DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

Maximilian Gaukler

Lehrstuhl für Regelungstechnik

Sommersemester 2018

DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

Regelungstechnik und Signalverarbeitung

Maximilian Gaukler

Lehrstuhl für Regelungstechnik

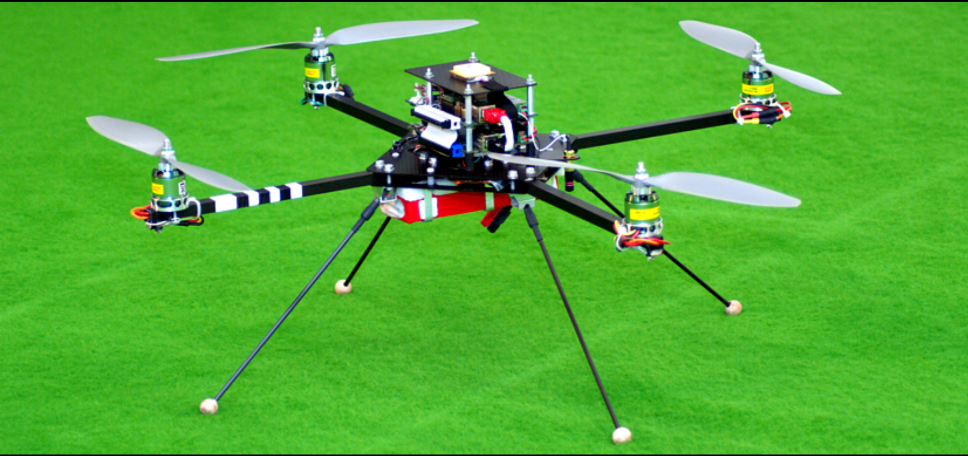
Sommersemester 2018

Kari Söderholm, CC-BY 2.0, https://flic.kr/p/Jxze8P

formulanone, CC-BY-SA 2.0, https://flic.kr/p/p5nKoc

Blondinrikard Fröberg, CC-BY 2.0, https://flic.kr/p/Jxze8P

Jon, CC-BY-SA 2.0, https://flic.kr/p/aD9vjV



Regelungen im Alltag

- Heizungsthermostat
- Hafenkran
- Segway
- Quadrocopter

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.

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*

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*

Regelungstechnik

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

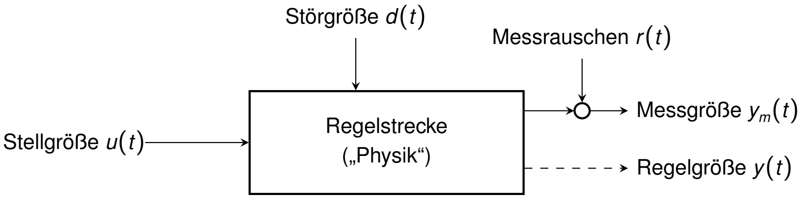
- Dynamisches System — *Raum mit Heizung*
  - zeitlich veränderliche Größen (Signale) — *Temperatur, Ventilstellung, ...*
  - Dynamik: Verhalten hängt auch von der Vorgeschichte ab (z. B. Trägheit) — *Raum erwärmt sich langsam*
- Beeinflussen
  - Stelleingriff — *Ventil am Heizkörper*
  - dafür meist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

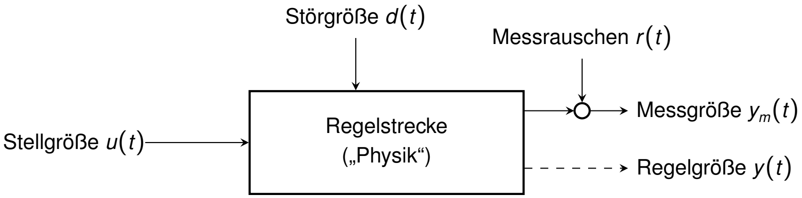
Gliederung

Größen



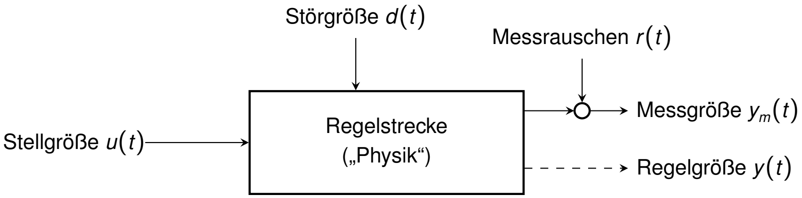
- Stellgröße u (einzige Einflussmöglichkeit)

Größen



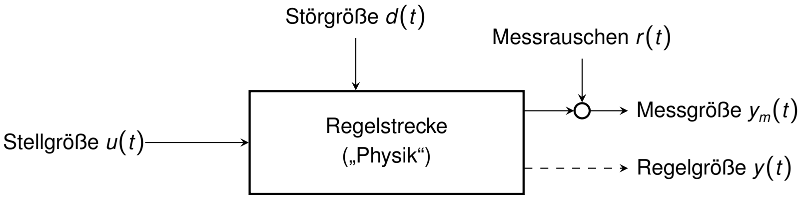
- Stellgröße u (einzige Einflussmöglichkeit)
- Regelgröße y (Istwert)
  - Vorgabe: $y \approx y_s$ (Sollwert)
  - Messgröße y_m (Sensor), oft $= y$

Größen



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

Größen



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

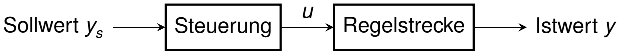
- Ungünstige Festlegung von u, y, y_m kann den Entwurf erschweren oder unmöglich machen!
  - Auswahl und Platzierung der Sensoren und Aktoren ist kritisch!
  - Möglichst direkt eingreifen und messen

Steuerung

$$\text{Sollwert } y_s \longrightarrow \boxed{\text{Steuerung}} \xrightarrow{u} \boxed{\text{Regelstrecke}} \longrightarrow \text{Istwert } y$$

- 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!

