

DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

Maximilian Gaukler

Lehrstuhl für Regelungstechnik

Sommersemester 2019



DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

Regelungstechnik und Signalverarbeitung

Maximilian Gaukler

Lehrstuhl für Regelungstechnik

Sommersemester 2019



Regelungen im Alltag

- Heizungsthermostat
- Hafenkran
- Segway
- Quadrocopter

Aber auch:

- Körpertemperatur
- Räuber-Beute-Population
- Kindererziehung
- „Rückmeldung berücksichtigen“ → Evaluation von Lehrveranstaltungen



Regelungstechnik

Die Aufgabe der Regelungstechnik ist, ein **dynamisches System** so zu **beeinflussen**, dass sich ein **gewünschtes Verhalten** einstellt.

- **Dynamisches System** — *Raum mit Heizung*
 - zeitlich veränderliche Größen (Signale) — *Temperatur, Ventilstellung, ...*
 - Dynamik: Verhalten hängt auch von der Vorgeschichte ab (z. B. Trägheit)
— *Raum erwärmt sich langsam*
- **Beeinflussen**
 - Stelleingriff — *Ventil am Heizkörper*
 - dafür meist Messung notwendig — *Temperaturfühler*
- **gewünschtes Verhalten**
 - Störungen unterdrücken — *Sonneneinstrahlung*
 - Sollverlauf folgen — *gewünschte Temperatur*
 - nicht schwingen — *Temperaturschwankung*
 - ...



Fragestellungen

- Was ist prinzipiell möglich?
- Wie beschreibe ich das System?
- Wie bestimme ich das Stellsignal?
- Wie implementiere ich die Regelung auf einem EZS?
- Und wo fange ich überhaupt an?

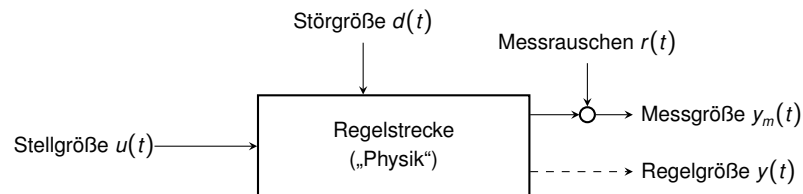


Gliederung

- 1 Einleitung
- 2 Grundbegriffe
- 3 Regelungsentwurf
- 4 Digitaler Regelkreis
- 5 Signalverarbeitung
- 6 Zusammenfassung und Ausblick
- 7 Übungsaufgabe



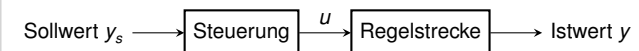
Größen



- Stellgröße u (einzige Einflussmöglichkeit)
- Regelgröße y (Istwert)
 - Vorgabe: $y \approx y_s$ (Sollwert)
 - Messgröße y_m (Sensor), oft $= y$
- Problem: Störgröße d
- Ungünstige Festlegung von u, y, y_m kann den Entwurf erschweren oder unmöglich machen!
 - Auswahl und Platzierung der Sensoren und Aktoren ist kritisch!
 - Möglichst direkt eingreifen und messen



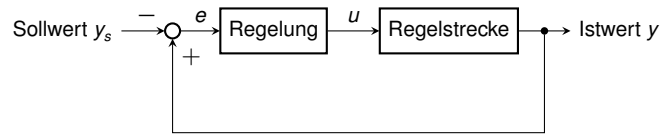
Steuerung



- genauer: **Steuerung in der offenen Kette** (engl. *open-loop control*)
- (Annahme: keine Störung)
- Bestimme Eingriff (Stellgröße u) für gewünschtes y anhand eines Modells
- „im Blindflug“, ohne Messung!
- folgt **exakt** dem geplanten Verlauf (sofern physikalisch möglich)
- funktioniert auch für messbare Störung → Störaufschaltung
- kann nur auf **bekannte** Störungen reagieren



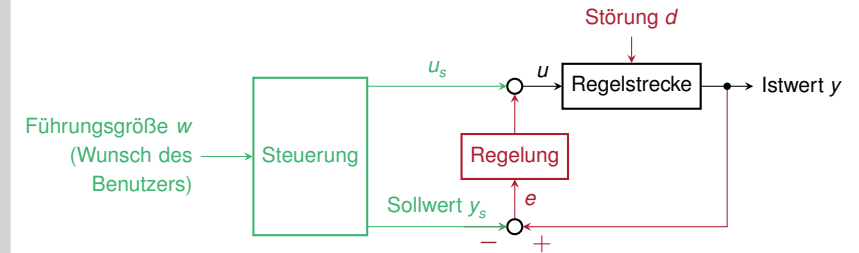
Regelung



- Vergleich von Soll- und Istwert: Fehler $e = y - y_s$
- Rückführung des Fehlers auf das Stellsignal
- geschlossener Regelkreis (engl. *closed-loop control*)
- kompensiert auch unbekannte Störungen
- kann erst wirken, wenn eine Abweichung (Fehler) aufgetreten ist
- Neue Dynamik durch Rückführung — kann instabil werden!



