Karlsruher Institut für Technologie

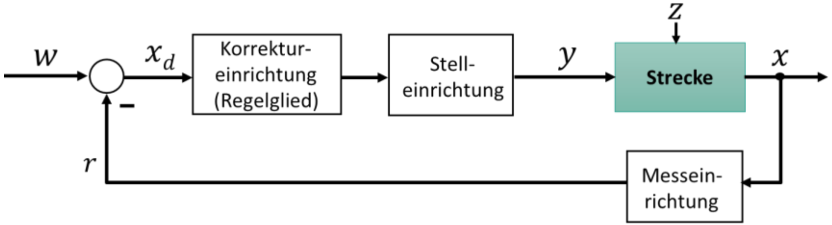
Hochperformante Humanoide Technologien

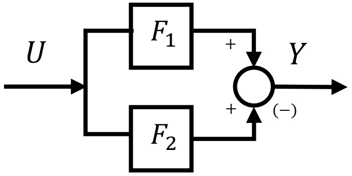
Robotik I: Einführung in die Robotik

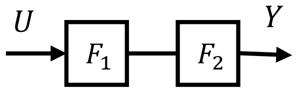
Kapitel 5 – Regelung von Robotersystemen

Tamim Asfour

http://www.humanoids.kit.edu







$$L\{f(t)\} = F(s) = \int_0^\infty f(t) e^{-st} dt$$

Inhalt

- Einführung
- Grundlagen der Regelung
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

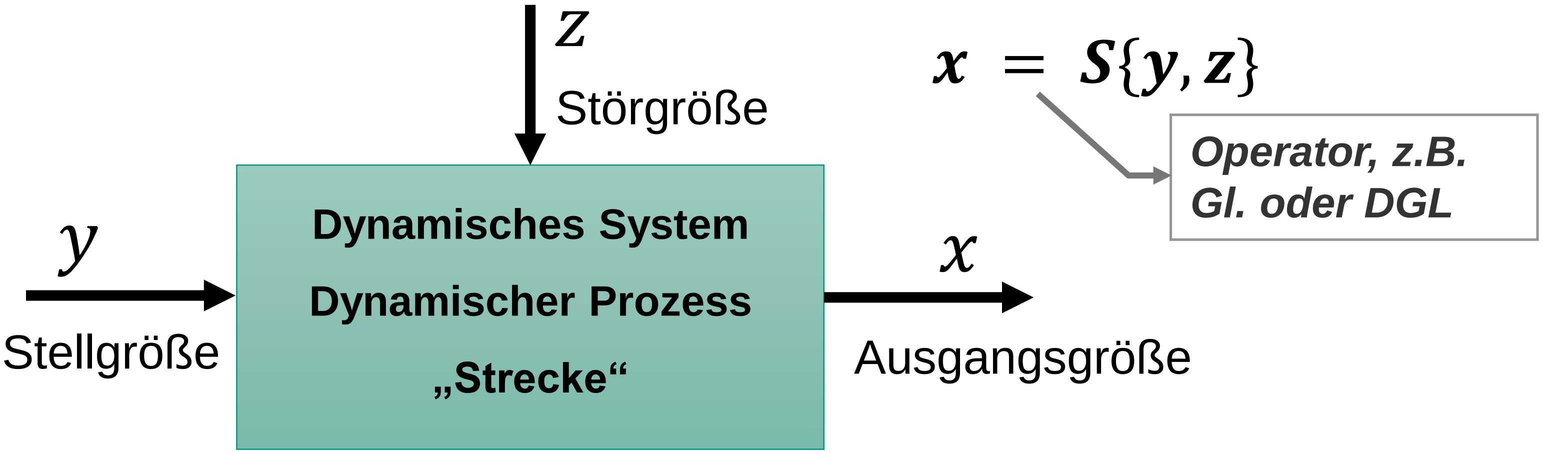
Regelungstechnik

- **Regelungstechnik:**
  Lehre von der selbsttätigen, gezielten Beeinflussung **dynamischer**, **zeitabhängiger** Prozesse während des Prozessablaufs

- **Regelungstechnische Grundsituation:**
  Forderung nach selbsttätiger, gezielter Beeinflussung bei **unvollständiger Systemkenntnis**, insbesondere bei Einwirkung von **Störungen**

- Methoden der Regelungstechnik sind **allgemeingültig**, d.h. unabhängig von der speziellen Natur der Systeme (Mathematik, Physik, Biologie, Informatik, Ingenieurswissenschaften, …)

