DHBW Karlsruhe
Klausur Regelungstechnik

Tom P. Huck

Dezember 2022

Name:

Matrikelnummer:

Ergebnis:

Aufgabe	1	2	2	4	5	Σ
Punkte						

Beachten Sie folgende Hinweise:

- Die Klausur besteht aus fünf Aufgaben, in denen jeweils vier Punkte zu erreichen sind (d.h. 20 Punkte insgesamt).
- Bewertung: Für das Bestehen der Klausur (Note 4.0) sind fünf Punkte erforderlich. Für die Bestnote (1.0) sind mindestens 17 Punkte erforderlich. Dazwischen wird die Notenskala linear interpoliert.
- Die Bearbeitungszeit beträgt 60 Minuten.
- Schlagen Sie die Klausur nicht auf, bis der Prüfer Sie auffordert.
- Wenn Sie von der Teilnahme zurücktreten wollen, melden Sie sich bitte sofort. Sobald die Klausur aufgeschlagen ist, können Sie nicht mehr von der Teilnahme zurücktreten.
- Zu Beginn der Prüfung wird die Klausur durch den Prüfer verlesen. Nutzen Sie diese Zeit, um aufmerksam mitzulesen und sich Gedanken darüber zu machen, mit welchen Aufgaben Sie beginnen wollen.
- Die Vorleseszeit zählt nicht zur Bearbeitungszeit. Sie dürfen in dieser Zeit lediglich Ihren Namen und Matrikelnummer eintragen. Alle weiteren Bearbeitungen der Klausur sind untersagt, bis Prüfer den Beginn der Bearbeitungszeit ansagt.
- Verwenden Sie nur dokumentenechte Schreibgeräte. Rotstift und Bleistift sind nicht zugelassen.
- Außer Schreibmaterial sind keine Hilfsmittel zugelassen. Die Aufgaben sind so gestellt, dass sie ohne weitere Hilfsmittel gelöst werden können.

Aufgabe 1: Allgemeines

a) Skizzieren Sie die Grundstruktur einer Regelung als Blockschaltbild. Ihre Skizze sollte folgende Komponenten enthalten:

- Regler
- Sensor
- Regelstrecke
- Stellglied

Achten Sie auch auf die korrekte Anordnung der Komponenten und auf die Vorzeichen bei evtl. auftretenden Summationsgliedern!

Lösung: s. Vorlesungsfolien Kap. 0, Folie 11

2P

b) Was ist der wesentliche Unterschied zwischen einer Regelung und einer Steuerung?

Lösung: Eine Regelung verfügt im Unterschied zur Steuerung über eine Rückführung des Ist-Werts der Regelgröße sowie über einen Soll-Istwert-Vergleich.

1P

c) Welchen Nachteil hat eine Steuerung ggü. einer Regelung? Erklären Sie in 1-2 Sätzen, wodurch dieser Nachteil zustande kommt.

Lösung: Da eine Steuerung nicht über eine Rückführung verfügt, kann u.U. der Sollwert nicht genau erreicht werden (z.B. wenn Störgrößen auftreten oder das Verhalten des zu steuernden Systems nicht genau bekannt ist.

1P

Aufgabe 2: Systembeschreibung

a) Systeme werden in der Regelungstechnik häufig durch lineare, zeitinvariante Differentialgleichungen beschrieben. Erklären Sie kurz (jeweils 1-2 Sätze), was für eine DGL gelten muss, damit sie linear und zeitinvariant ist!

1P

Erklärung für linear:

Lösung: Die DGL darf nur aus einer Linearkombination von Eingangs- und Ausgangsgröße bzw. deren Ableitungen bestehen. *Alternativ wird auch eine Erklärung über das Superpositionsprinzip akzeptiert.*

Erklärung für zeitinvariant:

Lösung: Die Parameter der DGL müssen konstant sein und dürfen sich nicht mit der Zeit ändern.

b) Betrachten Sie nun folgende DGL:

$$T^2\ddot{y}(t) + 2dT \cdot \dot{y}(t) + y(t) = k \cdot u$$

wobei $u(t)$ die Eingangsgröße und $y(t)$ die Ausgangsgröße des Systems ist.

Systeme, die durch eine solche DGL beschrieben werden, haben in der Regelungstechnik einen bestimmten Namen. Nennen Sie diesen!