Zwei-Freiheitsgrade-Struktur



- Steuerung für alles Bekannte
- Regelung für verbleibende Abweichungen
- Trick: Steuerung erzeugt „simulierten“ Sollverlauf y_s , passend zu u_s . Benutzer-Vorgabe w wird gefiltert, damit realisierbar.
- Regelung wird nur aktiv, wenn System davon abweicht



Gliederung

- 1 Einleitung
- 2 Grundbegriffe
- 3 Regelungsentwurf
- 4 Digitaler Regelkreis
- 5 Signalverarbeitung
- 6 Zusammenfassung und Ausblick
- 7 Übungsaufgabe



Vorgehensweise

- Ziele festlegen
- Wahl von Stellgröße, Messgröße, Regelgröße
- modellgestütztes Vorgehen:
 - 1 Modellbildung → Vereinfachung
 - 2 Modellparameter bestimmen
 - 3 Analyse des Systemverhaltens
 - 4 Entwurf des Reglers
 - 5 Analyse und Simulation: Ziele erreicht?
- alternativ: Reglereinstellung durch „Probieren“ am echten System
- Realisierung auf Digitalrechner
- Iterativ, ggf. Problemstellung anpassen (Sensorik, Aktorik, Konstruktion)



Ziele des Reglerentwurfs

- Stabilität (kein Aufschwingen)
- Dynamik ändern (Schnelligkeit, Überschwinger, Komfort)
- Sollwert (bzw. -verlauf) folgen
- Störungen ausgleichen
- geringes Stellsignal (Begrenzungen!)
- Robust gegen Modellunsicherheiten
- Unempfindlich gegenüber Messrauschen



Modellbildung

- Elektrotechnik, Maschinenbau, sonstige Physik, (Biologie, Wirtschaft, ...)
- i. d. R. zeitinvariante Differentialgleichungen: $f(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, u, \dot{u}, \ddot{u}, \dots) = 0$
- Zustandsform („Zustandsraumdarstellung“)

$$\dot{x} = f(x, u, d) \quad (1)$$

$$y = g(x, u) \quad (2)$$

- Zustandsvektor $x \in \mathbb{R}^n$ = „Füllstand der Energiespeicher“
- Zustände können nicht springen (Position, Geschwindigkeit, ...)
- Wahl des Zustandsvektors nicht eindeutig
→ Zustandstransformation, z. B. $\tilde{x} = Tx$, wobei $T \in \mathbb{R}^{n \times n}$ und $\det T \neq 0$
- Strukturbild („Blockschaltbild“): Signalfluss, Blöcke rückwirkungsfrei



Modellvereinfachung

Essentially, all models are wrong, but some are useful. — G. Box

- So einfach wie möglich, so genau wie nötig!
- unwichtige Effekte ignorieren
 - je nach Anwendung z.B.: Reibung, Corioliskraft, Mondphase, ...
- Betriebspunkt-Linearisierung
 - Taylorreihe, Abbruch nach linearem Term: $f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0) \cdot (x - x_0)$
 - lineare Systeme sind schön: umfangreiche und anschauliche Theorie
 - Das Ergebnis muss nicht unbedingt auf dem echten System funktionieren



Beispiel Modellbildung: inverses Pendel

(Platz für Tafelanschrieb)



Steuerungsentwurf

- Sollverlauf muss realisierbar sein
- z.B. Stetigkeit entsprechend der Dynamik
- Ansatz 1: Vorgabe der höchsten Ableitung
 - Fachbegriff: flachheitsbasierte Vorsteuerung
- Ansatz 2: Führungsfilter + Inverses System
 - gewünschten Verlauf glätten
 - Tiefpass r-ter Ordnung – sodass Sollverlauf r-mal differenzierbar ist
 - dazu u rechnerisch bestimmen
- Ansatz 3: Verzicht auf Steuerung
 - „Was solls, soll doch der Regler machen“
 - Ein-Freiheitsgrade-Struktur
 - → Führungs- und Störverhalten nicht getrennt einstellbar
(↯ komfortabler Sollwert-Übergang versus schnelle Störbekämpfung)



