

# Echtzeitverarbeitung

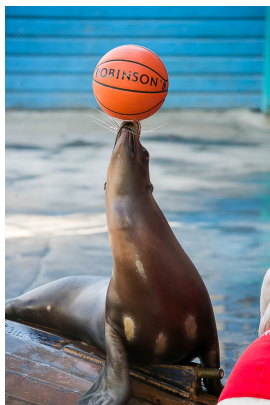
R. Kaiser, K. Beckmann, R. Kröger

(HTTP: <http://www.cs.hs-rm.de/~kaiser>

E-Mail: [robert.kaiser@hs-rm.de](mailto:robert.kaiser@hs-rm.de))

Sommersemester 2021

## 5. Basiswissen Regelungstechnik



<https://www.stadtreporter.de/hannover/news/wirtschaft/robber-am-ball-ein-tierisch-sportlicher-geburtstag>

# Inhalt



## 5. Basiswissen Regelungstechnik

5.1 Einführung

5.2 Grundlagen

5.3 Systemtheorie

5.4 PID-Regler

5.5 Stabilität

# Was ist Regelungstechnik?



## Wikipedia:

*„Regelungstechnik ist ein Teilgebiet der Automatisierungstechnik und eine Ingenieurwissenschaft, die die in der Technik vorkommenden Regelungsvorgänge behandelt. Ein technischer Regelvorgang ist eine gezielte Beeinflussung von physikalischen, chemischen oder anderen Größen in technischen Systemen.“*

## Beeinflussung von dynamischen Systemen

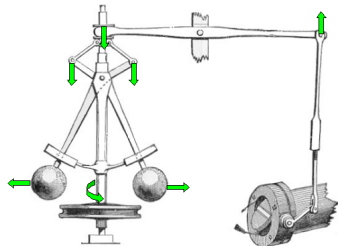
- Wie komme ich vom IST-Wert zum SOLL-Wert?
- Regelung kann mechanisch, elektrisch, biologisch, rechnergestützt erfolgen
- Sensoren, Aktoren, Regelungsalgorithmus

# Wie alles begann ...



## 1788: James Watt soll eine Dampfmaschine reparieren

- Gewünscht: Gleichmäßige Geschwindigkeit
- Problem: Mehr Kohle → mehr Dampf → mehr Geschwindigkeit
- Lösung: „Zentrifugalregulator“
- Ventilöffnung abhängig von der Drehgeschwindigkeit
- Erster „Regler“
- Parameter über Experimente/„Probieren“ bestimmt
- (N.B.: Verbleibendes Problem: unsicherer Fehlerzustand: Keilriemen gerissen → Volldampf ...)



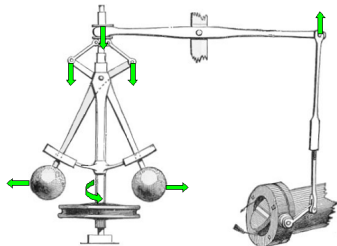
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fliehkraftregler.PNG>

# Wie alles begann ...



## 1788: James Watt soll eine Dampfmaschine reparieren

- Gewünscht: Gleichmäßige Geschwindigkeit
- Problem: Mehr Kohle → mehr Dampf → mehr Geschwindigkeit
- Lösung: „Zentrifugalregulator“
- Ventilöffnung abhängig von der Drehgeschwindigkeit
- Erster „Regler“
- Parameter über Experimente/„Probieren“ bestimmt
- (N.B.: Verbleibendes Problem: unsicherer Fehlerzustand: Keilriemen gerissen → Volldampf ...)



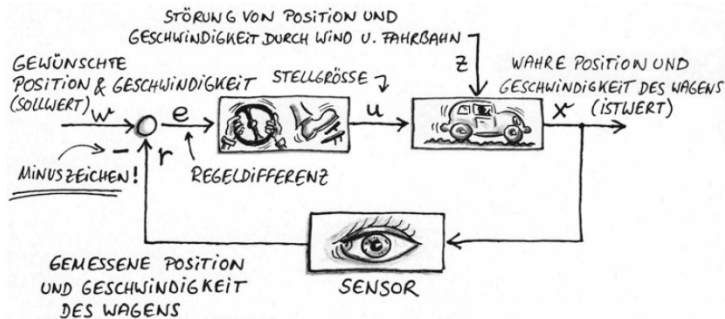
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fliehkraftregler.PNG>

# Wo wird geregelt



- Gebäudeautomation (Heizung, Licht)
- Medizintechnik (Herzschrittmacher)
- Prozessautomation (Chemische Prozesse)
- Robotersteuerungen
- Automotive (ABS, ESP, Motorsteuerung)
- Avionik (Starten, Landen, Autopilot, ...)
- Haushalt (Backofen, Waschmaschine, ...)
- Energienetze, Kraftwerke
- Politik (Steuern, Subventionen, ...)