Lösung: PT_2-Glied, VZ_2-Glied oder Verzögerungsglied zweiter Ordnung.

0.5P

c) Berechnen Sie die Laplace-Übertragungsfunktion für die DGL aus Teilaufgabe b)!

Hinweis: Der Rechenweg soll erkennbar sein. Angabe der Übertragungsfunktion ohne Rechenweg ist nicht ausreichend!

Lösung:

$$T^2s^2Y(s) + 2dTsY(s) + Y(s) = kU(s)$$

$$Y(s)(T^2s^2 + 2dTs + 1) = kU(s)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{T^2s^2 + 2dTs + 1}$$

1.5P

d) Das System, welches durch die DGL aus Teilaufgabe b) beschrieben wird, weist folgende Sprungantwort auf:

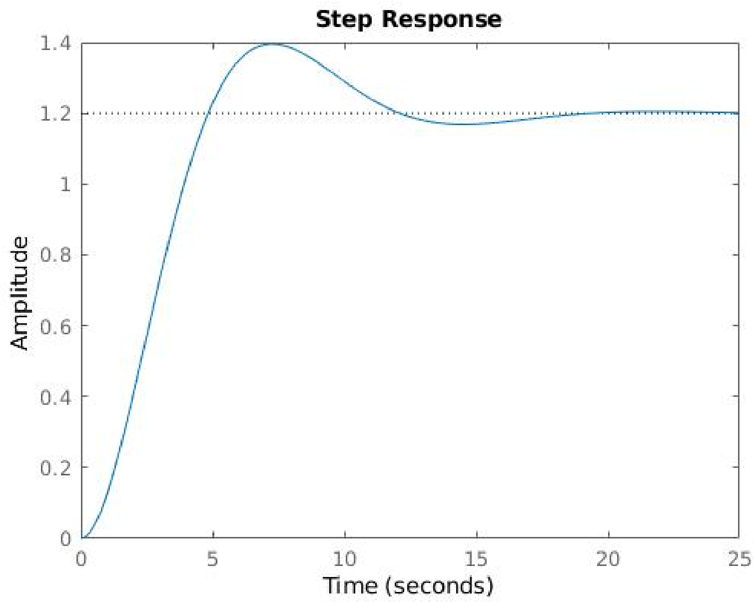


Figure 1: Sprungantwort

Welche Aussage können Sie aus dieser Sprungantwort für die Werte der Parameter k und d in der DGL treffen? Geben Sie exakte Werte an, wenn möglich. Wenn keine exakte Aussage möglich ist, geben Sie eine Abschätzung an (z.B. "größer als", "kleiner als").

Lösung: $k = 1.2$ (erkennbar an stationärerer Verstärkung), $d < 1$ (erkennbar an Schwingfähigkeit d. Systems).

1P

Aufgabe 3: Systemeigenschaften und Stabilität

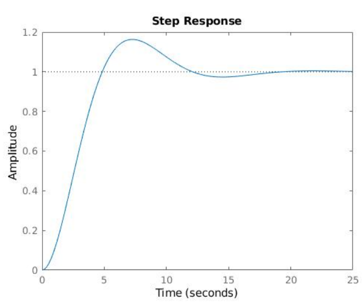
a) Geben Sie die Definition der BIBO-Stabilität an! Vervollständigen Sie hierzu folgenden Satz:

Ein System ist BIBO stabil, wenn...

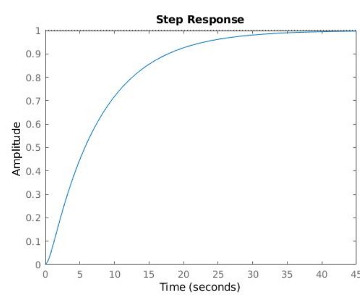
Lösung: Ein System ist BIBO-stabil, wenn es auf eine beschränkte Eingangsgröße immer mit einer beschränkten Eingangsgröße antwortet.

