

Systemdynamik und Regelungstechnik

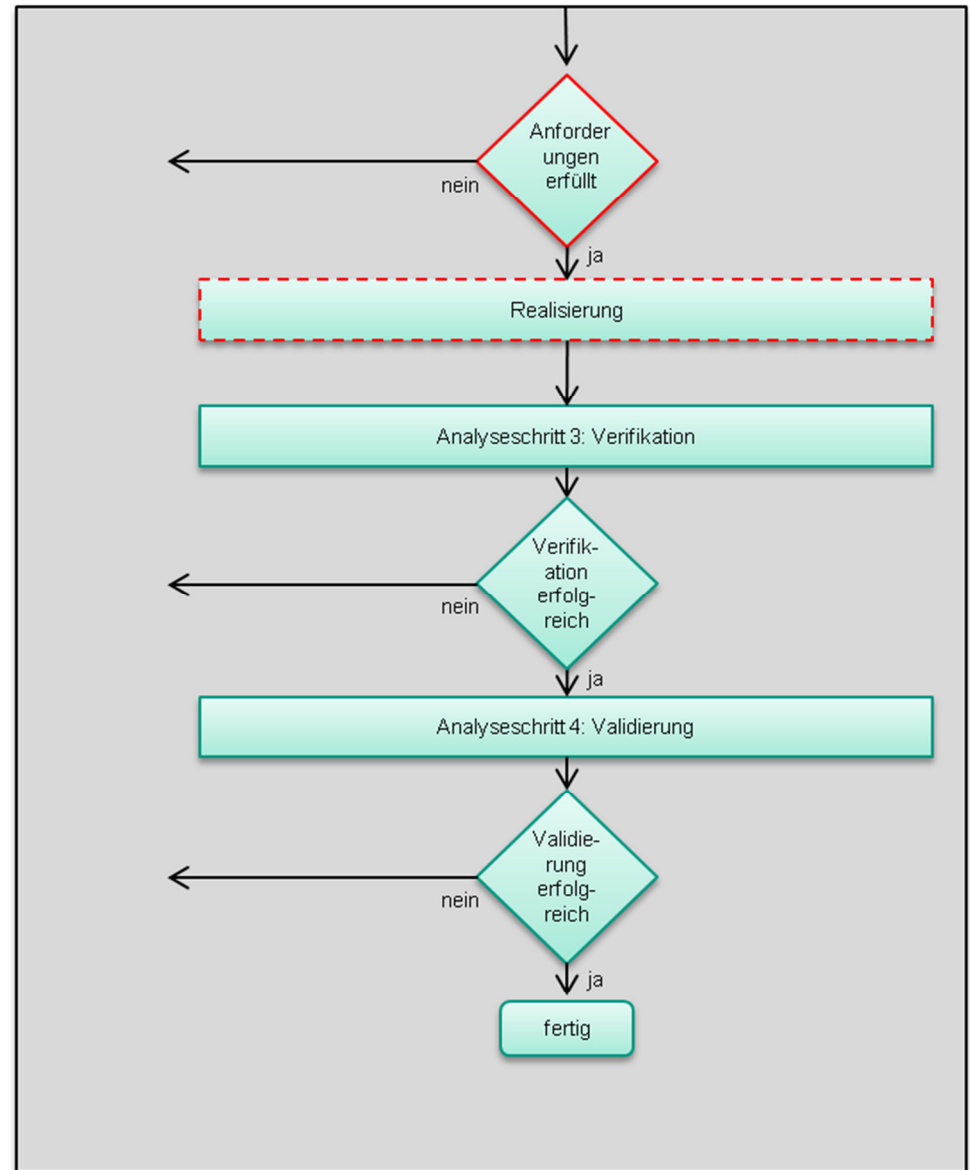
