

# 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













- Heizungsthermostat
- Hafenkran
- Segway
- Quadrocopter



- Heizungsthermostat
- Hafenkran
- Segway
- Quadrocopter

Aber auch:

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



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



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*



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*



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*
  - ...



- 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?



1 Einleitung

**2 Grundbegriffe**

3 Regelungsentwurf

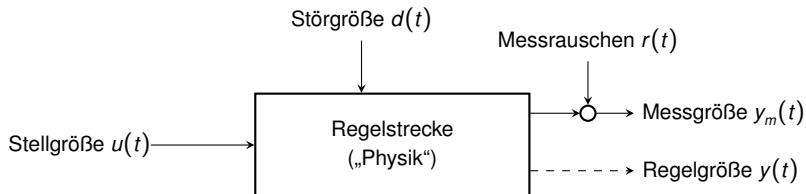
4 Digitaler Regelkreis

5 Signalverarbeitung

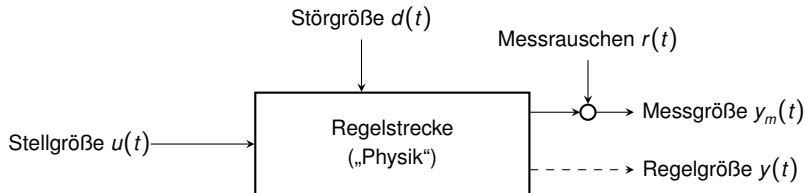
6 Zusammenfassung und Ausblick

7 Übungsaufgabe



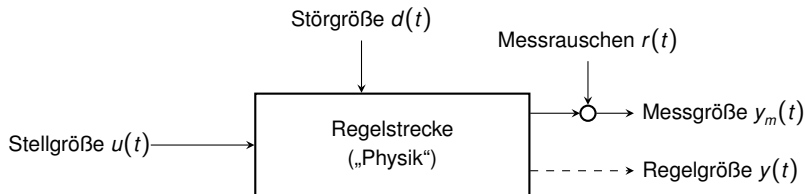


- Stellgröße  $u$  (einzige Einflussmöglichkeit)



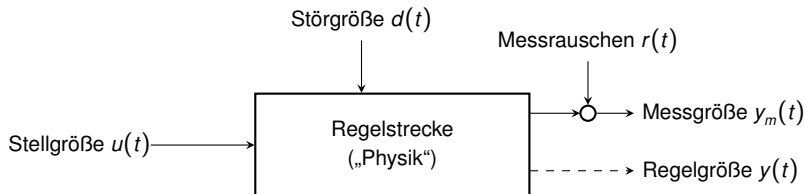
- Stellgröße  $u$  (einzige Einflussmöglichkeit)
- Regelgröße  $y$  (Istwert)
  - Vorgabe:  $y \approx y_s$  (Sollwert)
  - Messgröße  $y_m$  (Sensor), oft  $= y$





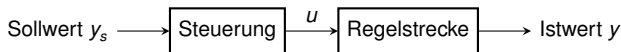
- Stellgröße  $u$  (einzige Einflussmöglichkeit)
- Regelgröße  $y$  (Istwert)
  - Vorgabe:  $y \approx y_s$  (Sollwert)
  - Messgröße  $y_m$  (Sensor), oft  $= y$
- Problem: Störgröße  $d$





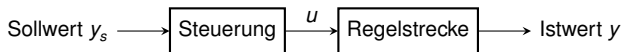
- Stellgröße  $u$  (einzige Einflussmöglichkeit)
- Regelgröße  $y$  (Istwert)
  - Vorgabe:  $y \approx y_s$  (Sollwert)
  - Messgröße  $y_m$  (Sensor), oft  $= y$
- Problem: Störgröße  $d$
- Ungünstige Festlegung von  $u, y, y_m$  kann den Entwurf erschweren oder unmöglich machen!
  - Auswahl und Platzierung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





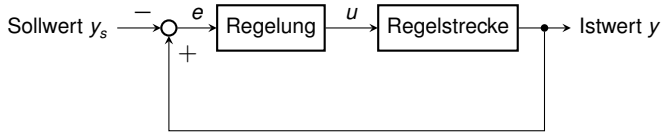
- genauer: **Steuerung in der offenen Kette** (engl. *open-loop control*)
- Annahme: keine Störung
- Bestimme Eingriff (Stellgröße  $u$ ) für gewünschtes  $y$  anhand eines Modells
- „im Blindflug“, ohne Messung!