Aufbau und Wirkungsweise einer Regelung



- **Aufgabe:**
  Der Ausgangsgröße eines dynamischen Systems soll mittels der Stellgröße ein Sollverhalten, d.h. ein gewünschtes Verhalten aufgeprägt werden, und zwar gegen den Einfluss einer Störgröße, die nur unvollständig bekannt ist

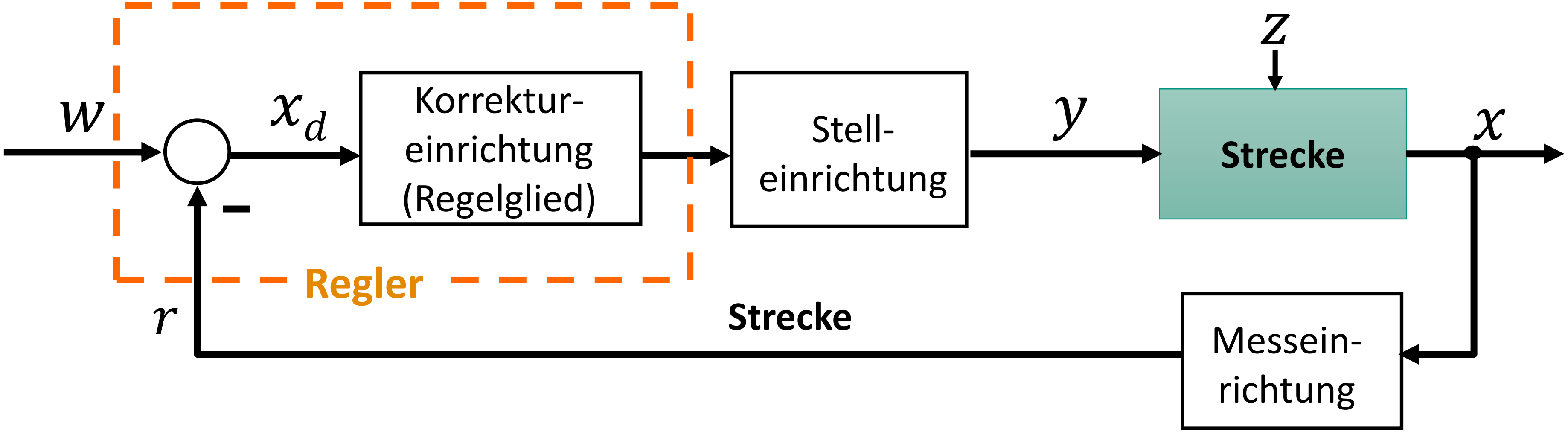
Aufbau und Wirkungsweise einer Regelung

Karlsruher Institut für Technologie

- **Prinzip der Lösung:**
  Die Strecke ist laufend zu beobachten und mit der so gewonnenen Information ist die Stellgröße derart zu verändern, dass trotz der Störgrößeneinwirkung die Ausgangsgröße an den gewünschten Verlauf (Sollverlauf) angeglichen wird.

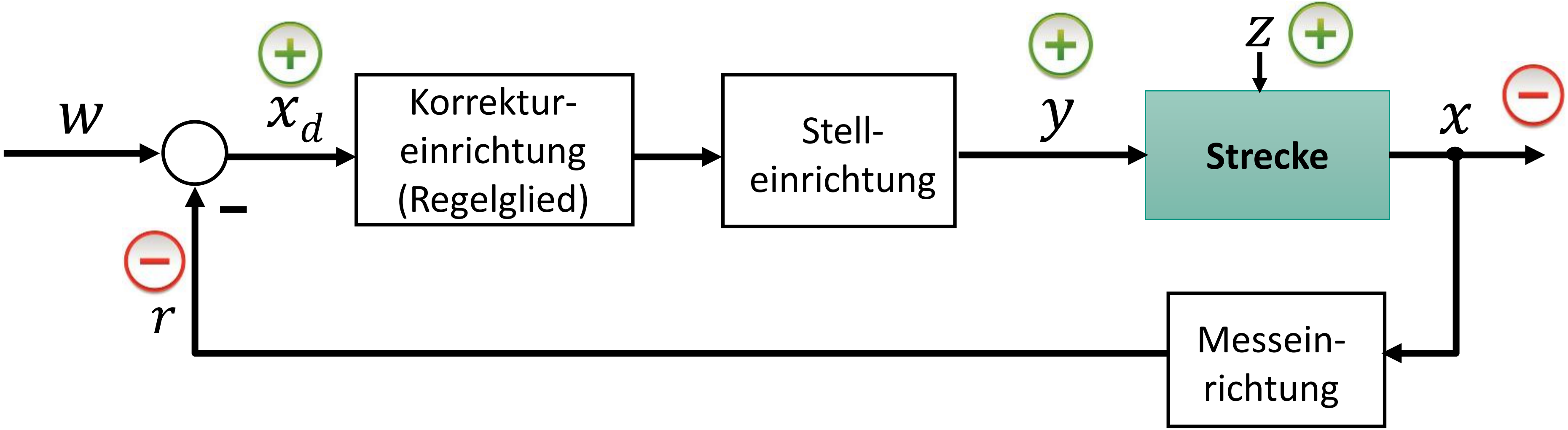
  Eine Anordnung, die dies bewirkt heißt **Regelung**.