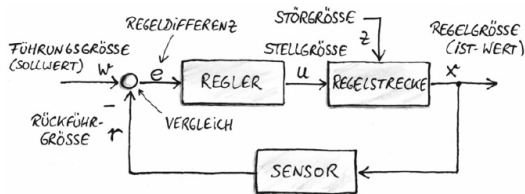
# Der Regelkreis



Aus Tieste, Romberg, Keine Panik vor Regelungstechnik, 2011



# Begriffe



Aus Tieste, Romberg, Keine Panik vor Regelungstechnik, 2011

- Regler
- Regelkreis
- Regelgröße (Istwert)  $x(t)$
- Rückführgröße (Messgr.)  $r(t)$
- Führungsgröße (Sollwert)  $w(t)$
- Regeldifferenz  $e(t) = w(t) - r(t)$ , Ziel:  $e \rightarrow 0$
- Stellgröße  $u(t)$
- Störgröße  $z(t)$

# Steuerung vs. Regelung und Stabilität



## Ohne Rückkopplung, bzw. Regler $\Rightarrow$ Steuerung

- Offener „Regelkreis“
- Bsp: Wecker, zeitgesteuertes Bewässerungssystem
- Einfach aber keine Reaktion auf Änderungen und Störgrößen!

## Stabilität

- Stabile Systeme sind notwendig
- Systeme können träge sein
- „Aufschaukeln“ von Aktionen ist möglich
  - ▶ Ursache und Wirkung verstärken sich (Positive Rückkopplung<sup>1</sup>)
  - ▶ Eingang  $w$ , oder Störung  $z$  enthalten Frequenzen, die der Eigenfrequenz des Systems entsprechen  $\Rightarrow$  Resonanz

<sup>1</sup> „Bei positiver Rückkopplung rechtzeitig in Deckung gehen!“ [Tieste, Romberg 2011]

# Modellbildung



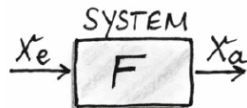
## Wie Regelungen entwickeln?

### Primär Aufgabe für Ingenieure, E-Techniker

- Aber auch ein Informatiker sollte die Basics kennen!

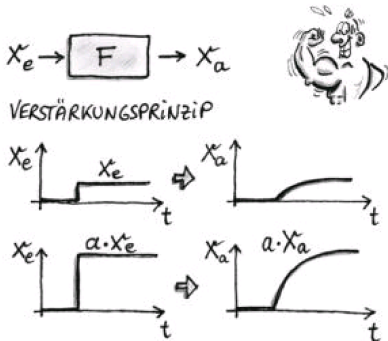
### Am Anfang steht das Modell!

- Abstraktion, Blöcke, etc. pp.
- Eingangs- und Ausgangssignal
- Gewünscht: Lineare Systeme  
„Mehr Eingang  $\rightarrow$  mehr Ausgang“
- Zeitliche Verzögerung möglich
- Verhalten wird über Differentialgleichung beschrieben
- Auch mehrere Eingänge und oder Ausgänge möglich



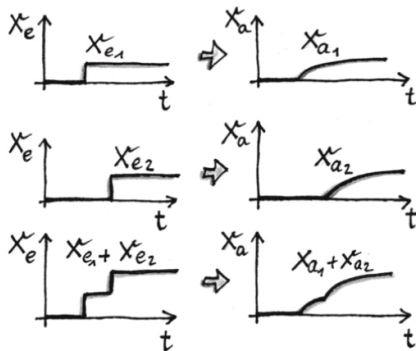
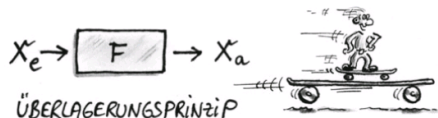
Aus Tieste, Romberg, Keine Panik vor Regelungstechnik, 2011

# Verstärkungsprinzip (Folge der Linearität)



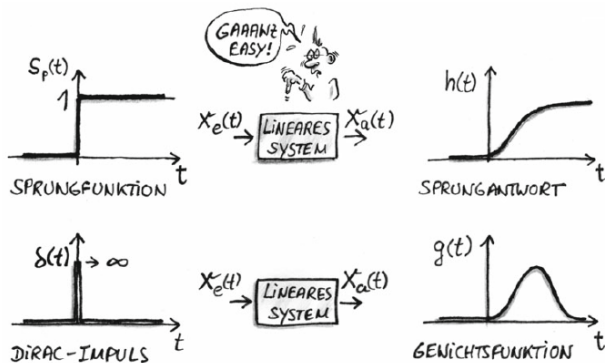
Aus Tieste, Romberg, Keine Panik vor Regelungstechnik, 2011