0.5P

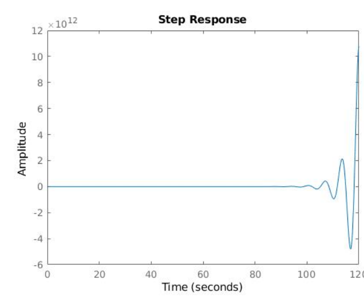
b) Im Folgenden sehen Sie drei Sprungantworten. In der Tabelle darunter sind drei Konfigurationen von Systempolen angegeben. Ordnen Sie jeder Polkonfiguration die passende Sprungantwort zu, indem Sie A, B oder C ankreuzen. Begründen Sie die Zuordnung. (Jede Zuordnung erfodert eine Begründung. Eine Zuordnung nach "Auschlussverfahren" gibt keine Punkte.)



(a) Sprungantwort A



(b) Sprungantwort B



(c) Sprungantwort C

Polkonfiguration	**A**	**B**	**C**	**Begründung**
$s_{12} = -0.375 \pm 0.3307j$	☐	☐	☐	
$s_1 = -1.866, s_2 = -0.134$	☐	☐	☐	
$s_{12} = 0.25 \pm 0.9682j$	☐	☐	☐	

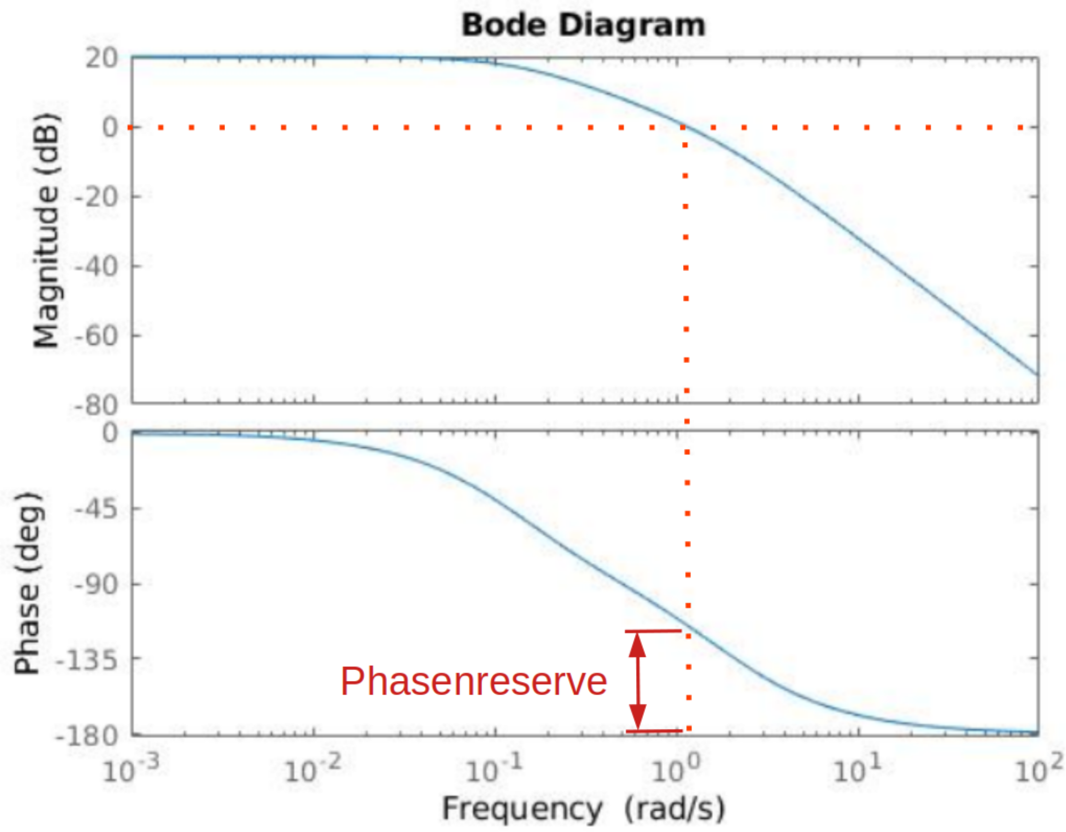
Lösung: 1: A, da Pole in der linken Halbebene und komplex-konjugiert $\rightarrow$ System ist stabil und schwingfähig.

2: B, da Pole in der linken Halbebene und nicht komplex-konjugiert $\rightarrow$ System ist stabil aber nicht schwingfähig.

3:: C, da Pole in der rechten Halbebene und komplex-konjugiert $\rightarrow$ System ist instabil und schwingfähig.