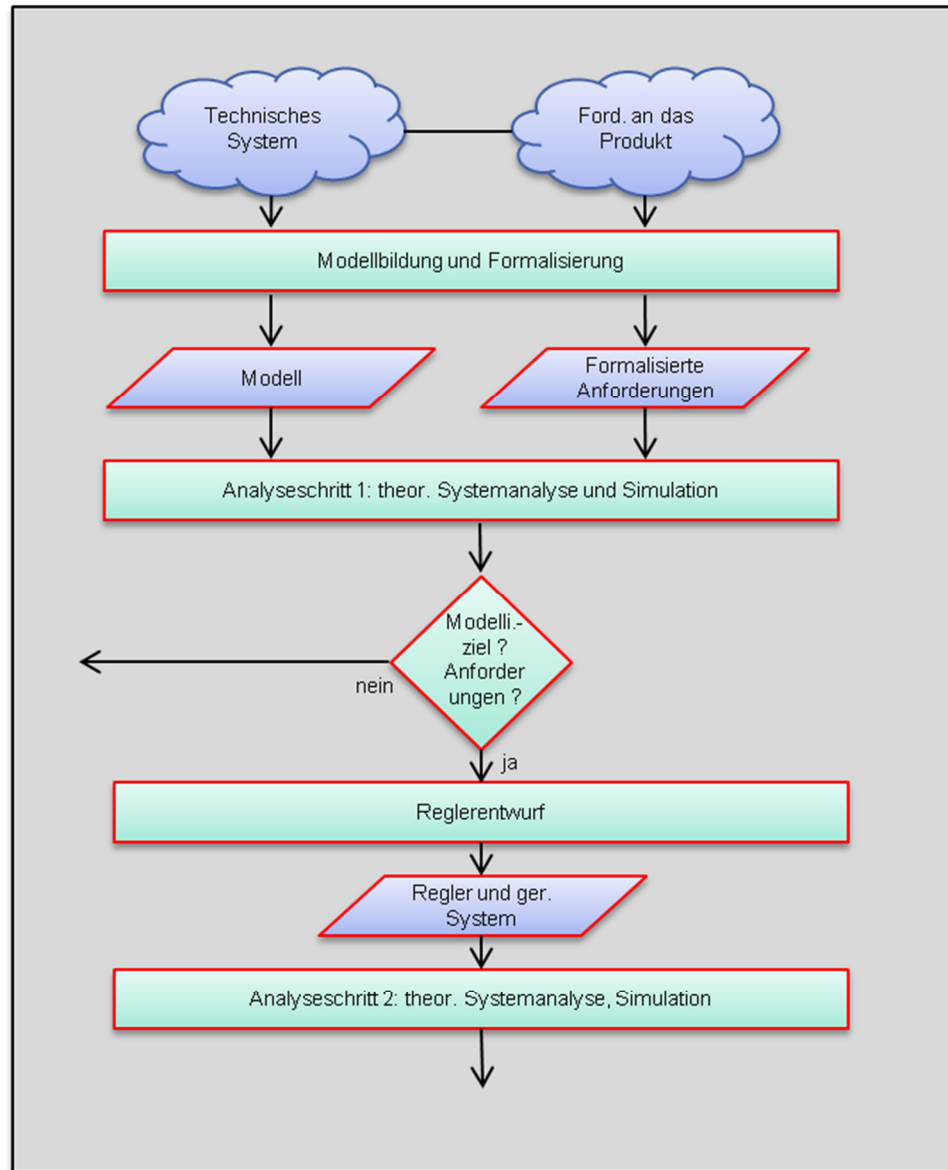
Übung 7: Parameteroptimierung