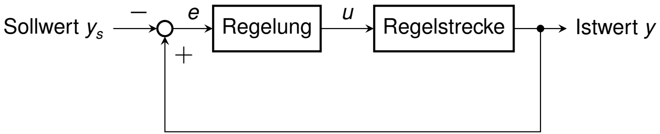
Steuerung



- 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!

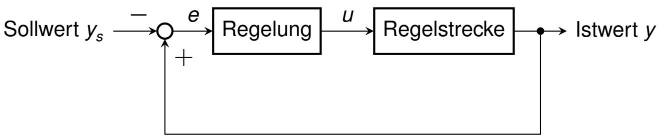
- folgt exakt dem geplanten Verlauf (sofern physikalisch möglich)
- funktioniert auch für messbare Störung → Störaufschaltung
- kann nur auf bekannte Störungen reagieren

Regelung



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

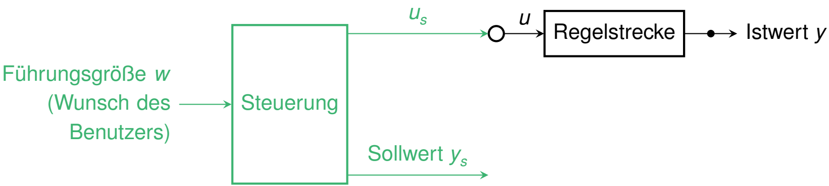
Regelung



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

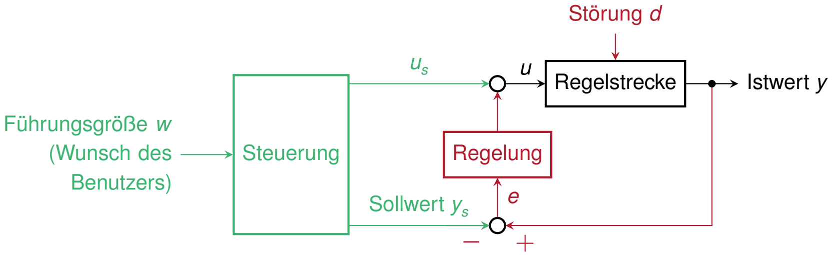
- kompensiert auch unbekannte Störungen
- kann erst wirken, wenn eine Abweichung (Fehler) aufgetreten ist
- Neue Dynamik durch Rückführung — kann instabil werden!

Zwei-Freiheitsgrade-Struktur



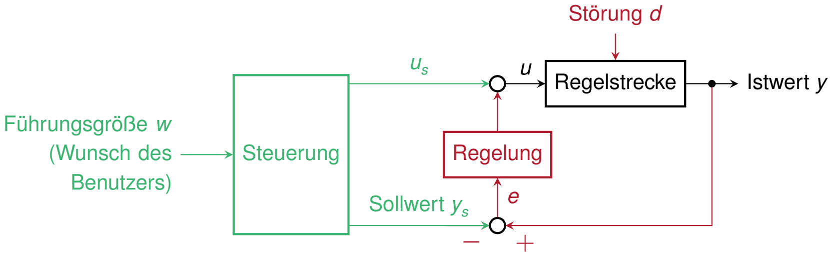
- Steuerung für alles Bekannte

Zwei-Freiheitsgrade-Struktur



- Steuerung für alles Bekannte
- Regelung für verbleibende Abweichungen

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: $\mathrm{f}(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, u, \dot{u}, \ddot{u}, \dots) = 0$
- 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

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

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

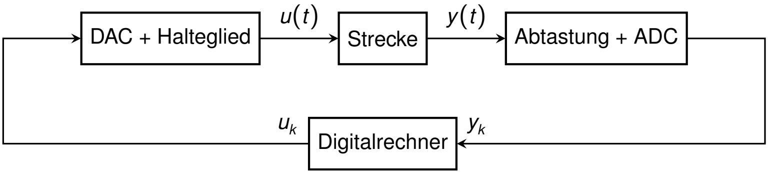
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau + K_d \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} e(t) \tag{3}$$

  - 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)

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

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

- Zeitdiskretisierung: Umrechnung zeitkontinuierlich $\rightarrow$ 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:

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

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
- 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 $\leadsto$ L klein wählen
  - Störung/Modellfehler bewirkt Abweichung von x $\leadsto$ L groß wählen ↯
- Problem: Sensor-Ungenauigkeit
  - Kritisch: Offset — nicht von konstantem Messwert zu unterscheiden
    $\rightarrow$ 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
    - Optimalsteuerung
    - Nichtlineare Systeme, Regelung nichtlin. Sys.
    - Mehrgrößen-Zustandsregelung
  - Spezialitäten:
    - Fahrzeugregelung (RAK, SRK)
    - Ereignisdiskrete Systeme
    - Verteilt-Parametrische Systeme
- Neues Forschungsthema: 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. . .