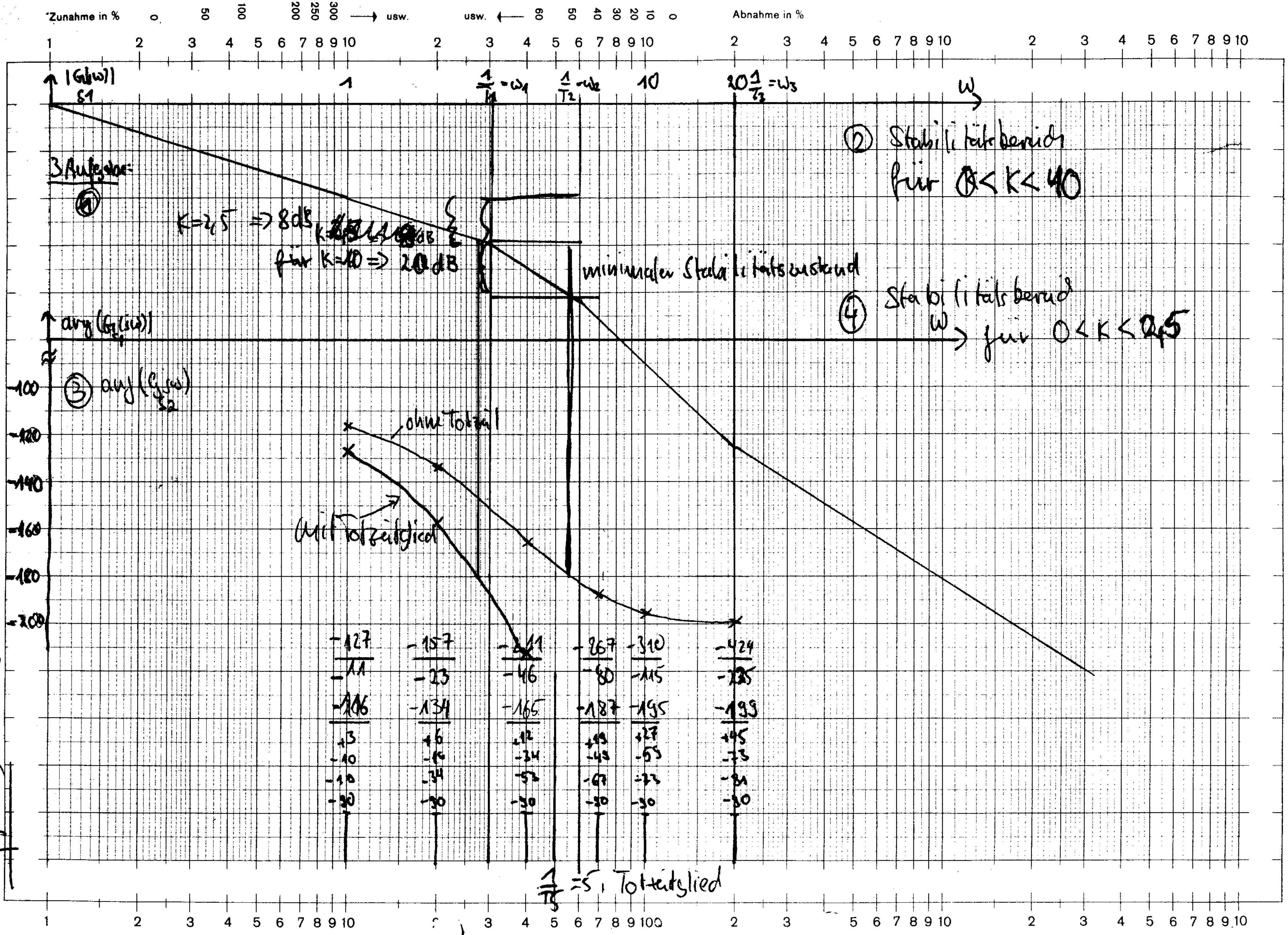
② - nicht minimalphasiges Ü-Glied

-



Überschwingung gibt es bei minimalphasigen System nicht!

Aufgabe 3: T98



Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 10000, Einheit 62,5 mm, die andere in mm mit Prozentmaßstab

$\boxed{4}$ $F_0(s) = \frac{s+1}{s^2(s+9)} \cdot K$ $\quad m=1$, $n=3$

① $n_1 = -1 \quad p_{1/2} = 0 \quad p_3 = -9$

Schnittpkt d. Asymptoten $\quad \frac{\sum Re(p) - \sum Re(n)}{n-m} = -4$

Anstiegswinkel d. Asymptoten: $\quad \varphi_\nu = (2\nu+1)\frac{\pi}{n-m} \quad \nu = \{0,1\}$

$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} \qquad \varphi_1 = \frac{\pi}{2} + \pi$

Verzweigungspkt:

$$\sum_{1}^{n+m} \varepsilon_\lambda \frac{\delta + \delta_\lambda}{(\delta+\delta_\lambda)^2 + \omega^2} = 0$$

$\varepsilon_\nu = -1$ Nullstellen

$\varepsilon_\nu = 1$ Polstellen

$$\frac{-\delta-9}{(\delta-9)^2+\omega^2} - \frac{2\delta}{\delta^2+0} + \frac{(\delta-1)}{(\delta-1)^2+0^2} = 0$$

$$-\frac{1}{\delta-9} - \frac{2\cancel{\delta}}{\delta} + \frac{1}{\delta-1} = 0$$

$$\frac{-\delta(\delta-1) - 2(\delta-9)(\delta-1) + (\delta-9)\delta}{NP} = 0$$

$$\cancel{-\delta^2} + \cancel{\delta} - 2\delta^2 + 20\delta - 18 \cancel{+\delta^2} - 9\delta = 0$$

$$-2\delta^2 + 12\delta - 18 = 0$$

$$\delta^2 - 6\delta + 9 = 0 \qquad \delta_{1/2} = +3 \mp \sqrt{9-9}$$

$$s_{1/2} = 3$$

Schnitt mit Imaginärachse

$$K\,Z(\delta + j\omega) + N(\delta + j\omega) = 0 \qquad \delta = 0$$

$$K(j\omega+1) + (j\omega+9)(-\omega^2) = 0$$

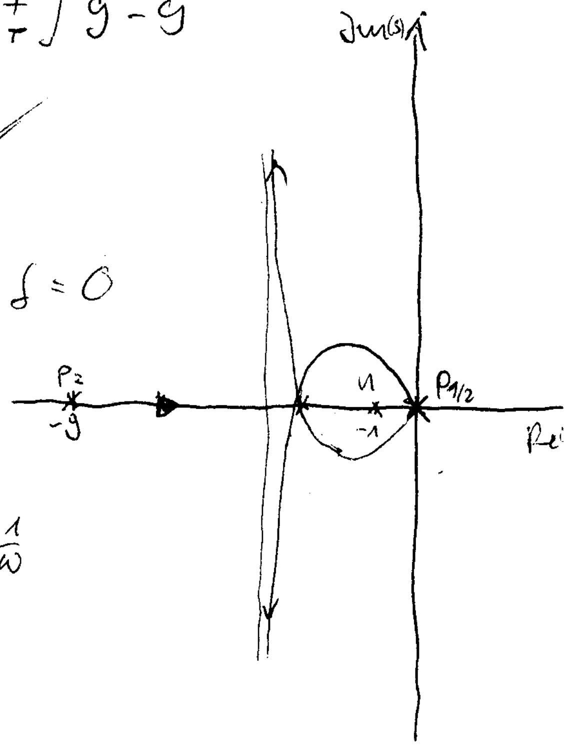
$$Kj\omega + K - 9\omega^2 - j\omega^3 = 0$$

$$K - 9\omega^2 = 0 \qquad K\omega - \omega^3 = 0 \quad \Big| \frac{1}{\omega}$$

$$K - 9K = 0 \qquad K - \omega^2 = 0$$

$$-8K = 0 \qquad \omega = \sqrt{K}$$

$$K = 0$$



② Ja, im Nullpkt für $K=0$

und im Pkt ~~δ~~ -3. für $K=26$!

mit $\delta=-3$

$j\omega=0$

$$K\cdot Z(\delta+j\omega) + N(\delta+j\omega) = 0$$

$$K\cdot(-3+1) + (-3)^2(6) = 0$$

$$K(-2) + 9\cdot 6$$

$$54 = 2K \qquad K = 26$$

③ Stabil für $K \leq 0$!

Aufgabenblätter gibt es kostenlos in der FS! #97 1/6

Name: Matrikelnr.:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik/Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. M. Pandit

06.10.1997

Diplomhauptprüfung im Fach Regelungstechnik I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder nichtprogrammierbarer Taschenrechner, Schreib- und Zeichenzeug. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke oder lose Blätter oder **programmierbare Taschenrechner** gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, logarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1) Schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer.
2) Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluß an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).
3) Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern werden nicht bei der Korrektur berücksichtigt!
4) Schreiben Sie nicht mit Bleistift.
5) Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel in den Doppelbogen gehüllt ab.
6) Die Klausur muß wieder in **gehefteter** Form abgegeben werden!

H97 216

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 1

Gegeben ist folgendes gekoppeltes Feder-Masse-System mit den Massen m_1 und m_2 und den Federkonstanten c_1, c_2 und c_3. Die Kraft $F_a(t)$ soll als Eingangsgröße und die Position $s_1(t)$ der linken Masse als Ausgangsgröße betrachtet werden (die Erdanziehung ist zu vernachlässigen).

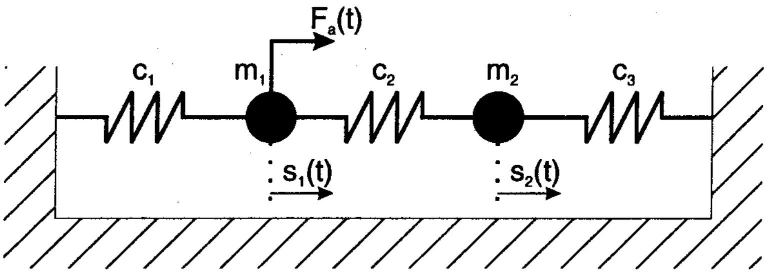


Abb. 1.1: Feder-Masse-System

a) Stellen Sie die Zustandsgleichungen des Systems auf und geben Sie diese in Matrixschreibweise an.

b) Zeichnen Sie ein Strukturbild des Systems.

c) Im allgemeinen wird die Zahl der Zustandsgrößen gleich der Anzahl der Speicherelemente angesetzt. Warum genügen in diesem Beispiel weniger Zustandsgrößen zur Beschreibung des Systems?

d) Berechnen Sie den Wert der Zustandsgrößen für $t \rightarrow \infty$, wenn $F_a(t) = F_1 = \text{const.}$ ($F_1 \neq 0$).

e) Besitzt das gegebene System Durchgriff? (Kurze Begründung.)