Lukas Kölsch, M. Sc.

INSTITUT FÜR REGELUNGS- UND STEUERUNGSSYSTEME (IRS)



Entwicklungsablauf für Regelungssysteme



Übung/Tutorium 7: Themen

Übung

Tutorium

Betragsoptimum

**Symmetrisches
Optimum**

**Minimale Quadratische
Regelfläche**

**Besprechung der
Evaluation**

Terminliche Änderungen

Juni 2018	Juli 2018
01 V11*	01
02	02 Tut 7
03	03 Ü8
04 Tut 3	04
05 Ü4	05 V18 + Modell- vorstellung
06	06 V19
07 V12	07
08 V13	08
09	09 Tut 8
10	10
11 Tut 4	11
12 Ü5	12 Ü9
13	13
14 V14	14
15 V15	15
16	16 Tut 9
17	17
18 Tut 5	18
19 Ü6	19
20	20
21 V16	21
22 V17	22
23	23
24	24
25 Tut 6	25
26	26
27	27
28 Ü7	28
29	29
30	30
	31 KLAUSUR

VL am 29.
Juni **entfällt**

**Sondertermin ab 13:00
Uhr, Neue Chemie mit
BPA und Prof. Kluwe (IRS)**

- Allgemeine
Studienberatung
- Infos zu den Master-
Studienmodellen 5 und
8

**Ab 17:30 Uhr im
Audimax-Foyer:**

- VDE-Modellberatungs-
abend

Ausblick

- **Übung 7 (heute):**
Parameteroptimierung
- **Übung 8 (Di, 03.07.2018):**
Vermaschte Reglerstrukturen,
Nähere Details zur Klausur
- **Übung 9 (Do, 12.07.2018):**
Digitale Regelkreise

Übersicht

1. Ohne explizites Gütekriterium

a) Direkte Verfahren

- Kompensation und perfekte Regelung
- Polvorgabe

b) Indirekte Verfahren

- Frequenzkennlinien
- Wurzelortskurve

c) Heuristische Parameter-einstellungen

- Ziegler-Nichols

2. Mit explizitem Gütekriterium

a) Parameteroptimierung, z.B.

- Min. Quadrat. Regelfläche

$$\int_0^{\infty} e^2(t) dt \rightarrow \text{Min}$$

- Betragsoptimum
- Symmetrisches Optimum

b) Strukturoptimierung

Entwurf von Optimalreglern

- Gegeben ist
 - Übertragungsfunktion der Strecke
 - Struktur der Regler
- Zu bestimmen ist
 - Koeffizienten der Regler-Übertragungsfunktion
- Wähle Parameter des Reglers so, dass ein bestimmtes Gütemaß J **minimal** wird
 - Parameteroptimierungsproblem
- Im Gegensatz dazu werden bei heuristischen Reglerentwurfsverfahren die Parameter „nach Erfahrung“ bzw. „nach Gefühl“ gewählt

$$F_O(s) = k_R \frac{Z(s)}{N(s)}$$

$$G_w(s) = \frac{k_R Z(s)}{k_R Z(s) + N(s)}$$

Betragsoptimum: Ansatz

■ Voraussetzungen:

■ Verzögerndes System: $G_S(s) = \frac{1}{a_0 + a_1s + \dots} = \frac{1}{A(s)}$

■ PI- oder PID-Regler: $G_R(s) = \frac{r_0 + r_1s + r_2s^2}{2s} = \frac{R(s)}{2s} \quad (r_0 \neq 0)$

■ Ziel:

$$F_w(j\omega) \stackrel{!}{=} 1 \text{ für alle } \omega$$

$$\Rightarrow |F_w(j\omega)| \stackrel{!}{=} 1 \text{ bzw. } |F_w(j\omega)|^2 = F_w(j\omega) \cdot F_w(-j\omega) = 1$$

- Ansatz: Koeffizienten r_i des Reglers so wählen, dass $|F_w(j\omega)| = 1$ in einem möglichst großen Bereich gilt

Betragsoptimum: Vorgehensweise



- Aus Streckenübertragungsfunktion die Nenner-Zeitkonstanten bestimmen
- Entscheiden, welcher Fall vorliegt (aus Tabelle) und Reglertyp wählen
- Reglerparameter gemäß Tabelle berechnen und Regler-ÜF aufstellen