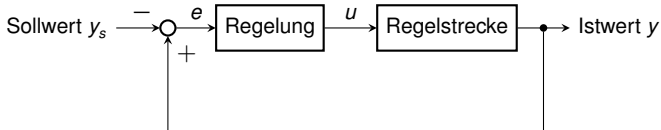


- genauer: Steuerung in der offenen Kette (engl. *open-loop control*)
- (Annahme: keine Störung)
- Bestimme Eingriff (Stellgröße  $u$ ) für gewünschtes  $y$  anhand eines Modells
- „im Blindflug“, ohne Messung!
  
- folgt **exakt** dem geplanten Verlauf (sofern physikalisch möglich)
- funktioniert auch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



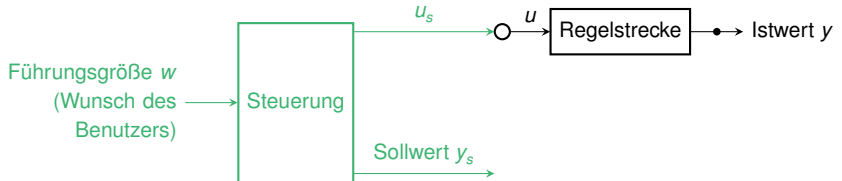


- Vergleich von Soll- und Istwert: Fehler  $e = y - y_s$
- Rückführung des Fehlers auf das Stellsignal
- **geschlossener Regelkreis** (engl. *closed-loop control*)



- 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!

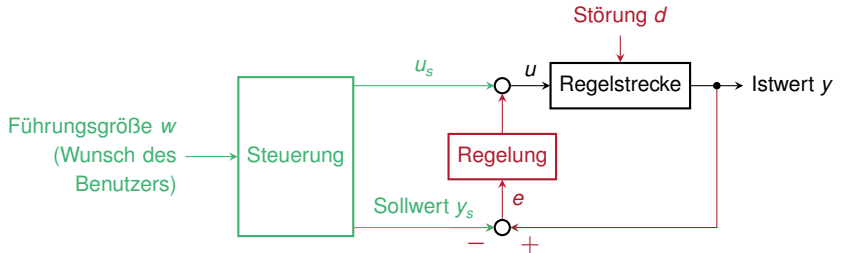




■ **Steuerung** für alles Bekannte

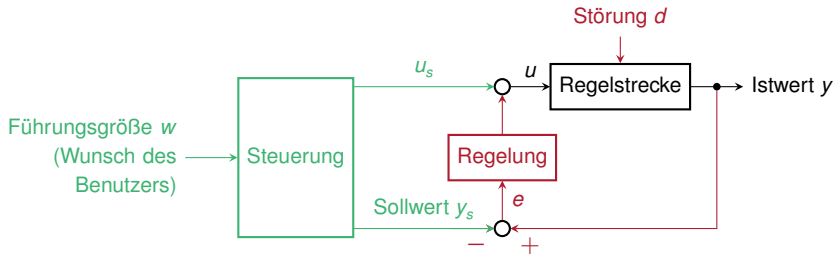


# Zwei-Freiheitsgrade-Struktur



- **Steuerung** für alles Bekannte
- **Regelung** für verbleibende Abweichungen





- **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



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



- 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)



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



- 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



*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)



- Sollverlauf muss realisierbar sein
- z.B. Stetigkeit entsprechend der Dynamik
- Ansatz 1: Vorgabe der höchsten Ableitung
  - Fachbegriff: flachheitsbasierte Vorsteuerung



- 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



- 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)



- 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



- 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



## ■ 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

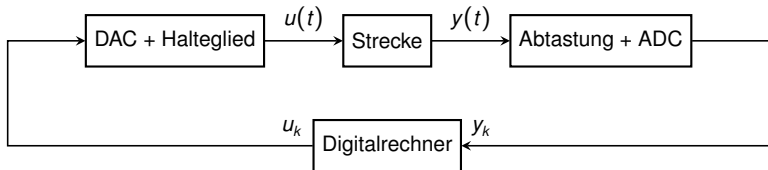
- Start:  $K_p = K_i = K_d = 0$
- Erst P, dann I, dann ggf. D einstellen
- Soweit erhöhen bis Verhalten gut genug, aber noch keine Instabilität
- funktioniert oft, aber nicht immer



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



- 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  $t_k = kT_s$ )



- 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:

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



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



- 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



- 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!



- 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 ⚡
- 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



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



- 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



## ■ 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).



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



1 Messe etwas mit einem Sensor!

2 Regle etwas!

→ siehe Übungsblatt



42