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 2

Gegeben ist die Ortskurve eines offenen Regelkreises:

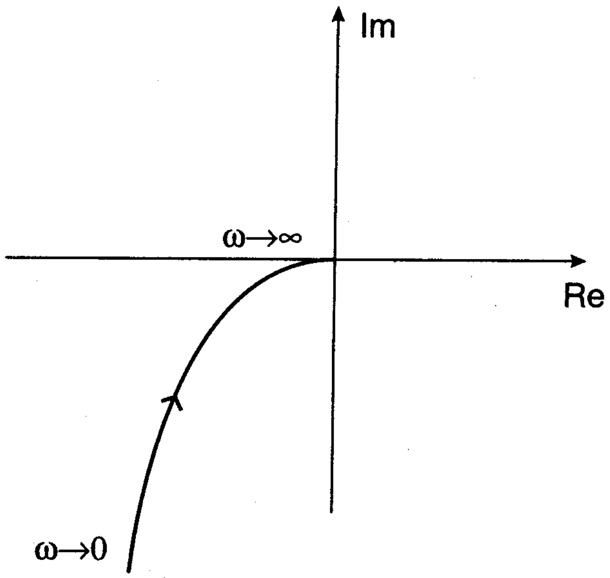


Abb. 2.1: Ortskurve

a) Ist der geschlossene Regelkreis bei negativer Einheitsrückführung (Standardregelkreis) stabil? (Kurze Begründung an Hand der Ortskurve! Die Voraussetzungen für die bekannten Stabilitätskriterien seien erfüllt!)

b) Arbeitet der geschlossene Regelkreis stationär genau? (Kurze Begründung an Hand der Ortskurve!)

c) Wie lautet die Übertragungsfunktion des Gliedes, dessen Ortskurve oben dargestellt ist?

In den offenen Regelkreis wird nun zusätzlich ein Totzeitglied eingebaut.

d) Skizzieren Sie den prinzipiellen Verlauf der Ortskurve des offenen Regelkreises mit Totzeit.

e) Bestimmen Sie allgemein für dieses Übertragungsglied, welche Totzeit maximal zulässig ist, damit der geschlossene Regelkreis stabil ist.

f) Berechnen Sie nun den maximalen Wert dieser Totzeit, wenn der geschlossene Kreis stabil sein soll und die oben abgebildete Ortskurve (ohne Totzeit) den Einheitskreis mit der Phase $\phi = -120^\circ$ bei $\omega = 1$ schneidet.

A37 4/6

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 3

Gegeben sei folgender Regelkreis:

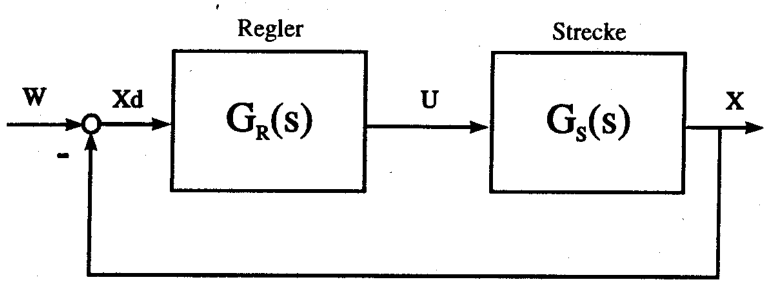


Abb. 3.1: Regelkreis

Die Strecke besitzt die Übertragungsfunktion $G_S(s)$:

$$G_S(s) = \frac{30}{(3+s)(0{,}2+s)(25+s)}$$

Entwerfen Sie mittels des Frequenzkennlinienverfahrens (Logarithmisches Papier verwenden) einen PI-Regler so, daß der entstehende offene Regelkreis eine Durchtrittsfrequenz von $\omega_0 = 2\ s^{-1}$ und eine Phasenreserve von $\phi = 45°$ besitzt.

Hinweis: Phase betrachten bei $\omega[s^{-1}]$ = 0,5 1 2 4 7 10
Maßstab: 1 cm entspricht 10 dB
1 cm entspricht 50°

a) Geben Sie die Kennwerte des Reglers an und zeichnen Sie die Frequenzkennlinien des resultierenden offenen Regelkreises.

b) Wie groß sind die Konstanten K_P und K_I?

H97 5/6

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 4

Gegeben ist der Regelkreis in Abb. 4.1

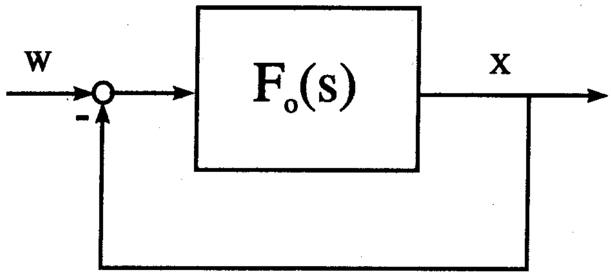


Abb. 4.1: Regelkreis

mit folgender Übertragungsfunktion:

$$F_o(s) = k \frac{s^2 + 2s + 1}{(s - 4)(s^2 + 4)}$$

a) Konstruieren Sie die Wurzelortskurve zu obigem Regelkreis (Millimeterpapier verwenden).

Lösungshinweis: Der reelle Verzweigungspunkt ist ganzzahlig!

b) Für welchen Wert von k hat die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises einen Doppelpol?

c) Für welche Werte von k ist der geschlossene Regelkreis stabil?

d) Wo liegen die Pole des geschlossenen Regelkreises, wenn dieser an der Stabilitätsgrenze betrieben wird?

e) Für den geschlossenen Regelkreis wird ein Pol bei s = -0,6 verlangt. Für welchen Wert von k ist dies zu erreichen und wo liegen die restlichen Pole des geschlossenen Regelkreises?

Hy F 6/6

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 5

a) Eine zylindrische Tasse wird aus einer Kanne befüllt.

a1) Durch welchen Systemtyp wird die Tasse näherungsweise beschrieben (Eingangsgröße Zufluß, Ausgangsgröße Füllhöhe) VZ_1 (= PT_1), VZ_2 (= PT_2), I oder PD?
Bitte begründen Sie kurz Ihre Aussage.

a2) Welcher wesentliche Unterschied besteht zwischen dem mathematischen Modell nach a1) und der realen Tasse?

b) Was ist ein Beobachter? Wozu wird er benutzt bzw. eingesetzt und wie ist seine prinzipielle Funktionsweise (kurze Erläuterung)?

c) Gegeben ist folgendes dynamische System mit der Eingangsgröße $\boldsymbol{u}$ und der Ausgangsgröße $\boldsymbol{y}$:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= 3x_1 \cdot x_2 \\
\dot{x}_2 &= 4x_1 + u^2 \\
\dot{x}_3 &= x_2 \cdot x_3 + k(t) \cdot x_1 \\
\\
y &= 2x_1 + 3x_3
\end{aligned}$$

c1) Wie nennt man die in obigen Gleichungen gegebene Beschreibungsform eines dynamischen Systems?

c2) Charakterisieren Sie das gegebene dynamische System (kurz und prägnant).

c3) Läßt sich zu obigem System eine Übertragungsfunktion angeben (Begründung)?

d) Gegeben sind folgende Regelkreise mit identischem $\boldsymbol{G(s)}$:

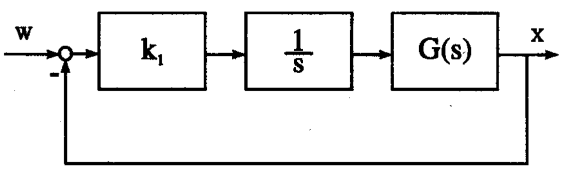


Abb. 5.1: Regelkreis 1

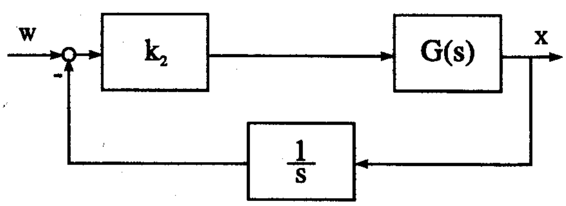


Abb. 5.2: Regelkreis 2

d1) In Regelkreis 1 wird die Stabilitätsgrenze für $\boldsymbol{k_1} = 3$ erreicht. Wo ist die Stabilitätsgrenze für Regelkreis 2? (Begründung!)

d2) Wie groß ist $\boldsymbol{x}$ im stationären Zustand in beiden Fällen unter der Annahme, daß ein solcher Zustand existiert? (Begründung!)

Name:

Matrikelnr.:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik/Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. M. Pandit

24.03.1997

Diplomhauptprüfung im Fach Regelungstechnik I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder nichtprogrammierbarer Taschenrechner, Schreib- und Zeichenzeug. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke oder lose Blätter oder programmierbare Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, logarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1) Schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer.

2) Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluß an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).

3) Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern werden nicht bei der Korrektur berücksichtigt!

4) Schreiben Sie nicht mit Bleistift.

5) Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel in den Doppelbogen gehüllt ab.

6) Die Klausur muß wieder in **gehefteter** Form abgegeben werden!

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 1

Gegeben ist die Ortskurve eines offenen Regelkreises:

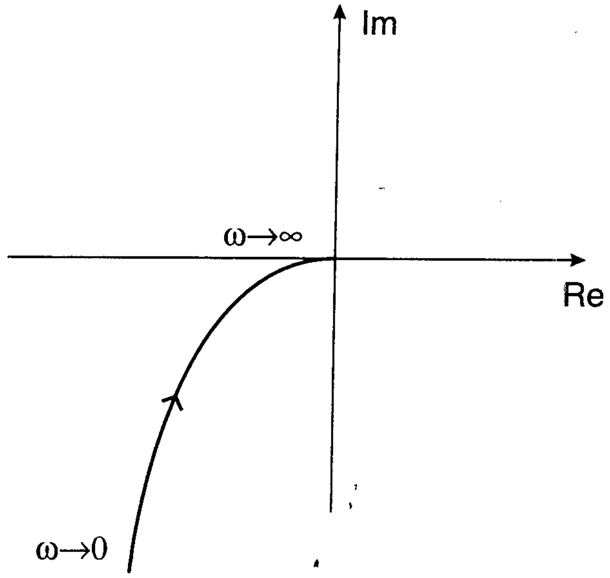


Abb. 1.1: Ortskurve

a) Ist der geschlossene Regelkreis bei negativer Einheitsrückführung (Standardregelkreis) stabil? (Kurze Begründung an Hand der Ortskurve! Die Voraussetzungen für die bekannten Stabilitätskriterien seien erfüllt!)

b) Arbeitet der geschlossene Regelkreis stationär genau? (Kurze Begründung an Hand der Ortskurve!)

c) Wie lautet die Übertragungsfunktion des Gliedes, dessen Ortskurve oben dargestellt ist?

In den offenen Regelkreis wird nun zusätzlich ein Totzeitglied eingebaut.

d) Skizzieren Sie den prinzipiellen Verlauf der Ortskurve des offenen Regelkreises mit Totzeit.

e) Bestimmen Sie allgemein für dieses Übertragungsglied, welche Totzeit maximal zulässig ist, damit der geschlossene Regelkreis stabil ist.

f) Berechnen Sie nun den maximalen Wert dieser Totzeit, wenn der geschlossene Kreis stabil sein soll und die oben abgebildete Ortskurve (ohne Totzeit) den Einheitskreis mit der Phase $\phi = -120°$ bei $\omega = 1$ schneidet.

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 2

Ein kugelförmiger Körper (Radius r, Masse m) schwimmt in einer Flüssigkeit. Die Dichte der Flüssigkeit ist ρ. An diesem Körper greift eine äußere Kraft $F = m \cdot a$ an. Es sollen nur Werte dieser Kraft betrachtet werden, für welche die Eintauchtiefe x_1 im Bereich $0 \leq x_1 \leq 2 \cdot r$ liegt. Die Beschleunigung a werde als Steuergröße betrachtet. Strömungseffekte bleiben unberücksichtigt.