Strecke $G(s)$	Regler $R(s)$	Einstellregeln
$\frac{1}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots}$	$PI: \frac{r_0 + r_1 s}{2s}$	$r_0 = a_0 \frac{a_1^2 - a_0 a_2}{a_1 a_2 - a_0 a_3} ; r_1 = a_1 \frac{a_1^2 - a_0 a_2}{a_1 a_2 - a_0 a_3} - a_0$
$\frac{K_S}{\prod_{v=1}^n (1 + T_v s)}$ mit einer großen Zeitkonstanten T_1 : $T_1 \gg T_\Sigma = \sum_{v=2}^n T_v$	$PI: K_{PI} \frac{1 + T_R s}{s}$	$K_{PI} = \frac{1}{2K_S T_\Sigma} ; T_R = T_1$
$\frac{K_S}{\prod_{v=1}^n (1 + T_v s)}$ mit zwei großen Zeitkonstanten T_1, T_2 : $T_1, T_2 \gg T_\Sigma = \sum_{v=3}^n T_v$	$PI: K_{PI} \frac{1 + T_R s}{s}$	$K_{PI} = \frac{1}{2K_S} \frac{T_1^2 + T_1 T_2 + T_2^2}{(T_1 + T_2) T_1 T_2}$ $T_R = \frac{(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{T_1^2 + T_1 T_2 + T_2^2}$

→ siehe
Formelsammlung 😊

Betragsoptimum: Bewertung des Verfahrens

- Typisches Einsatzgebiet: elektrische Regelung
- Relativ strenge Anforderungen an die Strecke
- Verursacht häufig sehr stark gedämpfte Führungssprungantworten
- Stabilitätsprobleme bei nichtreellen Streckenpolen
- Herleitung aus $F_w(j\omega) \rightarrow$ zielt primär auf gutes Führungsverhalten

Symmetrisches Optimum: Ansatz

■ Voraussetzungen:

- Verzögerndes System
- Reelle Streckenpole
- Aufteilung in eindeutig große und eindeutig kleine Zeitkonstanten
- Insgesamt:

$$G(s) = \frac{K_S}{\prod_{v=1}^n (1+T_v s) \prod_{\mu=1}^m (1+\tau_{\mu} s)}$$

$$\text{mit } T_v \gg \sum_{\mu=1}^m \tau_{\mu} \quad v = 1, \dots, n$$

■ Ziel:

$$|F_w(j\omega)| \stackrel{!}{=} 1 \text{ bzw. } |F_w(j\omega)|^2 = F_w(j\omega) \cdot F_w(-j\omega) = 1$$

■ Ansatz:

- Vereinfachen von $F_o(j\omega)$
- Koeffizienten r_i des Reglers so wählen, dass $|G_w(j\omega)| = 1$ in einem möglichst großen Bereich gilt

Symmetrisches Optimum: Vorgehensweise



- Aus Streckenübertragungsfunktion die Nenner-Zeitkonstanten bestimmen
- Entscheiden, welcher Fall vorliegt (aus Tabelle) und Reglertyp wählen
- Reglerparameter gemäß Tabelle berechnen und Regler-ÜF aufstellen