Reglerentwurf

- gegeben:
 - (linearisiertes) Modell der Strecke
- gesucht:
 - Regler, der die gewünschten Eigenschaften erfüllt
- Voraussetzung: Stabilisier- bzw. Steuerbarkeit („ausreichend“ Aktoren)
- Auswahl des Entwurfsverfahrens
 - Struktur: z.B. PID-Regler, beobachterbasierte Zustandsrückführung, Optimalreglerentwurf
 - Methodik: Frequenzbereich (Frequenzgang, Polynome), Zeitbereich (insb. Zustandsraum, Matrizen)
 - hier nicht im Detail → weiterführende Vorlesungen am LRT



Zweipunktregler

- Einfachster praxistauglicher Regler, z. B. Temperaturregelung:

```
ist = lese_sensor();  
soll = 20;  
hysterese = 5;  
if (ist > soll + hysterese) {  
    heizung_aus();  
} elseif (ist < soll - hysterese) {  
    heizung_an();  
} else {  
    // behalte alten Zustand bei  
}
```

- Einschalten bei 15, Ausschalten bei 25 Grad
- Hysterese („Trägheit“) gegen zu häufiges An-/Ausschalten
- erfordert Messrauschen $\ll$ Hysterese



PID-Regler

- Standardregler mit drei Parametern

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3)$$

- Proportional-, Integral-, Differential-Anteil
- oft auch nur P oder PI
- I-Anteil kann „weglaufen“ → Begrenzen
- D-Anteil problematisch (Messrauschen, Realisierbarkeit) → Filterung
- empirisches Einstellvorgehen
 - Start: $K_p = K_i = K_d = 0$
 - Erst P, dann I, dann ggf. D einstellen
 - Soweit erhöhen bis Verhalten gut genug, aber noch keine Instabilität
 - funktioniert oft, aber nicht immer



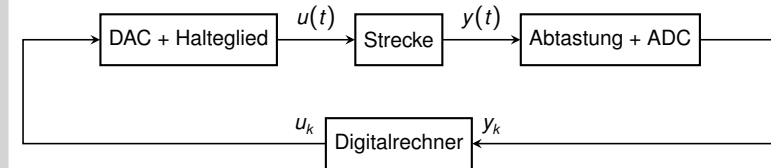
Gliederung

- 1 Einleitung
- 2 Grundbegriffe
- 3 Regelungsentwurf
- 4 Digitaler Regelkreis**
- 5 Signalverarbeitung
- 6 Zusammenfassung und Ausblick
- 7 Übungsaufgabe



Digitaler Regelkreis

- Definition:
 - diskret: abzählbar ($k \in \{1, 2, 3, 4, \dots\}$)
 - kontinuierlich: unendlich fein ($t \in \mathbb{R}$)
- Strecke analog (wertkontinuierlich) und zeitkontinuierlich
- Rechner digital (wertdiskret) und zeitdiskret
- Umsetzung mit ADC/DAC in festem Takt (Zeitraster $t_k = kT_s$)



Digitaler Regelkreis (2)

- feste Periodendauer T_s (oft auch T oder h genannt)
$$u_k = u(kT_s), \quad y_k = y(kT_s), \quad \dots, \quad k \in \mathbb{N} \quad (4)$$
- Verzögerungen (Latenzen, Jitter) vernachlässigt
- endliche Rechengenauigkeit: typischerweise vernachlässigbar, weil Datenraten gering und Auflösung hoch.
- Zeitdiskretisierung: Umrechnung zeitkontinuierlich $\rightarrow$ zeitdiskret
 - z. B. Euler-Verfahren: $\dot{x} = f(x) \rightarrow x_{k+1} \approx x_k + T_s \cdot f(x_k)$
 - Für lineare Systeme exakt möglich ($\rightarrow$ Matrixexponentialfunktion)
- zeitdiskreter PID-Regler:

$$u_k = K_p e_k + K_i T_s \left(\sum_{j=0}^k e_j \right) + K_d \frac{e_k - e_{k-1}}{T_s} \quad (5)$$



Gliederung

- 1 Einleitung
- 2 Grundbegriffe
- 3 Regelungsentwurf
- 4 Digitaler Regelkreis
- 5 Signalverarbeitung**
- 6 Zusammenfassung und Ausblick
- 7 Übungsaufgabe