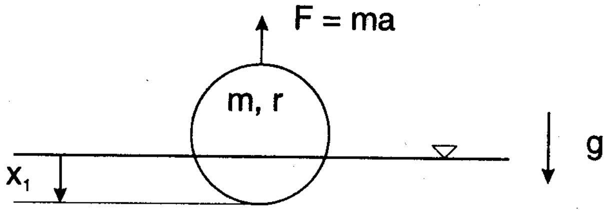


Abb. 2.1: Körper in Flüssigkeit

Das System läßt sich mit der folgenden Differentialgleichung beschreiben:

$$m \cdot \ddot{x}_1 = m \cdot g - \frac{1}{3} \pi \rho g (3 \cdot r \cdot x_1^2 - x_1^3) - m \cdot a$$

a) Stellen Sie die Zustandsgleichungen des Systems auf. Zustandsvariable sind die Eintauchtiefe und die Eintauchgeschwindigkeit.

b) Zeichnen Sie ein Strukturbild des Systems.

c) Bestimmen Sie den Parameterwert $a = a_R$, für den das System bei $x_1 = x_{1R} = \frac{1}{3} \cdot r$ eine Ruhelage hat.

d) Linearisieren Sie das mathematische Modell für kleine Abweichungen vom Ruhezustand $x_1 = x_{1R} = \frac{1}{3} \cdot r$.

e) Geben Sie die Zustandsgleichungen des linearisierten Systems in Matrixschreibweise an.

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 3

Gegeben ist der Regelkreis

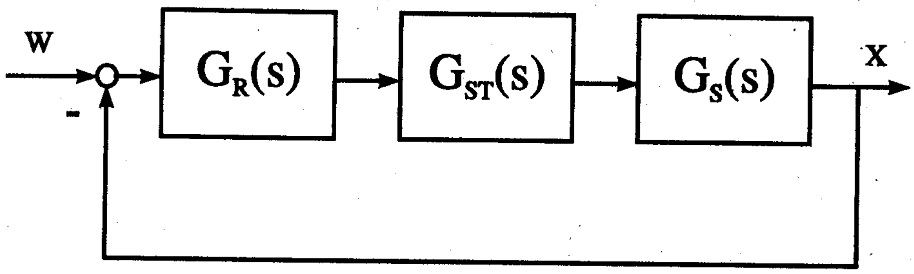


Abb. 3.1: Regelkreis

mit der Regelstrecke

$$G_S(s) = \frac{4}{(1 + 4s)(1 + s)(1 + 0{,}25s)} ,$$

der Stelleinrichtung

$$G_{ST}(s) = \frac{1}{s}$$

und dem Regler

$$G_R(s) = k\frac{1 + T_R s}{1 + 0{,}04s} .$$

a) Bestimmen Sie die Reglerparameter k und T_R so, daß sich eine Phasenreserve von 50° ergibt.
Hinweis: Phase betrachten bei $\omega[s^{-1}]$ = 0,3 0,5 0,8 1,5 2,5 4
Maßstab: 1 cm entspricht 10 dB
1 cm entspricht 50°

Der Streckenfrequenzgang muß nicht gesondert gezeichnet werden!

b) Ist der geschlossene Regelkreis stationär genau?

c) Für welche Werte von k ist der geschlossene Regelkreis stabil, wenn T_R wie in Aufgabenteil a) gewählt wird?

d) Kann der obige Regelkreis auch mit einem realen PID-Regler betrieben werden? Begründen Sie Ihre Aussage!

4/19

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 4

Gegeben ist der Regelkreis in Abb. 4.1 bestehend aus einer Strecke und einem idealen *PD*-Regler.

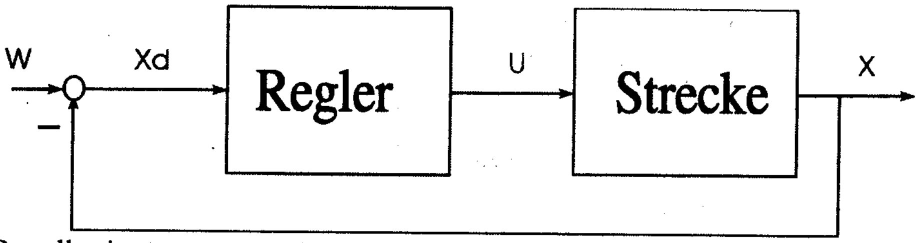


Abb. 4.1: Regelkreis

Die Übertragungsfunktion $G_R(s)$ des idealen *PD*-Reglers ist ($K>0$).

$$G_R(s) = K\cdot(s+4)$$

Die Übertragungsfunktion $G_s(s)$ der Strecke ist.

$$G_s(s) = \frac{1}{(s^2+2\cdot s+2)\,(s^2+10\cdot s+29)}$$

a) Skizzieren Sie die Wurzelortskurve des Regelkreises auf Millimeterpapier. Berechnen Sie hierzu auch:

- Anstiegswinkel der Asymptoten
- Verzweigungspunkte

(Hinweis: Vernachlässigen Sie zwei dem jeweiligen Verzweigungspunkt ferne Pole)

- Stabilitätsbereich abhängig von der Reglerverstärkung K
- Schnittpunkte mit der imaginären Achse

b) Der obige ideale *PD*-Regler wird nun durch den folgenden realen *PD*-Regler ersetzt.

$$G_R(s) = K\cdot\frac{s+4}{0{,}2s+1}$$

Skizzieren Sie den prinzipiellen Verlauf der Wurzelortskurve.

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 5

a) Welche Effekte können bei der Simulation dynamischer Systeme mit CAE-Tools auftreten, wenn die Simulationsschrittweite zu groß gewählt wird, beispielsweise bei einem Standardregelkreis mit VZ1-Glied als Strecke und einem P-Regler. (Kurze Erläuterung)

b) b1) Zeichnen Sie ausgehend von der Zustandsraumbeschreibung eines Systems ohne Durchgriff das dieser Beschreibungsform entsprechende Strukturbild.

b2) Wie muß das Strukturbild ergänzt werden, wenn die Anfangszustände mitberücksichtigt werden?

c) Erklären Sie den Begriff Anti-Reset-Windup (ARW). Wann und wozu wird ARW eingesetzt? (Erklärung evtl. mit Skizze)

d) Gegeben sind folgende Regelkreise:

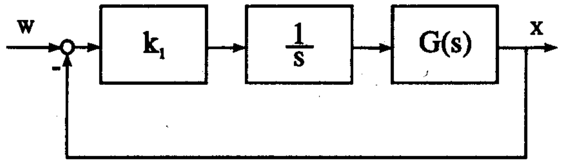


Abb. 5.1: Regelkreis 1

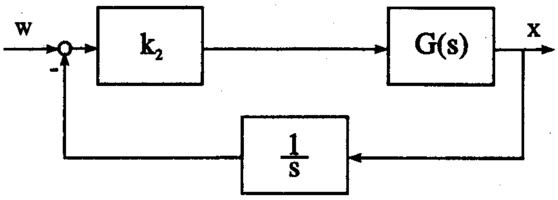


Abb. 5.2: Regelkreis 2

d1) In Regelkreis 1 wird die Stabilitätsgrenze für $k_1 = 3$ erreicht. Wo ist die Stabilitätsgrenze für Regelkreis 2? (Begründung!)

d2) Wie groß ist x im stationären Zustand in beiden Fällen unter der Annahme, daß ein solcher Zustand existiert? (Begründung!)?

d3) Im Regelkreis 3 bleibt im stationären Zustand, der existieren soll, eine Regelabweichung $xd = w - x \neq 0$. Sie soll durch Einfügen eines P-Gliedes gemäß Abb. 5.3 zu Null gemacht werden. Welchen Wert muß c = const. annehmen?

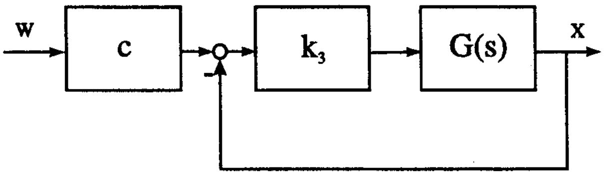


Abb. 5.3: Regelkreis 3

H96

Name: Matrikelnr.:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik/Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. M. Pandit

30.09.1996

Diplomhauptprüfung im Fach Regelungstechnik I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder nichtprogrammierbarer Taschenrechner, Schreib- und Zeichenzeug. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke oder lose Blätter oder programmierbare Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, logarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1) Schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer.

2) Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluß an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).

3) Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern werden nicht bei der Korrektur berücksichtigt!

4) Schreiben Sie nicht mit Bleistift.

5) Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel in den Doppelbogen gehüllt ab.

6) Die Klausur muß wieder in **gehefteter** Form abgegeben werden!

H96
7/5

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 1

Ein kugelförmiger Körper (Radius r, Masse m) schwimmt in einer Flüssigkeit. Die Dichte der Flüssigkeit ist ρ. An diesem Körper greift eine äußere Kraft $F = m \cdot a$ an. Es sollen nur Werte dieser Kraft betrachtet werden, für welche die Eintauchtiefe x_1 im Bereich $0 \leq x_1 \leq 2r$ liegt. Die Beschleunigung a werde als Steuergröße betrachtet. Strömungseffekte bleiben unberücksichtigt.

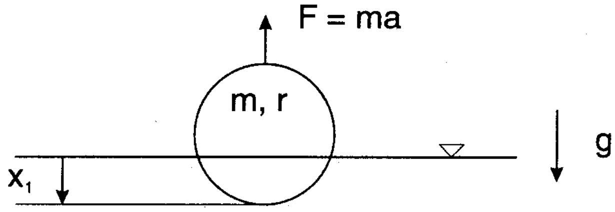


Abb. 1.1: Körper in Flüssigkeit

Das System läßt sich mit der folgenden Differentialgleichung beschreiben:

$$m \cdot \ddot{x}_1 = m \cdot g - \frac{1}{3}\pi \rho g (3 \cdot r \cdot x_1^2 - x_1^3) - m \cdot a$$

a) Stellen Sie die Zustandsgleichungen des Systems auf. Zustandsvariable sind die Eintauchtiefe und die Eintauchgeschwindigkeit.

b) Zeichnen Sie ein Strukturbild des Systems.

c) Bestimmen Sie den Parameterwert $a = a_R$, für den das System bei $x_1 = x_{1R} = \frac{1}{3} \cdot r$ eine Ruhelage hat.

d) Linearisieren Sie das mathematische Modell für kleine Abweichungen vom Ruhezustand $x_1 = x_{1R} = \frac{1}{3} \cdot r$.

e) Geben Sie die Zustandsgleichungen des linearisierten Systems in Matrixschreibweise an.

4/96
2/5

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 2

Es ist ein realer PID-Regler mitttels Frequenzkennlinienverfahren zu entwerfen, mit

$$T_N = 1/4\ T_{R2}$$

(T_{R2} ist die kleinere der Zählerzeitkonstanten des Reglers), wobei von folgendem Regelkreis auszugehen ist:

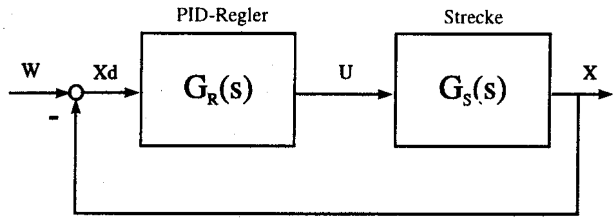


Abb. 2.1: Regelkreis

a) Wie lautet der Reglerfrequenzgang $G_R(j\omega)$, wenn eine Durchtrittsfrequenz von $\omega_0 = 2{,}5 s^{-1}$ verlangt wird?
Der Streckenfrequenzgang ist gegeben durch:

$$G_S(j\omega) = 8 \frac{(1 + 2j\omega)\ (1 + 0{,}1j\omega)}{(1 + 10j\omega)(1 + j\omega)(1 + 0{,}5j\omega)^2}$$

Hinweis: Phase betrachten bei $\omega[s^{-1}] = 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 7$
Maßstab: 1 cm entspricht 50°

Der Streckenfrequenzgang muß nicht gesondert gezeichnet werden!

b) Ist der geschlossene Regelkreis mit dem Regler aus Aufgabenteil a) stabil? Begründen Sie Ihre Antwort!

c) Welche Phasenreserve stellt sich mit dem Regler aus Aufgabenteil a) ein?

d) Welchen Wert nimmt die Regeldifferenz $x_d(t)$ im eingeschwungenen Zustand an, wenn der Regler aus a) verwendet wird? Begründen Sie Ihre Antwort!