Aufbau einer Regelung



w	Führungsgröße	x_d	Regeldifferenz
y	Stellgröße	x	Regelgröße
r	Rückführgröße	z	Störgröße

Wirkungsweise der Regelung



Sollwert von x: x_s

Messeinrichtung: $r = K_j\, x$ $\quad K_j > 0$ (konstant)

Wahl der Führungsgröße: $w = K_j\, x_s$

Dann: $x_d = w - r = K_j\, x_s - K_j\, x = K_j\,(x_s - x)$

Wirkungsweise der Regelung

Sollwert von x: x_s

Messeinrichtung: $r = K_j\, x$ $\quad K_j > 0$ (konstant)

Wahl der Führungsgröße: $w = K_j\, x_s$

Dann: $x_d = w - r = K_j\, x_s - K_j\, x = K_j\,(x_s - x)$

Es sei zunächst: $x = x_s \Rightarrow x_d = 0$ (Regelung in Ruhe)

z wird größer $\Rightarrow$ x wird abgesenkt $\Rightarrow$
r wird abgesenkt $\Rightarrow$ x_d wird angehoben $\Rightarrow$
y wird angehoben $\Rightarrow$ x wird angehoben mit der Tendenz den Sollwert x_s wieder anzunehmen.

Kurz: **Die Störgröße wird ausgeregelt.**

Wirkungsweise der Regelung

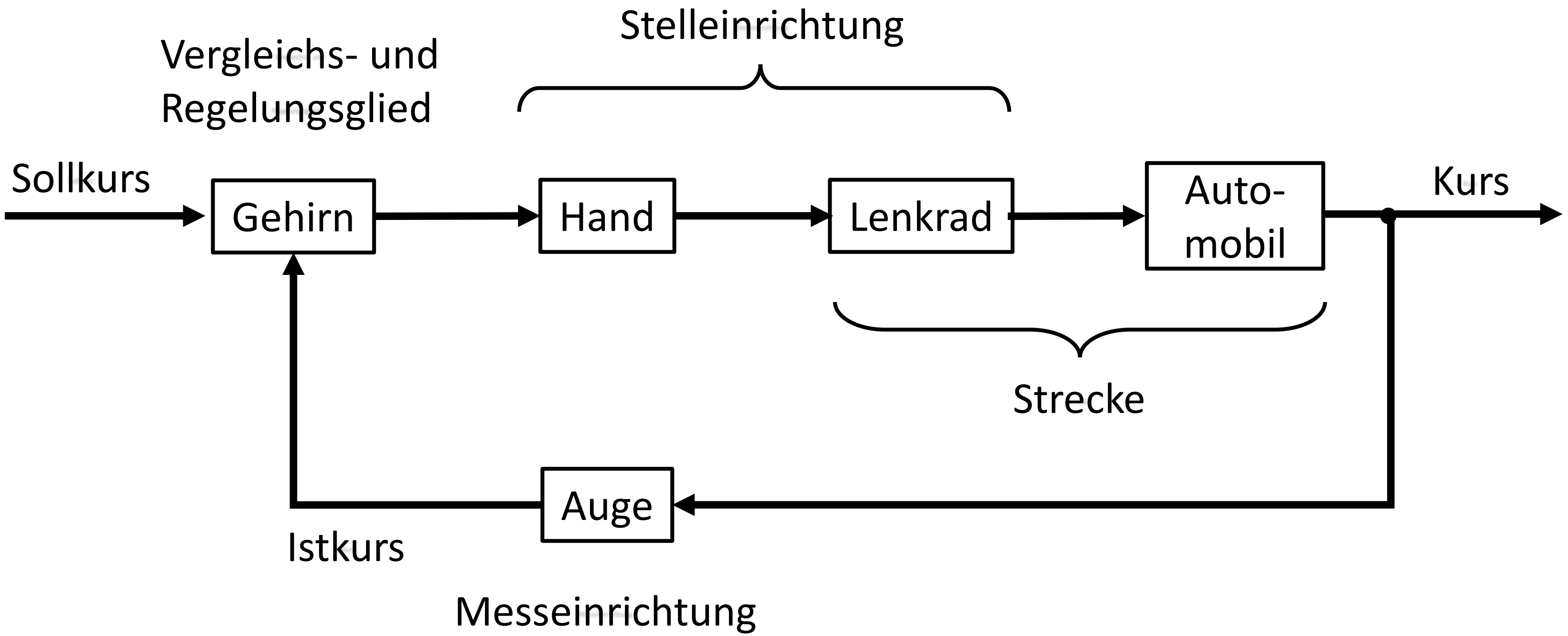
- Die Führungsgröße wird entsprechend eingeregelt, d.h. die Regelgröße folgt der Führungsgröße.