Strecke $G(s)$	Regler $G_R(s)$	Einstellregeln
Allgemeiner Fall $\frac{K_S}{\prod_{v=1}^n (1 + T_v s) \prod_{\mu=1}^m (1 + \tau_\mu s)}$ $T_v \gg T_\Sigma = \sum_{\mu=1}^m \tau_\mu \quad v = 1, \dots, n$	$\frac{K_R}{s} (1 + T_R s)^n$	$T_R = 4nT_\Sigma$ $K_R = \frac{1}{2K_S T_\Sigma} \frac{\prod_{v=1}^n T_v}{(4nT_\Sigma)^n}$
1 große Zeitkonstante $\frac{K_S}{(1 + T_1 s) \prod_{\mu=1}^m (1 + \tau_\mu s)}$ $T_1 \gg T_\Sigma = \sum_{\mu=1}^m \tau_\mu$	PI-Regler $\frac{K_R}{s} (1 + T_R s)$	$T_R = 4T_\Sigma$ $K_R = \frac{T_1}{8K_S T_\Sigma^2}$
2 große Zeitkonstanten $\frac{K_S}{\prod_{v=1}^2 (1 + T_v s) \prod_{\mu=1}^m (1 + \tau_\mu s)}$ $T_1, T_2 \gg T_\Sigma = \sum_{\mu=1}^m \tau_\mu$	PID-Regler $\frac{K_R}{s} (1 + T_R s)^2$	$T_R = 8T_\Sigma$ $K_R = \frac{T_1 T_2}{128K_S T_\Sigma^3}$

→ siehe Formelsammlung 😊

Symmetrisches Optimum: Bewertung des Verfahrens

- Typisches Einsatzgebiet: Antriebstechnik
- An noch mehr Annahmen gebunden als das Betragsoptimum
- Einstellregeln selbst sind jedoch weniger kompliziert als beim Betragsoptimum → in der Praxis weit verbreitet
- Geringere Dämpfung als beim Betragsoptimum
 - Folge: Schnelleres Einschwingen bei Sprunganregung
 - Siehe **Aufgabe 46 (TU)** nächste Woche
- Wird aufgrund der geringeren Dämpfung gerne für die Ausregelung von Störungen verwendet

Minimale Quadratische Regelfläche: Ansatz

■ Voraussetzungen

- Regler- und Strecken-Übertragungsfunktionen sind rational
- Für $F_o(s)$ gilt: Zählergrad < Nennergrad

■ Ziel:

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

soll minimal werden

■ Ansatz:

- Bilde $E(s)$ (gebrochenrationales Polynom) in Abhängigkeit der Regler- und Streckenparameter
- Parsevalsche Gleichung: Integral über $e^2(t)$ lässt sich durch ein Integral über $E^2(s)$ ausdrücken
- Berechnung des Integrals über $E^2(s)$ mithilfe des Residuensatzes

Minimale Quadratische Regelfläche: Vorgehensweise



- Gewünschten Reglertyp für $G_R(s)$ auswählen
- Berechnung von $F_o(s) = G_R(s) \cdot G_S(s)$
- Berechnung von $E(s) = \frac{1}{1+F_o(s)} \cdot \frac{1}{s} = \frac{c_0+c_1s+\dots+c_{n-1}s^{n-1}}{d_0+d_1s+\dots+c_ns^n} = \frac{C(s)}{D(s)}$
- Ablesen des Gütemaßes J_n aus der Formelsammlung

$$J_1 = \frac{c_0^2}{2d_0d_1}$$

$$J_2 = \frac{c_1^2d_0 + c_0^2d_2}{2d_0d_1d_2}$$

$$J_3 = \frac{c_2^2d_0d_1 + (c_1^2 - 2c_0c_2)d_0d_3 + c_0^2d_2d_3}{2d_0d_3(d_1d_2 - d_0d_3)}$$

$$J_4 = \frac{c_3^2(d_0d_1d_2 - d_0^2d_3) + (c_2^2 - 2c_1c_3)d_0d_1d_4 + (c_1^2 - 2c_0c_2)d_0d_3d_4 + c_0^2(d_2d_3d_4 - d_1d_4^2)}{2d_0d_4(d_1d_2d_3 - d_0d_3^2 - d_1^2d_4)}$$

- Minimierung von J_n
 - Finden derjenigen Parameter c_i und d_j , für die J_n minimal wird
 - Notwendige Bedingung hierfür: $\text{grad } J_n = 0$