1.5P

c) Im Folgenden sehen Sie das Bode-Diagramm eines offenen Regelkreises. Zeichnen Sie die Phasenreserve ein! Was muss für die Phasenreserve gelten, dass der geschlossene Regelkreis stabil ist (bei Rückkopplung mit Verstärkungsfaktor 1)?



1P

Lösung: Zeichnung siehe Abbildung. Damit der Regelkreis stabil ist, muss die Phasenreserve >0 sein (bzw. die Phasenlage an der durchtrittsfrequenz muss über der -180 Grad- Linie liegen).

d) Das Hurwitzkriterium basiert auf der Berechnung der Unterdeterminanten der Hurwitzmatrix. Im mnachen Fällen erlaubt das Kriterium jedoch auch ohne Determinantenberechnung eine Stabilitätsaussage. Welche Fälle sind dies und welche Stabilitätsaussage gilt für diese Fälle?

Lösung: Eine direkte Stabilitätsaussage ohne Determinanten-berechnung ist in folgenden Fällen möglich:
Fall 1. Nach der Normierung treten Koeffizienten negativer Vorzeichen auf → System ist instabil;
2. Die Systemordnung ist max. 2 und die Koeff. sind positive → System ist:

1P

Aufgabe 4: Regler und Reglerentwurf

a) Betrachten Sie folgende Berechnungsvorschrift für einen Regler:

$$u(t) = K_P \left(e(t) + T_D \frac{d}{dt} e(t) + \frac{1}{T_V} \int_0^t e(\tau) d\tau \right)$$

hierbei ist $e(t)$ die Soll-Istwert-Abweichung (Regelfehler) und $u(t)$ die Stellgröße, die durch den Regler ausgegeben wird. Wie nennt man einen Regler dieser Art?

Lösung: PID-Regler

Zeichnen Sie ein Strukturdiagramm (Signalflussplan) dieses Reglers! Verwenden Sie dazu die aus der Vorlesung bekannten Blöcke Integrator, Proportionalverstärkung, Differenzierer und Summationsglied.

Lösung: siehe Kapitel 5, Folie 10

1.5P

b) Nehmen Sie an, Sie sollen auf einem Microcontroller eine Regelung programmieren. Der Regler soll folgender Berechnungsvorschrift folgen:

$$u(t) = 0.23 \cdot e(t) + 0.1 \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

hierbei ist $e(t)$ die Soll-Istwert-Abweichung (Regelfehler) und $u(t)$ die Stellgröße, die durch den Regler ausgegeben wird. Zur Implementierung des Reglers wird eine Funktion `control_output()`. Die Funktion erhält als Übergabeparameter die aktuelle Regelabeichung `e_now` sowie die Regelabweichung aus dem vorigen Zeitschritt `e_last`. Die Funktion soll den Wert der Stellgröße u zurückgeben. Der Abstand zwischen zwei Zeitschritten beträgt immer 10ms.

Schreiben Sie eine Funktion, um die oben beschriebene Berechnungsvorschrift zeitdiskret implementiert! Verwenden Sie C-Syntax oder C-ähnlichen Pseudocode. Nutzen Sie folgende Vorlage:

Lösung: Hier sind verschiedene Lösungen möglich. In jedem Fall sollte der Code aber folgendes enthalten:

- Die korrekte Berechnung der P-, und D- Anteile.
- Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass die Ableitung (D-Anteil) mit einem Differenzenquitienten approximiert wird, der die korrekte Abtastzeit verwendet.
- Ausserdem müssen die Regleranteile mit ihren Gewichtungsfaktoren multipliziert und schlussendlich zu u addiert werden.

1.5P

```
double control_output(double e_now, double e_last)
{









  return u;
}
```

Table 1: Lösungsvorlage zu Teilaufgabe (b)

c) Für folgende Regelstrecke soll ein PI-Regler entworfen werden:

$$G(s) = \frac{1}{4s^2 + 3s + 1}$$

Der Regler soll nach dem Betragsoptimum eingestellt werden. Berechnen Sie die entsprechende Übertragungsfunktion $R(s)$ für den Regler (Hinweis: Verwenden Sie die Tabelle im Anhang).