# Überlagerungsprinzip (Folge der Linearität)



Aus Tieste, Romberg, Keine Panik vor Regelungstechnik, 2011

# Übertragungsfunktion



Aus Tieste, Romberg, Keine Panik vor Regelungstechnik, 2011

# Laplace-Transformation



**Lösen von Differentialgleichungen ist schwierig**

**Math. Hilfsmittel: Laplace-Transformation**

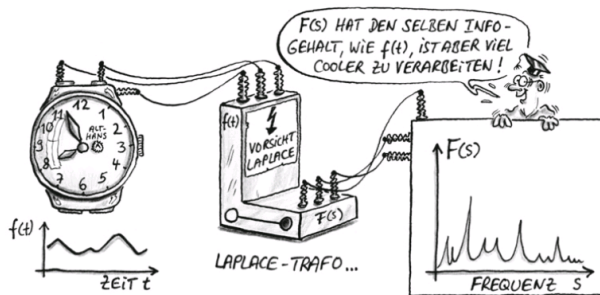
- Transformation einer Funktion  $f(t)$  vom Zeitbereich in eine Funktion  $F(s)$  im Bild- bzw. Frequenzbereich ( $s$  ist eine komplexe Zahl)
- Es gibt eine inverse Transformation
- DGLs werden zu “normalen Polynomen” transformiert  
⇒ Im Bildbereich lösen, dann rücktransformieren
- Abbildung i.d.R. über Korrespondenztabelle

**Oft ist eine Rücktransformation nicht notwendig**

**Wichtig: besondere Rechenregeln im Bildbereich!**

**Wird hier nicht weiter vertieft**

# Laplace-Transformation (2)



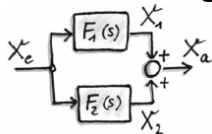
Aus Tieste, Romberg, Keine Panik vor Regelungstechnik, 2011



# Rechenregeln für Blockschaltbilder



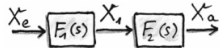
## Parallelschaltung



Aus Tieste, Romberg, Keine Panik vor Regelungstechnik, 2011

$$X_a(s) = (F_1(s) + F_2(s))X_e(s)$$

## Reihenschaltung



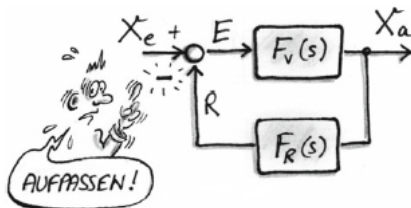
Aus Tieste, Romberg, Keine Panik vor Regelungstechnik, 2011

$$X_a(s) = (F_1(s)F_2(s))X_e(s)$$

# Rechenregeln für Blockschaltbilder (2)



## System mit Rückkopplung



Aus Tieste, Romberg, Keine Panik vor Regelungstechnik, 2011

$$E(s) = X_e(s) - R(s)$$

$$X_a(s) = F_v(s) \cdot E(s)$$

$$\frac{X_a(s)}{X_e(s)} = \frac{F_v(s)}{1 + F_v(s)F_r(s)}$$

$$X_a(s) = X_e(s) \cdot \frac{F_v(s)}{1 + F_v(s)F_r(s)}$$

# Übertragungsfunktionen (P-System)



- „P“ für Proportional  $\rightarrow$  Verstärkung
- DGL:  $x_a(t) = K_p \cdot x_e(t) \Rightarrow$  Übertragungsfunktion:  $F(s) = K_p$
- $K_p$  = Verstärkungsfaktor
- Im Regler bspw. Verstärkung der Regeldifferenz
- Reiner P-Regler kann nie den Sollwert erreichen
  - ▶ Überschwingen
  - ▶ Problem der Trägheit/Verzögerungen  $\rightarrow$  Instabilität

# Übertragungsfunktionen (I-System)



- „I“ für Integral  $\rightarrow$  Gedächtnis
- DGL:  $x_a(t) = K_i \cdot \int x_e(t) dt \Rightarrow$  Übertragungsfunktion:  $F(s) = \frac{K_i}{s}$
- $K_i$  = Gewichtungsfaktor
- I-Regler
  - ▶ langsame, aber genaue Annäherung an Soll-Wert
  - ▶ Dämpfung von starken (sprunghaften) Änderungen

