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“ $\longrightarrow$ Evaluation von Lehrveranstaltungen

Regelungstechnik

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

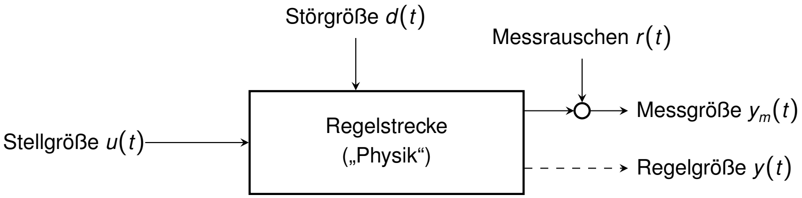
- Dynamisches System — *Raum mit Heizung*
  - zeitlich veränderliche Größen (Signale) — *Temperatur, Ventilstellung, ...*
  - Dynamik: Verhalten hängt auch von der Vorgeschichte ab (z. B. Trägheit) — *Raum erwärmt sich langsam*
- Beeinflussen
  - Stelleingriff — *Ventil am Heizkörper*
  - dafür meist 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

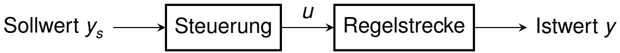
Größen



- 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

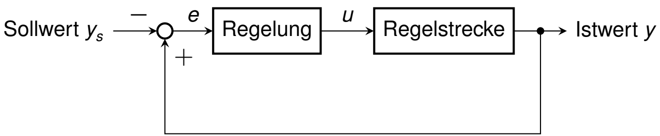
Steuerung



- 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

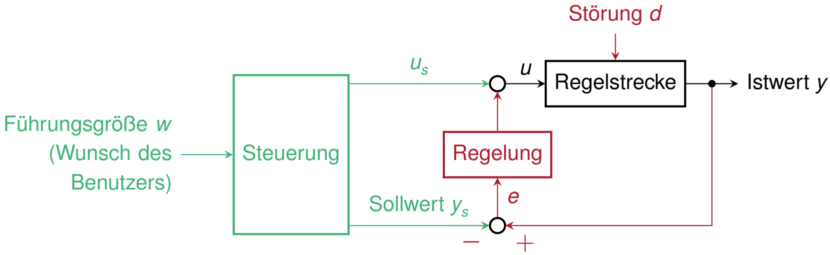
Regelung



- 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

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, Überschwingen, 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: $\mathrm{f}(y, \dot{y}, \ddot{y}, \ldots, u, \dot{u}, \ddot{u}, \ldots) = 0$
- Zustandsform („Zustandsraumdarstellung“)

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

$$y = \mathrm{g}(x, u) \tag{2}$$

  - Zustandsvektor $x \in \mathbb{R}^n$ = „Füllstand der Energiespeicher“
  - Zustände können nicht springen (Position, Geschwindigkeit, ...)
  - Wahl des Zustandsvektors nicht eindeutig
    $\rightarrow$ 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
    (ϟ 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

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

  - 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

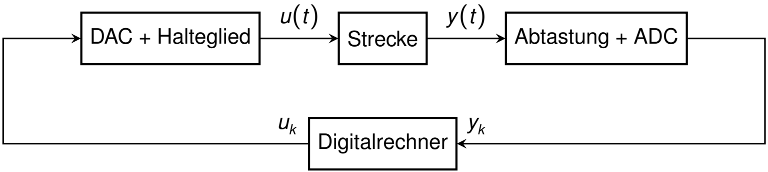
Gliederung

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)

$$u_k = u(kT_s), \quad y_k = y(kT_s), \quad \ldots, \quad k \in \mathbb{N} \tag{4}$$

- Verzögerungen (Latenzen, Jitter) vernachlässigt
- endliche Rechengenauigkeit: typischerweise vernachlässigbar, weil Datenraten gering und Auflösung hoch.

- Zeitdiskretisierung: Umrechnung zeitkontinuierlich → 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 (→ Matrixexponentialfunktion)

- zeitdiskreter PID-Regler:

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

Gliederung

Filter und Beobachter

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

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

    T_{TP}: Zeitkonstante (1/Grenzfrequenz)
  - zeitdiskreter Tiefpass 1. Ordnung:

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

  - „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

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \tag{8}$$
$$y_k = Cx_k \tag{9}$$

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

$$\hat{x}_{k+1} = A\hat{x}_k + Bu_k + L(y_k - \hat{y}_k) \tag{10}$$
$$\hat{y}_k = C\hat{x}_k \tag{11}$$

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

Beobachter (2)

- Voraussetzung: Beobachtbarkeit („ausreichende“ Sensoren)
- *Abwägung: Messrauschen versus Schnelligkeit*
  - Messrauschen bewirkt Fehler in y $\rightsquigarrow$ L klein wählen
  - Störung/Modellfehler bewirkt Abweichung von x $\rightsquigarrow$ L groß wählen $\lightning$
- Problem: Sensor-Ungenauigkeit
  - Kritisch: Offset — nicht von konstantem Messwert zu unterscheiden
    $\rightarrow$ 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

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

Übungsaufgabe

1. Messe etwas mit einem Sensor!
2. Regle etwas!

→ siehe Übungsblatt

Fragen. . .