Lösung: Aus Tabelle entnehmen:

$$R(s) = \frac{r_0 + r_1 s}{2s}$$

$$r_0 = \frac{a_1^2 - a_0 a_2}{a_1 a_2 - a_0 a_3}$$

$$r_1 = a_1 \frac{a_1^2 - a_0 a_2}{a_1 a_2 - a_0 a_3} - a_0$$

Aus der Übertragungsfunktion lassen sich die Werte für a_i ablesen:

$$a_0 = 1, a_1 = 3, a_2 = 4, a_3 = 0$$

Einsetzen in Gleichungen aus Tabelle:

$$r_0 = \frac{3^3 - 1 \cdot 4}{3 \cdot 4 - 1 \cdot 0} = \frac{9}{12} = \frac{3}{4} = 0.75$$

$$r_1 = 3\frac{3^3 - 1 \cdot 4}{3 \cdot 4 - 1 \cdot 0} - 1 = 3 \cdot 0.75 - 1 = 1.25$$

Damit ergibt sich als Regler:

$$R(s) = \frac{0.75 + 1.25s}{2s}$$

.

1P

Aufgabe 5: Verschiedenes

a) Sie entwickeln ein Regelungssystem für einen Prozess in der Chemieindustrie. Die Parameter des Prozesses hangen dabei stark von der Qualität der verwendeten Rohstoffe ab. Die Rohstoffqualitat schwankt von Charge zu Charge. Eine Vorab-Untersuchung der Rohstoffe ist aus Zeitgründen nicht moglich, da die Rohstoffe schnell verarbeitet werden müssen. Sie wissen daher vor Beginn des Prozesses nicht, wie die Prozessparameter ausfallen. Sie kennen lediglich einen ungefähren Bereich, innerhalb dessen die Prozessparameter liegen konnen.

Sie haben in Kapitel 7 der Vorlesung verschiedene fortgeschrittene Regelungsverfahren kennengelernt. Welches dieser Verfahren würden Sie im hier beschriebenen Fall anwenden? Erklären Sie kurz das Wirkprinzip des von Ihnen gewählten Verfahrens! (Textuell in 2-3 Sätzen oder durch eine geeignete Skizze)

Lösung: Da die Parameter im voraus nicht bekannt sind, muss eine Anpassung des Reglerverhaltens zur Betriebszeit erfolgen. Hierzu dient die *adaptive Regelung*. Es kann entweder das wirkprinzip des MRAC-Verfahrens oder des MIAC-Verfahrens erklärt bzw. skizziert werden (beides wird akzeptiert). Siehe hierzu den Foliensatz zu Kapitel 7.

2P

b) Sie sollen die Parameter eines Systems identifizieren. Dazu wird eine Reihe von Messungen durchgeführt. Diese werden in folgender Matrixgleichung zusammengefasst:

$$\underline{y} = \underline{M} \cdot \underline{\theta}$$

Hierbei ist $\underline{M}$ eine Matrix aus Messwerten, $\underline{y}$ der Vektor der zugehörigen gemessenen Ausgangsgrößen, und $\underline{\theta}$ der Parametervektor.

Geben Sie im folgenden eine Formal an, mit der sich die Least-Squares Parameterschätzung $\underline{\hat{\theta}}$ aus $\underline{M}$ und $\underline{y}$ berechnen lässt:

$$\underline{\hat{\theta}} = (\underline{M} \cdot \underline{M}^T)^{-1} \cdot \underline{M}^T \cdot \underline{y}$$

Warum ist eine Lösung durch gewöhnliche Matrixinversion bei Problemen dieser Art meist nicht möglich?

Lösung: Weil es i.d.R. deutlich mehr Messungen als Parameter gibt. Somit ist das Gleichungssystem überbestimmt und die Matrix nicht mehr invertierbar.

1P

c) Für eine digitale Regelung soll ein analoges Messignal digital erfasst werden. Analysen haben ergeben, dass in diesem Signal Frequenzanteile von bis zu 20kHz vorkommen.

Wie groß muss gemäß Shannon-Theorem die Abtastfrequenz f_A mindestens sein, damit das gemessene Signal nach der Abtastung wieder ohne Informationsverlust rekonstruiert werden kann?

$$f_A \geq 2 \cdot f_{max} = 40kHz$$

Wie nennt man das Problem, welches auftreten kann, wenn die Abtastfrequenz zu klein ist?

Lösung: Aliasing/Alias-Effekt.

1P