# Übertragungsfunktionen (D-System)



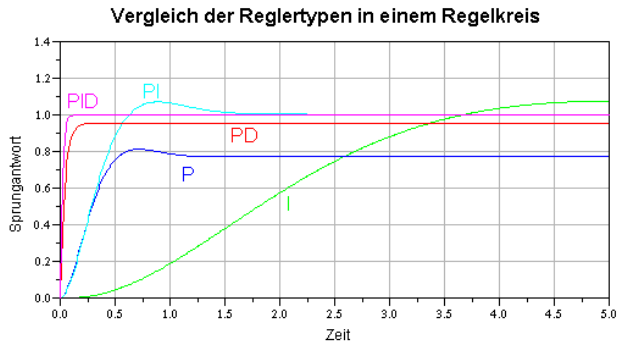
- „D“ für Differenzierer  $\rightarrow$  schnelle Reaktion auf Änderungen
- DGL:  $x_a(t) = K_d \cdot \frac{d}{dt} x_e(t) \Rightarrow$  Übertragungsfunktion:  $F(s) = K_s \cdot s$
- $K_d =$  Anstiegskonstante
- Reaktion auf die Änderungsgeschwindigkeit
  - ▶ Je steiler die Änderung, desto größer der Wert
  - ▶ Kein eigenständiger Regler
  - ▶ Immer zusammen mit P- oder I-Anteil
  - ▶ Gut geeignet um „früh“ gegenzuregeln
- Oft mit zusätzlicher Verzögerung  $\frac{1}{(1+T_p)}$

# PID-Regler



- Kombinationen von P, I und D-Anteil
  - ▶ Parametrisierung über die Konstanten
  - ▶ Unterschiedliche Vor- und Nachteile
- PD-Regler
  - ▶ Schnelle Reaktion auf Ankündigungen von Veränderungen
  - ▶ Unruhig, bleibende Regelabweichung
- PI-Regler
  - ▶ Kombination schnelle Reaktion und exakte Ausregelung
  - ▶ Genau und mittelschnell
- PID-Regler
  - ▶ Universalregler
  - ▶ Genau und schnell

# Vergleich Reglertypen



<http://m-wissen.de/wiki/index.php/Datei:Reglervergleich.gif>

# Stabilität



## Regler sollen stabil sein

- Reaktionen auf Störungen
- Überreaktion auf Regelabweichungen

## Instabilitäten treten auf, wenn

- sich Ursache und Wirkung verstärken (Pos. Rückkopplung)
- Eingang, Störung oder Ausgang mit der Eigenfrequenz des Systems übereinstimmen

## Stabilität lässt sich aus der Pol-Nullstellenverteilung der Übertragungsfunktionen ablesen

- Polstellen mit negativen Realteil sind gut
- Polstellen mit positiven Realteil sind problematisch

## Hurwitz-Kriterium:

- Abschätzung ob Polstellen negativen Realteil besitzen
- Bereichsabschätzung von Parametern, für die der Regler stabil ist



# Einstellregeln für PID-Regler



## Wie Parameter für PID-Regler ermitteln?

### Methode nach Ziegler und Nichols

- Start mit P-Regler und kleinem  $K_p$
- $K_p$  erhöhen, bis ungedämpfte Schwingungen ausgeführt werden (Kritische Verstärkung  $K_{pkr}$ )
- Schwingungsdauer  $T_{kr}$  bei krit. Verstärkung messen

### Dann Regelparameter:

P-Regler  $K_p = 0,5 K_{pkr}$

PI-Regler  $K_p = 0,45 K_{pkr}$   
 $T_n = 0,85 T_{kr}$

PID-Regler  $K_p = 0,6 K_{pkr}$   
 $T_n = 0,5 T_{kr}$   
 $T_v = 0,12 T_{kr}$

$T_N :=$  Nachstellzeit

$T_V :=$  Vorstellzeit

$K_i = \frac{K_p}{T_N}$

$K_d = \frac{K_p}{T_v}$

# Digitale Regler



## Von der Differentialgleichung zur Differenzengleichung

- Zyklische Ausführung  $\rightarrow \frac{dx}{dt} \rightarrow \frac{\Delta x}{\Delta t} \rightarrow \frac{(x_n - x_{n-1})}{\Delta t}$
- Wenn  $\Delta t$  nicht Konstant ist, dann  $\Delta t \rightarrow (t_n - t_{n-1})$
- $\Delta t \rightarrow T_a$  Abtastzeit

$e = w - x;$  // Abweichung

$esum = esum + e;$  // Integration I-Anteil

$y = K_p * e +$  // P-Anteil

$K_i * T_a * esum +$  // I-Anteil

$K_d * (e - e_{alt}) / T_a;$  // D-Anteil

$e_{alt} = e;$  //  $x_{n-1}$  fuer D-Anteil

# Quellen



- <http://rn-wissen.de/wiki/index.php/Regelungstechnik>
- Tieste, Romberg, Keine Panik vor Regelungstechnik, 2011  
<https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-8348-81>
- PDV-Vorlesung Prof. Dr. Linn