Filter und Beobachter

- Regelgröße oft nicht messbar, oder stark verrauscht
- naiver Ansatz: Filter (hier: Eingang u , Ausgang y)
 - zeitkontinuierlicher Tiefpass 1. Ordnung (PT1-Glied)

$$\dot{y} = (u - y) / T_{TP} \quad (6)$$

T_{TP} : Zeitkonstante (1/Grenzfrequenz)

- zeitdiskreter Tiefpass 1. Ordnung:

$$y_{k+1} = \alpha y_k + (1 - \alpha) u_k, \quad \alpha = \exp(-T_s / T_{TP}) \in (0, 1] \quad (7)$$

- „Hochpass = 1–Tiefpass“: $y_{HP} = y - y_{TP}$ und Umformen
- Integral $\approx \sum u_j \cdot T_s$
- Ableitung $\approx (u_{k+1} - u_k) / T_s$ (Problem: Messrauschen!)

- Beobachter zur Rekonstruktion des vollständigen Zustands



Beobachter (linear)

- gegeben: Systemmodell in Matrixschreibweise

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (8)$$

$$y_k = Cx_k \quad (9)$$

- gesucht: Zustand x_k aus Messung y_k , obwohl nur teilweise messbar
- Bedeutung: „virtueller Sensor“
- Beobachter = Simulation + Korrektur anhand Messwert

$$\hat{x}_{k+1} = A\hat{x}_k + Bu_k + L(y_k - \hat{y}_k) \quad (10)$$

$$\hat{y}_k = C\hat{x}_k \quad (11)$$

- Bei korrekter Wahl der Rückführmatrix L gilt $\hat{x}_k - x_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$
- $\hat{x}_k$ ist eine Rekonstruktion des echten Zustands!



Beobachter (2)

- Voraussetzung: Beobachtbarkeit („ausreichende“ Sensoren)
- *Abwägung: Messrauschen versus Schnelligkeit*
 - Messrauschen bewirkt Fehler in $y \leadsto L$ klein wählen
 - Störung/Modellfehler bewirkt Abweichung von $x \leadsto L$ groß wählen ζ
- Problem: Sensor-ungenauigkeit
 - Kritisch: Offset — nicht von konstantem Messwert zu unterscheiden
→ ggf. mit modellieren und schätzen
 - Skalierungsfehler, Drift, ...
- Diese Aussagen gelten ebenso bei Filterung!
- Ausblick: weitere Entwurfsmethoden
 - Kalman-Filter: stochastisch optimal für geg. Mess- und Modellrauschen
 - Erweiterungen für nichtlineare Systeme



Gliederung

- 1 Einleitung
- 2 Grundbegriffe
- 3 Regelungsentwurf
- 4 Digitaler Regelkreis
- 5 Signalverarbeitung
- 6 Zusammenfassung und Ausblick
- 7 Übungsaufgabe



Zusammenfassung

- Regelungstechnik: Beeinflussung dynamischer Systeme
- Steuerung: „Blindflug“, aber trotzdem nützlich
- Regelung: Geschlossene Schleife über Sensor → Regler → Aktor
- Systematisches, modellbasiertes Entwurfsvorgehen hilfreich
- Umsetzung auf Digitalrechner in festem Zeitraster



Ausblick

- Vorlesungen am LRT
 - Basis: Einführung in die RT (insb. für MB, CE, Energietechnik)
oder: (Signale und Systeme 1+2) → RT A → RT B: Zustandsraummethoden
 - Praktikum für Einsteiger (nach ERT oder RTA): Praktikum Regelungstechnik 1
 - Vertiefend:
 - Digitale Regelung
 - Modellbildung in der Regelungstechnik
 - [Modellprädiktive Regelung](#), Optimalsteuerung
 - Regelung nichtlin. Sys.
 - Mehrgrößen-Zustandsregelung
 - Spezialitäten:
 - Fahrzeugregelung (RAK, SRK)
 - Ereignisdiskrete Systeme
 - Verteilt-Parametrische Systeme
- Forschungsgebiet: Echtzeitregelungen (Kooperation mit i4)
- Literatur: Lunze (Regelungstechnik 1+2); Föllinger (RT).



Gliederung

- 1 Einleitung
- 2 Grundbegriffe
- 3 Regelungsentwurf
- 4 Digitaler Regelkreis
- 5 Signalverarbeitung
- 6 Zusammenfassung und Ausblick
- 7 Übungsaufgabe**



Übungsaufgabe

- 1** Messe etwas mit einem Sensor!
- 2** Regle etwas!
→ siehe Übungsblatt



42