4 96
3/5

<u>Name:</u> <u>Matrikelnr.:</u>

<u>Aufgabe 3</u>

Gegeben sei folgender Regelkreis:

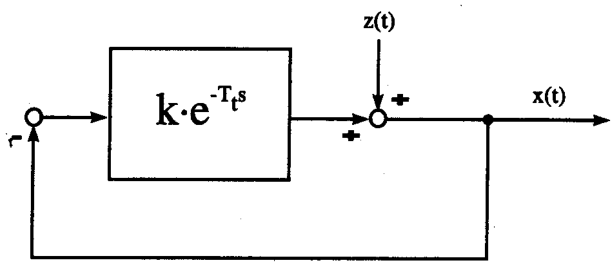


Abb. 3.1: Regelkreis

a) Wie lautet die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises?

b) Berechnen und zeichnen Sie die Wurzelortskurve zum obigen Regelkreis.

c) In welcher Richtung werden die Äste der Wurzelortskurve bei wachsendem k durchlaufen? (Begründung!)

d) Für welche Werte von k liegen die Pole des geschlossenen Regelkreises links von der imaginären Achse der s-Ebene?

e) Wie muß k gewählt werden, damit alle Pole des geschlossenen Regelkreises einen Realteil von -2 haben?

H 96
4/5

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 4

Gegeben sei folgender Regelkreis:

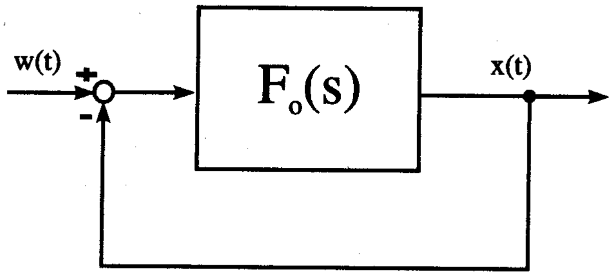


Abb. 4.1: Regelkreis

mit $$F_o(s) = k \cdot \frac{(s+3)}{s\,(s+6)\,(s+5)\,(s^2+2s+2)} \qquad k > 0$$

a) Berechnen und zeichnen Sie die Wurzelortskurve zum obigen Regelkreis (Milimeter-papier).

Hinweise:

- Bei s = -5,53 gibt es einen Verzweigungspunkt (andere Verzweigungspunkte sind nicht möglich).
- Die Wurzelortskurve schneidet die imaginäre Achse der s-Ebene bei $\omega = \pm 1{,}35$

b) Wie groß ist der Fehler, der sich bei einer näherungsweisen Berechnung der Verzweigungspunkte ergibt (bei Vernachlässigung von drei fernen Polen)?

c) Für welche Werte von k ist der geschlossene Regelkreis stabil?

d) Für welche Werte von k hat der geschlossene Regelkreis einen Mehrfachpol?

e) Der geschlossene Regelkreis werde an der Stabilitätsgrenze betrieben. Zwei der insgesamt fünf Pole sind dann konjugiert komplex. Sind die restlichen drei Pole reell oder komplex?

H 96
5/5

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 5

a) a1) Wofür steht die Abkürzung CAE?

a2) Nennen Sie mindestens zwei CAE-Tools.

a3) Zu welchen Aufgaben werden CAE-Tools in der Regelungstechnik eingesetzt? Nennen Sie mindestens drei Aufgabengebiete und erläutern Sie das Aufgabengebiet kurz (1 Satz).

b) Beurteilen Sie die Richtigkeit der folgenden Aussagen. Begründen Sie Ihre Antwort, z. B. anhand eines Beispiels oder Gegenbeispiels. Antworten ohne Begründung werden nicht gewertet.

b1) Das Wurzelortskurvenverfahren kann bei Systemen mit Totzeit grundsätzlich nicht angewendet werden.

b2) Bei einem Minimalphasensystem ist der Betrag der Phase $\leq 90°$.

b3) Ein Regelkreis mit zwei Integriergliedern ist immer stationär genau.

c) Was ist die Wurzelortskurve? (Erklärung bzw. Definition)

d) Gegeben sei die Ortskurve eines offenen Regelkreises, der einen P-Regler mit der Verstärkung $K_p = 1$ besitzt (Abb. 5.1).

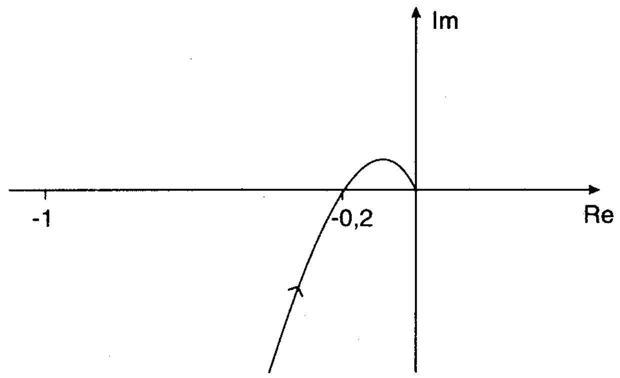


Abb. 5.1: Ortskurve

d1) Ist der geschlossene Regelkreis stabil (Begründung)?

d2) Auf welchen Wert muß K_p eingestellt werden, damit eine Dauerschwingung auftritt?

(Beispiellösung) H 96

RETE

118

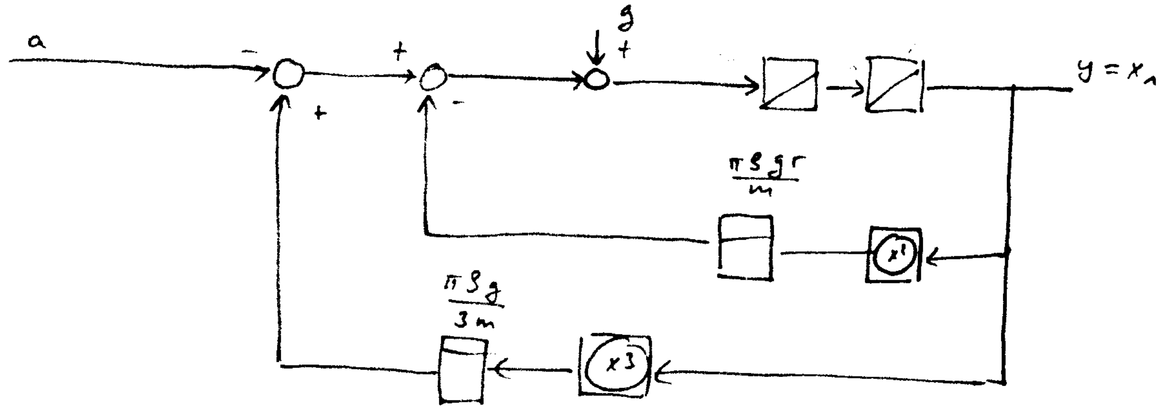
1.
$$m\ddot{x}_1 = mg - \frac{1}{3}\varrho g \pi (3 r x_1^2 - x_1^3) - ma$$

a) $x_2 = \dot{x}_1$

$$\dot{x}_2 = g - \frac{1}{3}\frac{\varrho g \pi}{m}(3 r x_1^2 - x_1^3) - a \qquad (I)$$

$$y = x_1 \qquad (II)$$

b)



Variation sind möglich.

c) Eingänge von Int.-Glieder sind Null zu setzen.

$$-a_{r_0} + \frac{\pi\varrho g}{3m}x_1^3 - \frac{\pi\varrho g r}{m}x_1^2 + g = 0 \quad \Big|_{x_1 = \frac{1}{3}r}$$

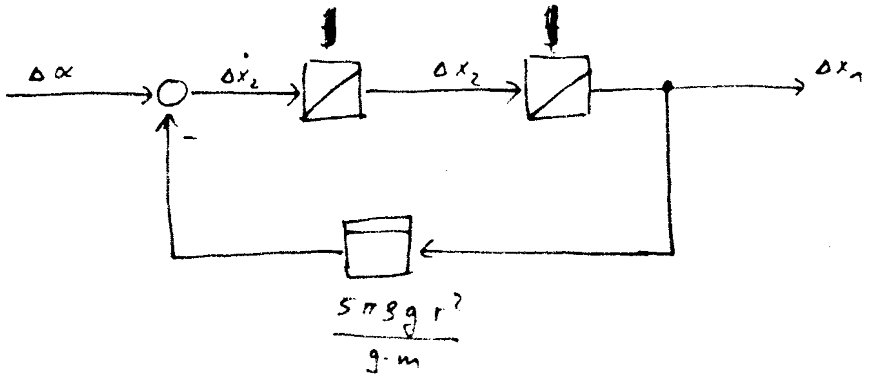
$$a_{r_0} = \frac{\pi\varrho g}{3m}\left(\frac{r}{3}\right)^2 - \frac{\pi\varrho g r}{m}\left(\frac{r}{3}\right)^2 + g = \underline{\underline{g\left(1 - \frac{8\pi\varrho}{81 m}r^3\right)}}$$

d) $\dot{x}_2 = f(x_1, a, g)$

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial x_1}\Bigg|_{\substack{x_1 = \frac{1}{3}r \\ x_2 = 0 \\ g = g}} \cdot \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial a}\Bigg|_{\substack{x_1 = \frac{1}{3}r \\ x_2 = 0 \\ g = g}} \cdot \Delta a + \underbrace{\frac{\partial f}{\partial g}\Bigg|_{\substack{x_1 = \frac{1}{3}r \\ x_2 = 0 \\ g = g}} \cdot \underbrace{\Delta g}_{=0}}_{\Rightarrow = 0}$$

$$\Rightarrow \Delta f = -\frac{1}{3}\frac{\pi\varrho g}{m}(6 r x_1 - 3 x_1^2)\Bigg|_{\substack{x_1 = \frac{1}{3}r \\ x_2 = 0 \\ g = g}} \cdot \Delta x_1 + (-1)\Delta a$$

1. d)



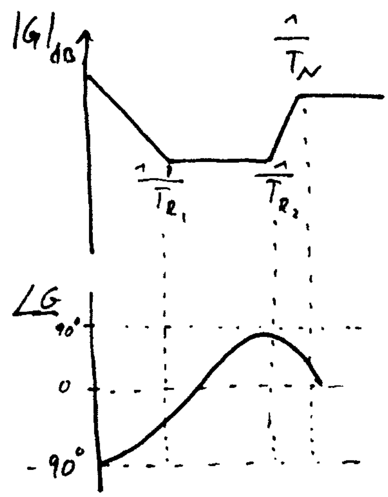
e)

$$\begin{pmatrix} \Delta\dot{x}_1 \\ \Delta\dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{5\pi\varrho g r^2}{g m} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} \Delta a$$

2. Bei Reglerentwurf in der Klausur grundsätzlich: Immer die größten Streckenzeitkonstanten rauskürzen!

allgemeines: realer PID-Regler

$$G_R(s) = K_R \frac{(1+T_{R_1} s)(1+T_{R_2} s)}{s(1+T_N \cdot s)}$$



a) $G(s) = G_R(s) \cdot G_S(s)$

$$= \frac{8 \cdot K_R \cdot (1+2s)(1+\frac{s}{10})}{s(1+\frac{s}{4})(1+\frac{s}{2})^2}$$