Minimale Quadratische Regelfläche: Bewertung des Verfahrens

- Kann für fast jede Art von Strecke $G_S(s)$ verwendet werden
- Robuster Regler (unempfindlich gegenüber Parameterschwankungen)
- Wenig stör anfällig
- Auch alternative Gütemaße J (oder Kombinationen davon) sind denkbar
- Mathematisch sehr gut zu formalisieren, allerdings schwer mit regelungstechnischen Entwurfsforderungen in Einklang zu bringen
- Mithilfe der MQR entworfene Regler neigen zu sehr starken Stellgliederauslenkungen

Aufgabe 44 (TRUE)

b)
$$G_S(s) = \frac{a}{1+b_1rs+b_2r^3s^2}$$

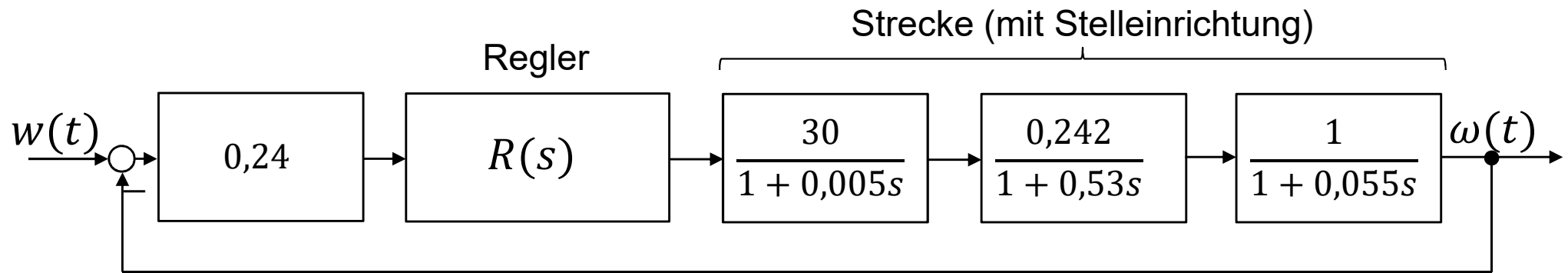
PI-Regler nach dem Betragsoptimum:
Aus Formelsammlung folgt:

$$r_0 = \frac{b_1^2 - b_2r}{ab_1b_2r^2}$$

$$r_1 = \frac{b_1^2 - 2b_2r}{ab_2r}$$

$$R(s) = \frac{(b_1^2 - b_2r) + b_1r(b_1^2 - 2b_2r)s}{2ab_1b_2r^2s}$$

Aufgabe 45 (UE)



$$G_S(s) = \frac{1,74}{(1 + 0,005s)(1 + 0,53s)(1 + 0,055s)}$$

- Reglerentwurf nach Betragsoptimum, Symmetrischem Optimum und Minimaler Quadratischer Regelfläche
- Vergleich der Entwurfsverfahren hinsichtlich des Führungsverhaltens

Aufgabe 45 (UE)