Anmerkung: bei der WOK Terme in der Form $(s+b)$
bei der FKL " " " " $(s \cdot T + 1)$

aus FKL $|K_R|_{dB} = 2\,dB \Rightarrow \underline{\underline{K_R = 1{,}59}}$

$$G_R(j\omega) = 1{,}59 \cdot \frac{(1+10j\omega)(1+j\omega)}{j\omega(1+\frac{1}{4}j\omega)}$$

b) Nyquist in FKL: $\omega_D > -180°$ $\Rightarrow$ $\underline{\underline{\text{stabil}}}$

c) aus b) $\underline{\underline{\varphi_R = 50°}}$

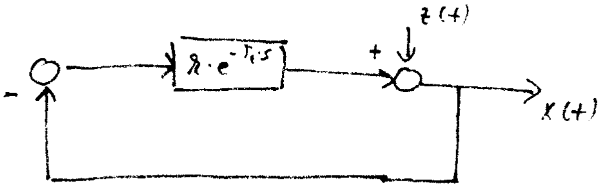
H96

2.

d) $x_d(\infty) = \dfrac{1}{1 + F_0(0)} = 0 \quad \Rightarrow$ 100 % stationär genau

3/8

3.



a) $x(s) = z(s) + k e^{-T_t \cdot s} \cdot (-x(s))$

$\Rightarrow \quad x(s) \cdot \left[1 + k e^{-T_t \cdot s} \right] = z(s)$

$\Rightarrow$

$$g(s) = \frac{1}{1 + k e^{-T_t \cdot s}}$$

b) $1 + k e^{-T_t \cdot s} \overset{!}{=} 0$ Polstellen bestimmen

$s = -\frac{1}{T_t} \ln\left(-\frac{1}{k}\right) = \frac{1}{T_t} \ln(-k)$

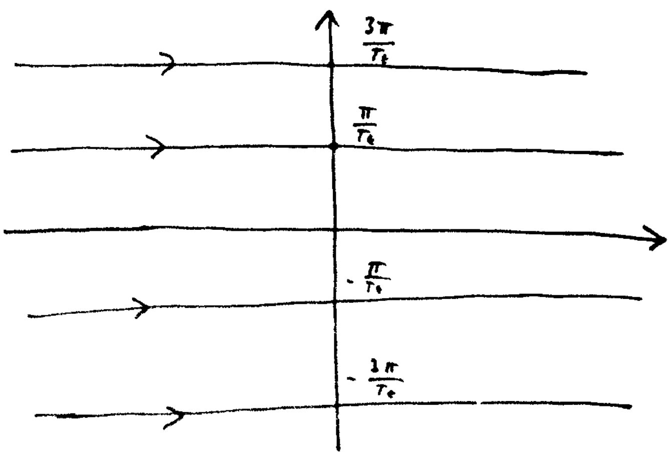
bei WOK $k > 0 \Rightarrow$ komplexe Logarithmus

$\Rightarrow \quad s = \frac{1}{T_t} \left(\ln|k| + j(2n+1)\pi \right) \qquad n \in \mathbb{Z}$

für $k \to 0 \Rightarrow s \to -\infty$

$k \to \infty \Rightarrow s \to \infty$

$k = 1 \Rightarrow \mathrm{Re}(s) = 0$



c) aus b) $k \to \infty \Rightarrow \mathrm{Re}(s) \to \infty$

d) nur positive Verstärkung

$\Rightarrow \quad 0 < k < 1$

e) $\mathrm{Re}(s) = -2 \overset{!}{=} \frac{1}{T_t} \ln|k| \quad \Rightarrow \quad k = e^{-2T_t}$

4. a) $$G(s) = \frac{K(s+3)}{s(s+5)(s+6)(s^2+2s+2)}$$ $s_{1/2} = -1 \pm j$

+176

418

$n - m = 4$ Unendliche

Asymptotenschnittpunkt

$$\sigma_w = \frac{\sum_{\mu=1}^{m} Re(n_\mu) - \sum_{\nu=1}^{n} Re(p_\nu)}{m-n} = -\frac{1}{4}\left(-3-(0-5-6-1-1)\right) = \underline{\underline{-2{,}5}}$$

Asymptotenwinkel

$$\varphi_i = (2i+1)\frac{\pi}{n-m} \qquad i = 0, \dots, n-m-1$$

$\varphi_0 = -\frac{\pi}{4}$ $\varphi_1 = -\frac{3\pi}{4}$

$\varphi_2 = -\frac{5\pi}{4}$ $\varphi_3 = -\frac{7\pi}{4}$

Verzweigungspunkt bei $-5{,}53$

$$\Delta\varphi_i = \frac{\pi}{r} = \underline{\underline{\frac{\pi}{2}}}$$

$$\varphi_{p_i} = -\frac{1}{\varepsilon_p r_p} \sum_{\substack{\lambda=1 \\ s_p \neq s_\lambda}}^{n+m} \varepsilon_\lambda \angle s_p - s_\lambda + (2i+1)\frac{\pi}{\varepsilon_p r_p}$$

hier $\varphi_p = -43{,}78°$

b) Vernachlässigung: von s, (s^2+2s+2)

$$\Rightarrow \frac{1}{s+3} - \frac{1}{s+5} - \frac{1}{s+6} = 0 \Rightarrow s_{1/2} = -3 \pm \sqrt{6}$$

nur $s_1 = -3-\sqrt{6}$ sinnvoll

$\approx -5{,}449$

$$\Delta = \frac{h_{ist} - h_{soll}}{h_{soll}} \approx \underline{\underline{1{,}46\,\%}}$$ Abweichung

c) $$k = +\frac{\prod_{\nu=1}^{n} |(s-p_\nu)|}{\prod_{\mu=1}^{m} |(s-n_\mu)|} = \dots \Rightarrow k = \frac{1{,}35 \cdot \sqrt{5^2+1{,}35^2} \cdot \sqrt{36+1{,}35^2}\sqrt{(2-\omega^2)^2+4\omega^2}}{\sqrt{1{,}35^2+3^2}}$$

$$= \underline{\underline{35{,}37}}$$

5/8

4. d) $s = -5,53$

$$k_2 = -\frac{s(s+5)(s+6)(s^2+2s+2)}{s+3}\Bigg|_{s=-5,53} = \underline{\underline{11,718}}$$

e) 1 Pol reell

2 Polpaare komplex, da $\underline{k_1 = 35,37 > k_2 = 11,718}$

5. (1) a) CAE ≙ Computer Aided ~~Design~~ Engineering

b) • Simulab Tool unter Matlab

• PC-Dora

c) · Synthese

· Simulation

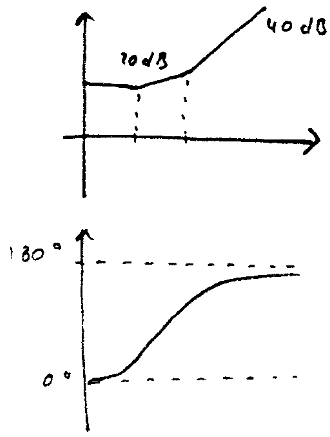
· Analyse

(2)

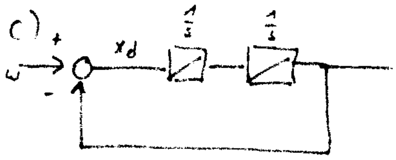
siehe Skript S. 122

(3) a) nein, man erhält zwar transzente Funktion, aber die WOK ist lösbar. siehe Aufgabe 3.

b) $G(s) = (s+1)(s+2)$



c)

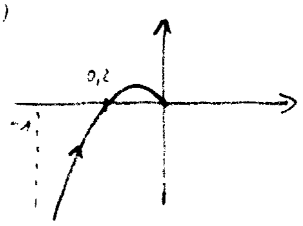


$x_d = w - x_d \left(\frac{1}{s^2}\right)$

$\Rightarrow x_d = \frac{w}{1 + \frac{1}{s^2}}$

$\Rightarrow$ nicht stationär genau, da instabil! (da kein HP)

5. (d) (α)



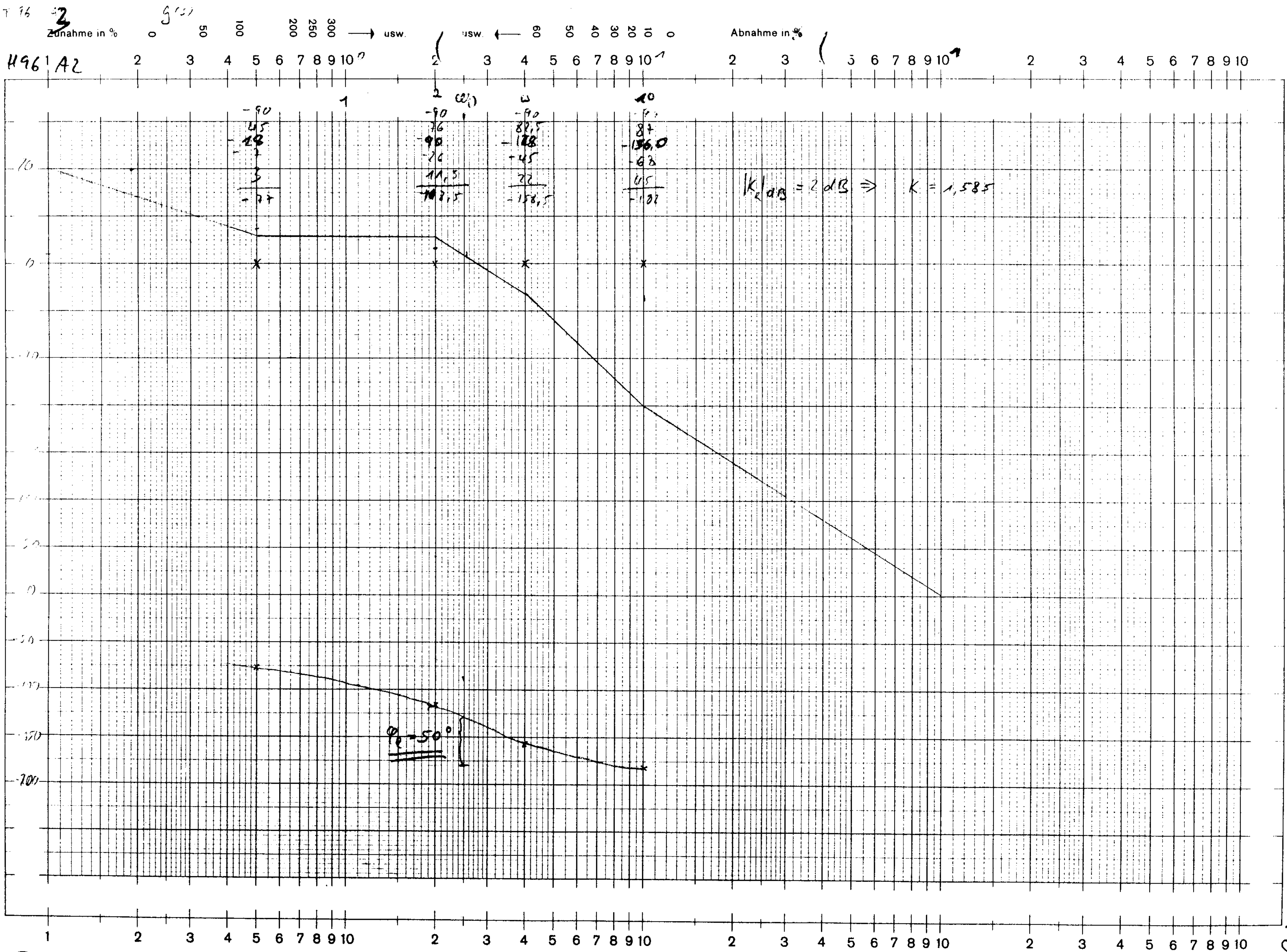
Nyquist-Kriterium:

Punkt $(-1, j0)$ muß links der Ortskurve liegen.

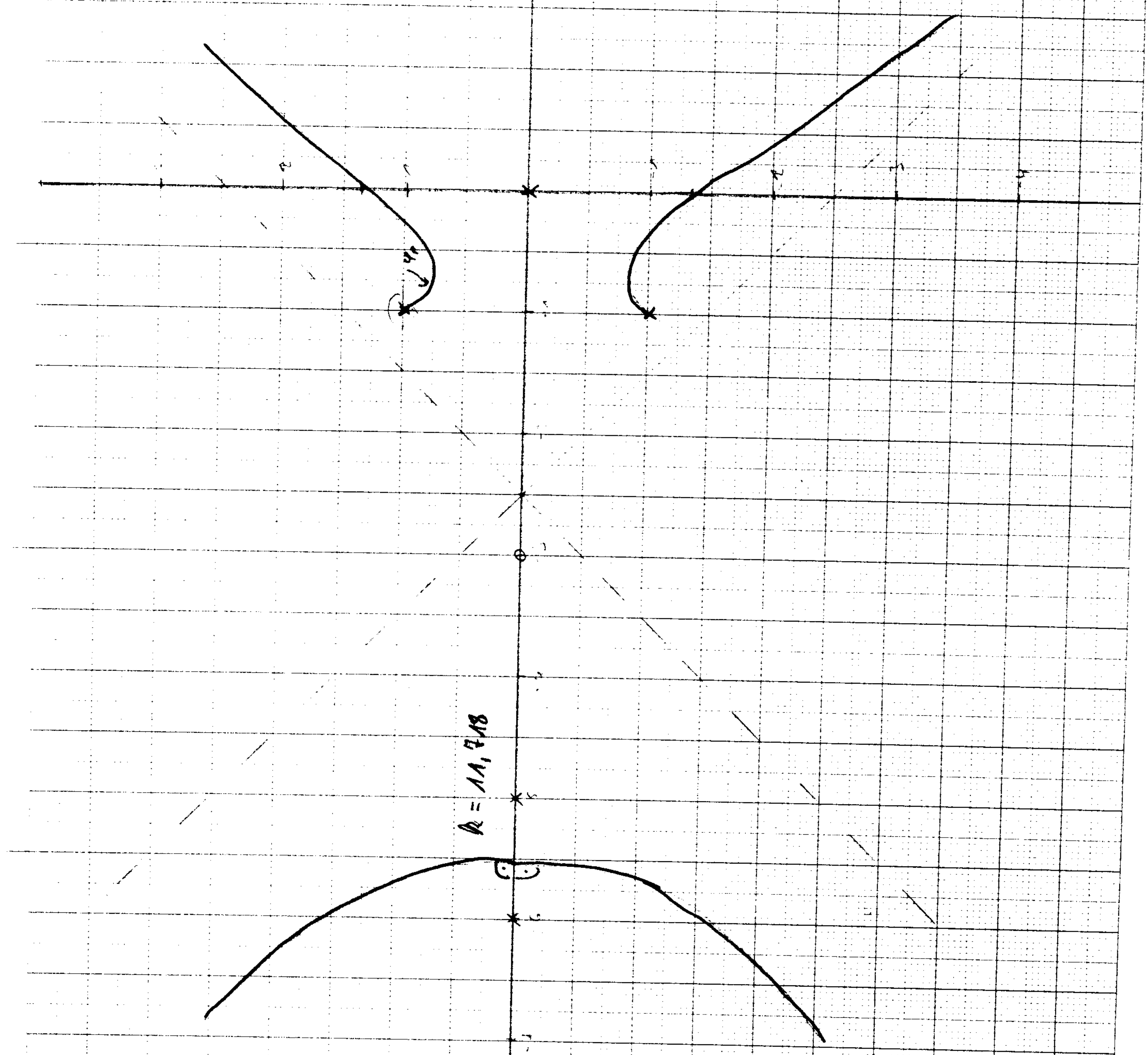
$\Rightarrow$ stabil

6/8

(β) $\underline{\underline{K = 5}}$, da OK Punkt $(-1, j0)$ durchstößt.



Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 10000, Einheit 62,5 mm, die andere in mm mit Prozentmaßstab


k = 11,718

1/7

Name: Matrikelnr.:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik/Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. M. Pandit

18.03.1996

Diplomhauptprüfung
im Fach
Regelungstechnik I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder nichtprogrammierbarer Taschenrechner, Schreib- und Zeichenzeug. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke oder lose Blätter oder programmierter Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, logarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1) Schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer.

2) Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluß an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).

3) Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern werden nicht bei der Korrektur berücksichtigt!

4) Schreiben Sie nicht mit Bleistift.

5) Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel in den Doppelbogen gehüllt ab.

6) Die Klausur muß wieder in **gehefteter** Form abgegeben werden!

F'36

2/7

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 1

Gegeben sei folgendes elektrisches Netzwerk:

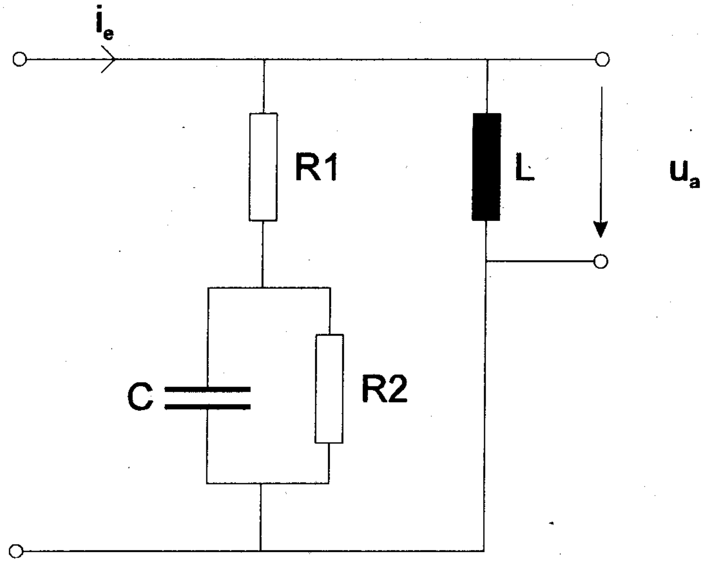


Abb. 1.1: Elektrisches Netzwerk

a) Ermitteln Sie das Strukturbild zu dem gegebenen Netzwerk, **wobei jedem Bauteil genau ein Elementarblock zuzuordnen ist**, Eingangsgröße ist der Strom i_e, Ausgangsgröße ist die Spannung u_a.
(Hinweis: Benutzen Sie keine Differenzierglieder)

b) Vereinfachen Sie schrittweise das in a) gewonnene Strukturbild zu einem Übertragungsblock, indem Sie nacheinander die Regeln zur Umformung eines Strukturbildes einsetzen.

c) Geben Sie die Zustandsdarstellung des Systems in Matrizenschreibweise an (Es sind alle systembeschreibenden Matrizen anzugeben).

d) Bestimmen Sie ausgehend von der Zustandsdarstellung eines linearen zeitinvarianten SISO-Systems (Single-Input-Single-Output) den Zusammenhang zwischen den beschreibenden Systemmatrizen und der Übertragungsfunktion G(s) des Systems.

3/4

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 2

Gegeben sei ein dynamisches System mit der Eingangsgröße u(t), der Ausgangsgröße y(t) und einer Zwischengröße $y_1(t)$, welches durch die folgenden gekoppelten Gleichungen beschrieben wird:

$$y_1(t) = \int_{\tau=0}^{t} \{u(\tau) - b \cdot y(\tau)\} d\tau$$

$$\dot{y}(t) + 2 \cdot y(t) = a \cdot u(t) + y_1(t-1)$$

a) Ist das System linear oder nichtlinear? (Begründung!)

b) Ist das System zeitvariant oder zeitinvariant? (Begründung!)

c) Bestimmen Sie mit Hilfe der Laplace-Transformation die Übertragungsfunktion G(s) = Y(s)/U(s).

d) Zeichnen Sie ein Strukturbild des Systems unter Verwendung einfacher Übertragungsglieder (keine Differenzierglieder).

e) Skizzieren Sie die Ortskurve des Frequenzganges dieses Systems für a = b = 0.

f) Es gelte nun wieder $a \neq 0$ und $b \neq 0$. Die Dynamik des obigen Systems soll mit Hilfe einer Einheitsrückführung und eines P-Reglers verbessert werden. Kann die Stabilität des geschlossenen Regelkreises mit Hilfe des Hurwitz-Kriteriums für beliebige a und b nachgeprüft werden? (Begründung!)

4/2

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 3

Es ist ein realer PID-Regler mitttels Frequenzkennlinienverfahren zu entwerfen, mit

$$T_N = 1/4\ T_{R2}$$

(T_{R2} ist die kleinere der Zählerzeitkonstanten des Reglers), wobei von folgendem Regelkreis auszugehen ist:

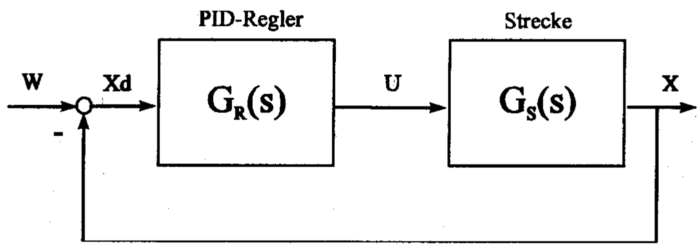


Abb. 3.1: Regelkreis

a) Wie lautet der Reglerfrequenzgang $G_R(j\omega)$, wenn eine Durchtrittsfrequenz von $\omega_0 = 2.5 s^{-1}$ verlangt wird?
Der Streckenfrequenzgang ist gegeben durch:

$$G_S(j\omega) = 8 \frac{(1 + 2j\omega)\ (1 + 0{,}1j\omega)}{(1 + 10j\omega)(1 + j\omega)(1 + 0{,}5j\omega)^2}$$

Hinweis: Phase betrachten bei $\omega[s^{-1}] = 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 7$
Maßstab: 1 cm entspricht 50°

b) Ist der geschlossene Regelkreis mit dem Regler aus Aufgabenteil a) stabil? Begründen Sie Ihre Antwort!

c) Welche Phasenreserve stellt sich mit dem Regler aus Aufgabenteil a) ein?

d) Welchen Wert nimmt die Regeldifferenz $x_d(t)$ im eingeschwungenen Zustand an, wenn der Regler aus a) verwendet wird? Begründen Sie Ihre Antwort!