b)
$$R(s) = 4,789 \cdot \frac{1+0,53s}{s}$$

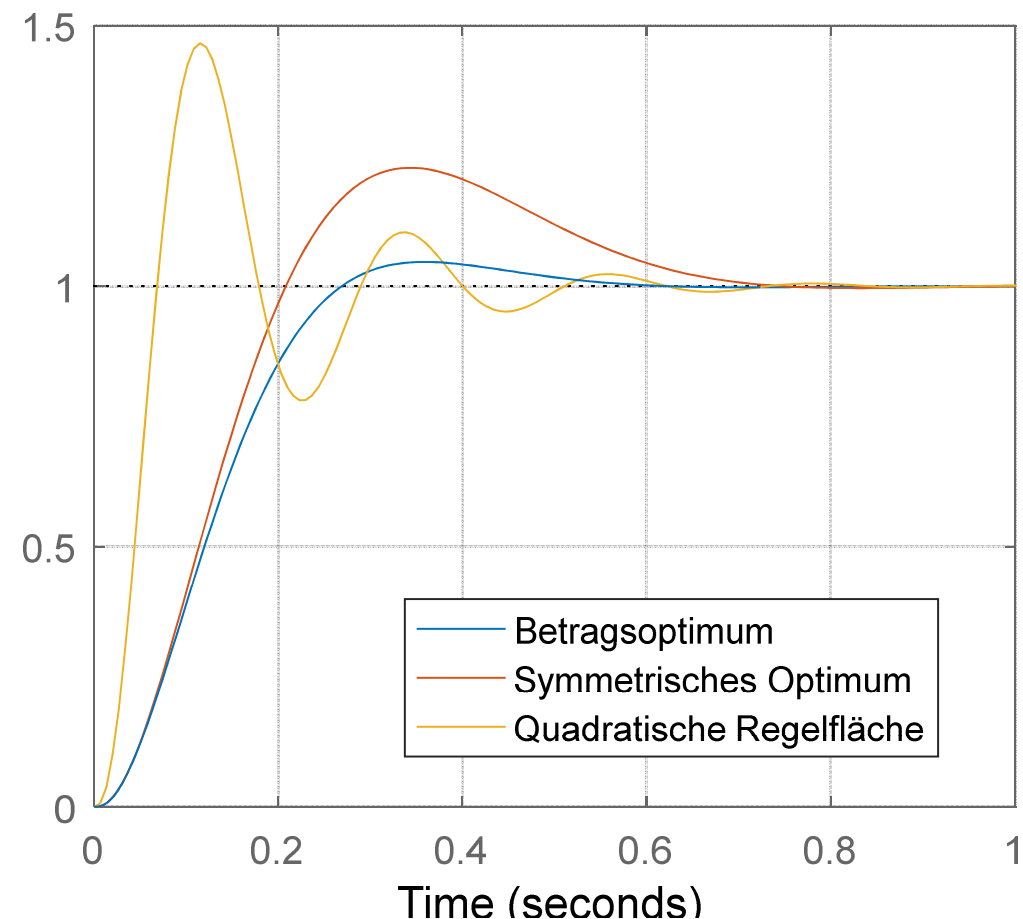
c)
$$R(s) = 10,6 \cdot \frac{1+0,24s}{s}$$

d)
$$R(s) = 27,15 \cdot \frac{1+0,53s}{s}$$

Aufgabe 45 (UE)

d)

- **Betragsoptimum:** sehr stark gedämpft, kaum Überschwinger
- **Symmetrisches Optimum:** mäßig gedämpft, relativ starker Überschwinger
- **MQR:** schwach gedämpft, sehr starke Überschwinger



Zusammenfassung der Evaluation zur SRT-Übung SS 2018

1. Zusammenhängendes, ausführliches Übungsskript / Musterlösungen sind zu kurz gehalten
2. Gute Erklärungen, Zusammenfassungen sind hilfreich
3. Linkshänder, wuhu!
4. Lösungen früher hochladen
5. Bitte pünktlich Schluss machen
6. Lösungen/ Informationen zu verteilt
7. Mehr Praxisbeispiele
8. Bitte nur die mittige und rechte Tafel verwenden
9. Die Veranstaltung sollte mehr ECTS bringen
10. Bitte pünktlich anfangen
11. Sehr gute Beispiele
12. Trinken wir ein Kölsch zusammen? ☺
13. Auflage ergibt bei meinem Mastermodell keinen Sinn, sehr viel Lernaufwand ohne Nutzen
14. Dozent motiviert und engagiert
15. Auf den Übungsfolien und Lösungen steht wenig. Das animiert zum Nacharbeiten und Mitschreiben
16. Bitte kürzere Sätze
17. Bitte Aufgaben vollständig machen, aber dafür das Tempo allgemein anziehen
18. An der Tafel mehr Zwischenschritte, teilweise fallen die Lösungen vom Himmel