F'96 5/4

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 4

Gegeben sei folgender Regelkreis:

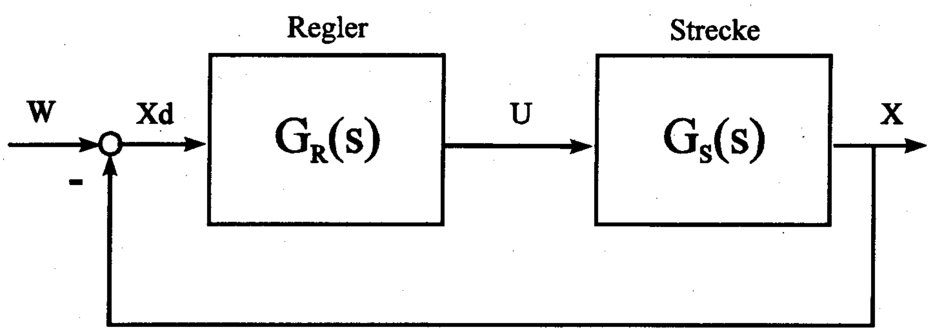
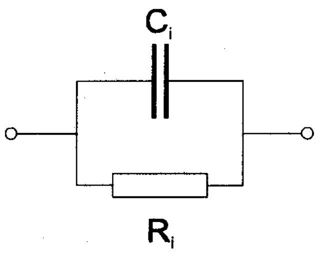


Abb. 4.1: Regelkreis

$$\text{mit} \qquad G_S(s) = \frac{1}{5s^3 + 12,5s^2 - 17,5s}$$

a) Als Regler soll ein idealer PD-Regler eingesetzt werden. Geben Sie die Operationsverstärkerschaltung eines idealen PD-Reglers und die Parameter K_R und T_R in Abhängigkeit der elektronischen Bauteile an (Hinweis: die Verstärkung des Reglers soll positiv sein, was durch einen zusätzlichen invertierenden Operationsverstärker erreicht wird).

b) Zur Realisierung des idealen PD-Reglers stehen alternativ zwei fest verdrahtete RC-Glieder zur Verfügung:



b1)	$C_1 = 100$ nF	$R_1 = 1$ MΩ
b2)	$C_2 = 50$ nF	$R_2 = 20$ MΩ

Abb. 4.2: RC-Glied

Skizzieren Sie die Wurzelortskurven der beiden möglichen Regelkreise auf Millimeterpapier und wählen Sie den geeigneten Regler aus (Begründung !).
Berechnen Sie hierfür (falls existent):

- Asymptotenschnittpunkt
- Anstiegswinkel der Asymptoten
- Schnittwinkel der Äste in den Verzeigungspunkten
- Schnittpunkte mit der imaginären Achse

F'96 6/12

Name: Matrikelnr..

c) Welche Aussagen können bezüglich der Stabilität der beiden in b) entstehenden Regelkreise gemacht werden? Bestimmen Sie gegebenenfalls geeignete Reglerverstärkungsfaktoren K_R durch Dimensionierung der verbliebenen elektronischen Bauteile des PD-Reglers.

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 5

a) Nennen Sie die grundlegenden Anforderungen, die an einen Regelkreis gestellt werden.
Welches ist die wichtigste?

b) Erklären Sie kurz, was ein Hurwitz-Polynom ist und wozu das Hurwitz-Kriterium dient. Welchen Stellenwert hat es heute noch in der Praxis?

c) Was ist immer bei der Auswertung von Graphiken und Ergebnissen von CAE-Simulationen (z. B. DORA-PC) innerhalb der Regelungstechnik zu beachten? Nennen Sie hierzu stichwortartig mindestens drei Gründe.

d) Wie lautet das Nyquist-Kriterium?
Welche Voraussetzungen müssen für seine Gültigkeit erfüllt sein?

1/7
H/95

Name: Matrikelnr.:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik/Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. M. Pandit 25.09.1995

Diplomhauptprüfung
im Fach
Regelungstechnik I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder nichtprogrammierbarer Taschenrechner, Schreib- und Zeichenzeug. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke oder lose Blätter oder programmierter Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, logarithmisches Papier (62,5 mm pro Dekade), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1) Schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer.

2) Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluß an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).

3) Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern werden nicht bei der Korrektur berücksichtigt!

4) Schreiben Sie nicht mit Bleistift.

5) Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel in den Doppelbogen gehüllt ab.

6) Die Klausur muß wieder in **gehefteter** Form abgegeben werden!

2 /17
H 95

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 1

Gegeben sei folgendes elektrisches Netzwerk:

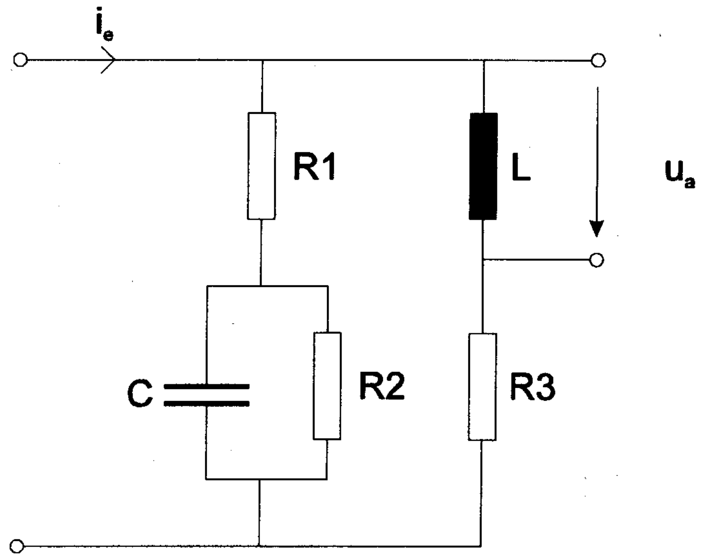


Abb. 1.1: Elektrisches Netzwerk

a) Ermitteln Sie das Strukturbild zu dem gegebenen Netzwerk, wobei jedem Bauteil genau ein Elementarblock zuzuordnen ist, Eingangsgröße ist der Strom i_e, Ausgangsgröße ist die Spannung u_a.

b) Vereinfachen Sie schrittweise das in a) gewonnene Strukturbild zu einem Übertragungsblock, indem Sie nacheinander die Regeln zur Umformung eines Strukturbildes einsetzen.

c) Geben Sie die Zustandsdarstellung des Systems in Matrizenschreibweise an (Es sind alle systembeschreibenden Matrizen anzugeben).

d) Bestimmen Sie ausgehend von der Zustandsdarstellung eines linearen zeitinvarianten SISO-Systems (Single-Input-Single-Output) den Zusammenhang zwischen den beschreibenden Systemmatrizen und der Übertragungsfunktion G(s) des Systems.

3 1/4

H 95

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 2

Gegeben sei ein Übertragungsglied mit folgender Übertragungsfunktion:

$$F(s) = \frac{K}{T_1 s(1 + T_2 s)^2}$$

$$wobei: \quad T_1 = 4s,\ T_2 = 0.5s \ und\ K = 5$$

a) Berechnen Sie die Frequenz ω_s, bei welcher der Frequenzgang des Übertragungsgliedes eine Phase von $\phi = -180°$ aufweist.

b) Bestimmen Sie den Betrag des Frequenzganges für $\omega = \omega_s$.

c) Berechnen Sie die Frequenz ω_d, bei welcher der Betrag des Frequenzganges den Wert 1 aufweist.

d) Zeichnen Sie die Ortskurve des Übertragungsgliedes. Ermitteln Sie hierfür auch den Punkt der Ortskurve mit $\omega = 0$.

e) Ist der geschlossene Regelkreis, bestehend aus F(s) und Einheitsrückführung stabil ? (Begründung !)

4/7
~~4/95~~
H 95

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 3

a) Für welche Werte n_1 und n_2 nach der folgenden Tabelle ist der Regelkreis in Abb. 3.1 für $k>0$ stationär genau und stabil ? Beachten Sie, daß in Abb. 3.1 eine konstante Störgröße $u_{stör} = const$ vorliegt. Bitte schreiben Sie in die folgende Tabelle jeweils **ja** oder **nein**. Die Antworten sind kurz zu begründen. Antworten ohne Begründung werden nicht anerkannt !

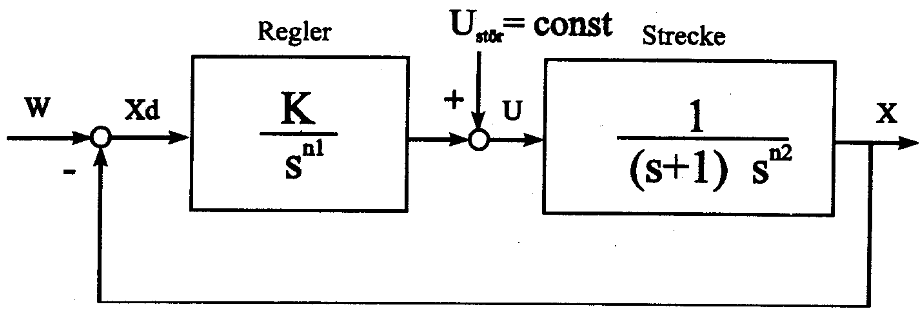


Abb. 3.1: Regelkreis mit verschiedenen Integrieren

n_1	n_2	stabil	stationär genau
0	0		
0	1		
0	2		
1	0		
1	1		

b) Gegeben sei eine Regelstrecke mit der Übertragungsfunktion $G(s)$:

$$G(s) = \frac{8}{(4+s)(0.5+s)}$$

Entwerfen Sie mittels des Frequenzkennlinienverfahrens (Logarithmisches Papier verwenden) einen PI-Regler so, daß der entstehende offene Regelkreis eine Durchtrittsfrequenz von $\omega_0 = 3s^{-1}$ und eine Phasenreserve von $\phi = 40°$ besitzt. Geben Sie die Kennwerte des Reglers an und zeichnen Sie die Frequenzkennlinien des resultierenden offenen Regelkreises.
(Hinweis: Geben Sie mindestens 6 geeignete Phasenwerte für jeden Phasengang an)

5/17
H 95

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 4

Gegeben sei folgender Regelkreis:

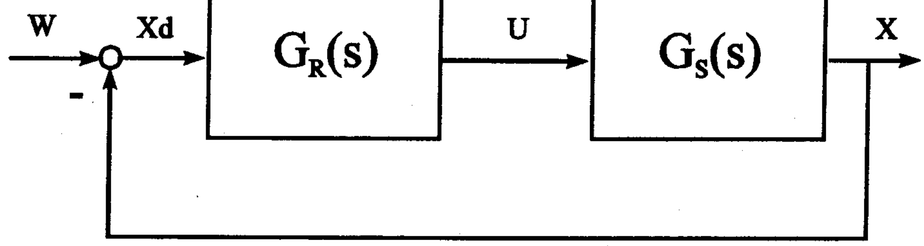


Abb. 4.1: Regelkreis

$$mit \quad G_S(s) = \frac{1}{5s^3 + 12.5s^2 + 17.5s}$$

a) Als Regler soll ein idealer PD-Regler eingesetzt werden. Geben Sie die Operationsverstärkerschaltung eines idealen PD-Reglers und die Parameter K_R und T_R in Abhängigkeit der elektronischen Bauteile an (Hinweis: die Verstärkung des Reglers soll positiv sein).

b) Zur Realisierung des idealen PD-Reglers stehen alternativ zwei fest verdrahtete RC-Glieder zur Verfügung:

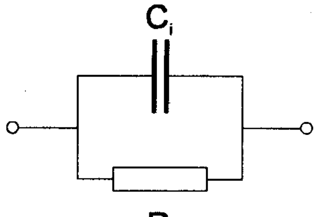


Abb. 4.2: RC-Glied

b1) $C_1 = 100$ nF $R_1 = 1$ MΩ

b2) $C_2 = 50$ nF $R_2 = 20$ MΩ

Skizzieren Sie die Wurzelortskurven der beiden möglichen Regelkreise auf Millimeterpapier und wählen Sie den geeigneten Regler aus (Begründung !).
Berechnen Sie hierfür (falls existent):

- Asymptotenschnittpunkt
- Anstiegswinkel der Asymptoten
- Schnittwinkel der Äste in den Verzeigungspunkten
- Schnittpunkte mit der imaginären Achse

6/17

H 95

Name: Matrikelnr.:

c) Welche Aussagen können bezüglich der Stabilität der beiden in b) entstehenden Regelkreise gemacht werden? Bestimmen Sie gegebenenfalls geeignete Reglerverstärkungsfaktoren K_R durch Dimensionierung der verbliebenen elektronischen Bauteile des PD-Reglers.

7/7

H 95

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 5

a) Skizzieren Sie das Strukturbild einer Kaskadenregelung. Wozu benutzt man sie, bzw. welche Eigenschaften besitzt sie?

b) Erläutern Sie (möglichst anhand einer Skizze) den Zusammenhang zwischen einem dominanten Polpaar und der Dämpfung, bzw. Eigenfrequenz des Systems.

c) Gegeben ist folgender Standardregelkreis:

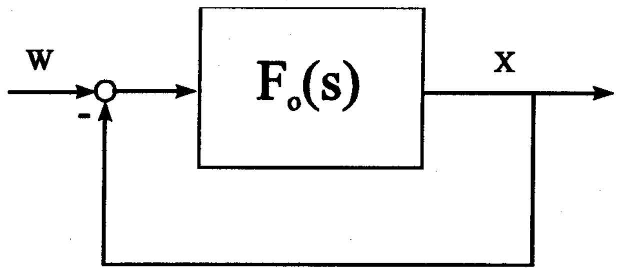


Abb. 5.1: Standardregelkreis

Gesucht ist die stationäre Regelabweichung für $w(t) = \sigma(t)$ ($\sigma(t)$: Einheitssprung). Was muß bei der Berechnung der stationären Regelabweichung unbedingt beachtet werden?

d) Gegeben sei folgende Strecke:

$$G(s) = \frac{1}{(s - 1)(s^2 + 6s + 13)}$$

Die Strecke soll mit einem P-Regler geregelt werden (Einheitsrückführung). Ermitteln Sie den Verstärkungsfaktor K_p des Reglers für den Fall, daß ein Pol des geschlossenen Regelkreises bei $s_1 = 0$ liegen soll.

1/6

Name: Matrikelnr.:

Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik
Regelungstechnik/Signaltheorie
Prof. Dr.-Ing. M. Pandit 20.03.1995

Diplomhauptprüfung im Fach Regelungstechnik I

Zugelassene Hilfsmittel:

Rechenschieber oder nichtprogrammierbarer Taschenrechner, Schreib- und Zeichenzeug. Das Mitbringen nichtzugelassener Hilfsmittel wie Schriftstücke oder lose Blätter oder programmierter Taschenrechner gilt als Täuschung und führt zur Nichtanerkennung der Klausur.

Zur Verfügung gestellte Hilfsmittel:

Phasenlineal, logarithmisches Papier (62,5 mm Einheit), Millimeterpapier, Schmierpapier.

Bitte beachten:

1) Schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer.

2) Die Berechnungen und Lösungen der Aufgaben sind im Anschluß an die Aufgabenstellungen in die Aufgabenblätter zu schreiben (auch Rückseite).

3) Lösungen und Berechnungen auf den Schmierblättern werden nicht bei der Korrektur berücksichtigt!

4) Schreiben Sie nicht mit Bleistift.

5) Geben Sie die bearbeitete Klausur und alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel in den Doppelbogen gehüllt ab.

6) Die Klausur muß wieder in **gehefteter** Form abgegeben werden!

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 1

Gegeben sind die Differentialgleichungen (Gl. 1.1 und Gl. 1.2) eines dynamischen Systems mit einer Eingangsgröße und zwei Ausgangsgrößen.

$$(M+m)\cdot\ddot{y} - m\cdot l\cdot\ddot{\alpha}\cdot\cos(\alpha) + m\cdot l\cdot\dot{\alpha}^2\cdot\sin(\alpha) = F \qquad (1.1)$$

$$-m\cdot l\cdot\ddot{y}\cdot\cos(\alpha) + m\cdot l^2\cdot\ddot{\alpha} - m\cdot g\cdot l\cdot\sin(\alpha) = 0 \qquad (1.2)$$

In Gl. 1.1 und Gl. 1.2 sind die Größen *M, m, g, l* feste Werte (Konstanten) des dynamischen Systems. Die Eingangsgröße des dynamischen Systems ist die Kraft *F*. Die Ausgangsgrößen des dynamischen Systems sind die Position *y* und der Winkel α.

a) Man linearisiere die Differentialgleichungen (Gl. 1.1 und Gl. 1.2) für den Arbeitspunkt $\alpha_0=0$ und $y_0=0$. Man ersetze hierzu die trigonometrischen Funktionen durch das erste Glied ihrer Taylor-Reihe. Weiterhin bestimme man die Zustandsdarstellung ausgehend von den linearisierten Differentialgleichungen und gebe die Matrizen $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$ an.

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A}\,\underline{x} + \underline{B}\,\underline{u}$$
$$\underline{y} = \underline{C}\,\underline{x} + \underline{D}\,\underline{u}$$

Man verwende hierzu die folgenden Zustandsgrößen:

$x_1 = y$, $x_2 = \alpha$, $x_3 = \dot{y}$, $x_4 = \dot{\alpha}$.

b) Ausgehend von der Zustandsdarstellung in Aufgabe a) ist das Strukturbild zu zeichnen. In das Strukturbild sind die Zustandsgrößen einzutragen.

Hinweis: Es gilt in der Umgebung von $\alpha_0=0$:

$$\dot{\alpha}^2\cdot\sin(\alpha) \approx 0$$

3/6

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 2

a) Für welche Werte n_1 und n_2 nach der folgenden Tabelle ist der Regelkreis in Abb. 2.1 für $k>0$ stationär genau und stabil ? Man beachte, daß in Abb. 2.1 eine konstante Störgröße $u_{stör}=const$ vorliegt. Bitte schreiben Sie in die folgende Tabelle jeweils **ja** oder **nein**. Die Antworten sind kurz zu begründen. Antworten ohne Begründung werden nicht anerkannt !

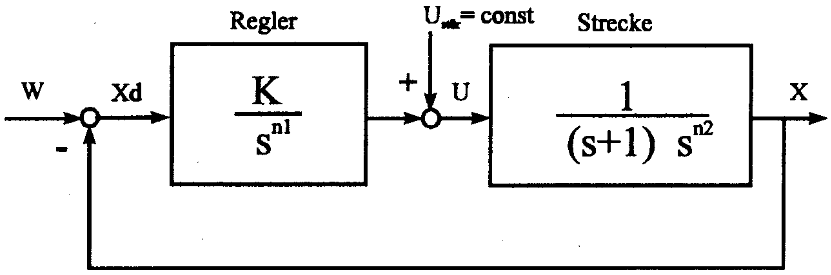


Abb. 2.1: Regelkreis mit verschiedenen Integrieren

n_1	n_2	stabil	stationär genau
0	0		
0	1		
0	2		
1	0		
1	1		

b) Man überprüfe mittels **Routh-Kriterium** die Stabilität des System mit der Übertragungsfunktion $G(s)$.

$$G(s) = \frac{s^2+2s+1}{s^5+s^4+10s^3+72s^2+152s+240}$$

4/6

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 3

Gegeben seien die beiden folgenden Übertragungsfunktionen $G_1(s)$ und $G_2(s)$ von Strecken

$$G_1(s) = 2 \cdot \frac{1 - T_1 \cdot s}{1 + T_1 \cdot s},$$

$$G_2(s) = 2 \cdot \frac{1 + T_1 \cdot s}{1 - T_1 \cdot s},$$

$$mit \qquad T_1 = 1s.$$

und jeweils ein *P*-Regler.

a) Sind die Übertragungsfunktionen $G_1(s)$ und $G_2(s)$ der Strecken stabil ?

b) Man skizziere die beiden Ortskurven der Frequenzgänge der korrigierten offenen Regelkreise. Man bestimme die Stabilitätsbereiche der Regelkreise in Abhängigkeit von der Verstärkung der *P*-Regler k_1, $k_2 > 0$. Verwenden Sie das Nyquist-Kriterium zur Begründung.

c) Man zeichne die Frequenzkennlinien der korrigierten offenen Regelkreise (Logarithmisches Papier verwenden). Man gebe mindestens 6 geeignete Phasenwerte für jeden Phasengang an.

d) Die Strecke habe nun die Übertragungsfunktion $G(s)=G_1(s)\cdot G_2(s)\cdot e^{-0.1\cdot s}$. Man bestimme für diesen Fall den Stabilitätsbereich des Regelkreises in Abhängigkeit von der Verstärkung des *P*-Reglers $k_3 > 0$.

5/6

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 4

Gegeben ist der Regelkreis in Abb. 4.1 bestehend aus einer Strecke und einem *P*-Regler mit *k*>0.

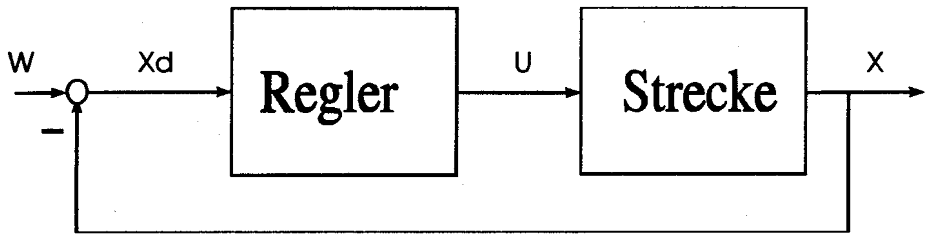


Abb. 4.1: Regelkreis

Die Übertragungsfunktion $G_s(s)$ der Strecke ist.

$$G_s(s) = \frac{1}{(s-2)\cdot(s^2+8\cdot s+32)}$$

a) Man skizziere die Wurzelortskurve des Regelkreises auf Millimeterpapier. Hierfür berechne man und gebe die folgenden Punkte an (falls existent):

- Asymptotenschnittpunkt
- Anstiegswinkel der Asymptoten
- Anstiegswinkel der Wurzelortskurven in den kritischen Stellen
- Schnittpunkte mit der imaginären Achse

b) Man bestimme den Stabilitätsbereich abhängig von der Reglerverstärkung *k* aus der Wurzelortskurve.

6/6

Name: Matrikelnr.:

Aufgabe 5

a) Was ist immer bei der Auswertung von Graphiken und Ergebnissen von *CAE*-Simulationen (z.B. DORA-PC) innerhalb der Regelungstechnik zu beachten? Nennen Sie hierzu stichwortartig mindestens drei Gründe.

b) Man erläutere möglichst kurz und anhand einer Skizze die Schwingversuch-Methode nach Ziegler-Nichols.

c) Was kann über die Richtigkeit der folgenden Aussagen gesagt werden ?
Die Antworten sind zu begründen; z.B. anhand eines geeigneten Beispiels oder Gegenbeispiels. Antworten ohne richtige Begründung werden nicht gewertet.

- c1) Die Stabilitätskriterien wie das Nyquist-Kriterium und das Wurzelortskurven-Verfahren sind für Regelkreise mit einem Sättigungsglied ohne Einschränkung direkt anwendbar. N
- c2) Stabile Regelkreise mit mindestens einem Integrierglied sind immer stationär genau. N
- c3) Das Nyquist-Kriterium (Ortskurven-Verfahren) ist nur bei Regelkreisen anwendbar deren offene Übertragungsfunktion $F_o(s)$ keine Pole mit positivem Realteil hat. N

d) Man gebe die Operationsverstärkerschaltung eines *PID*-Reglers und die Parameter K_p, K_i und K_d in Abhängigkeit der elektrischen Bauteile an.