- Die Regelung ist ein Wirkungskreislauf: **Regelkreis.**

- Dabei entscheidend:

  Umkehr der Wirkungsrichtung im Soll-Istwert-Vergleich

Beispiel: Lenkung eines Automobils als Regelung

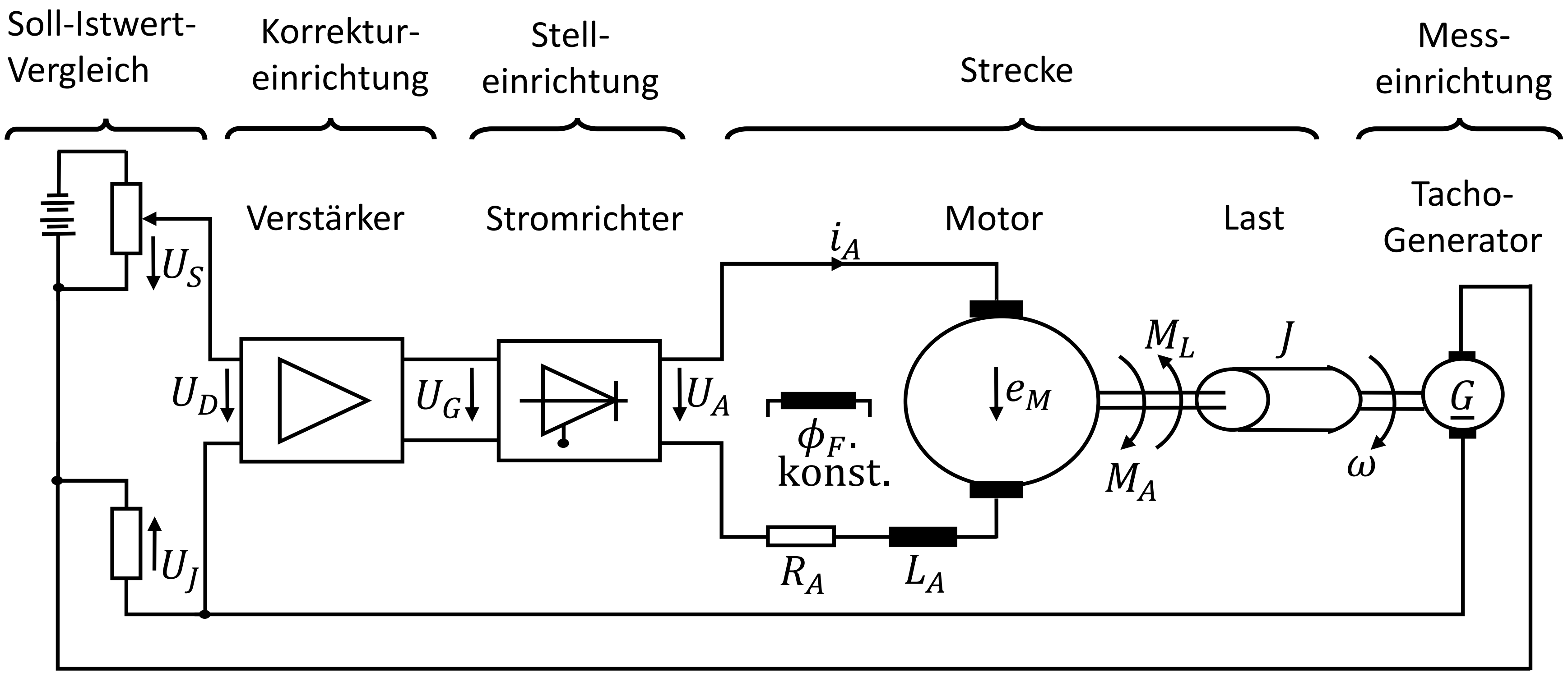


*Nach: **Regelungstechnik; O. Föllinger [1]***

Definition: Regelung

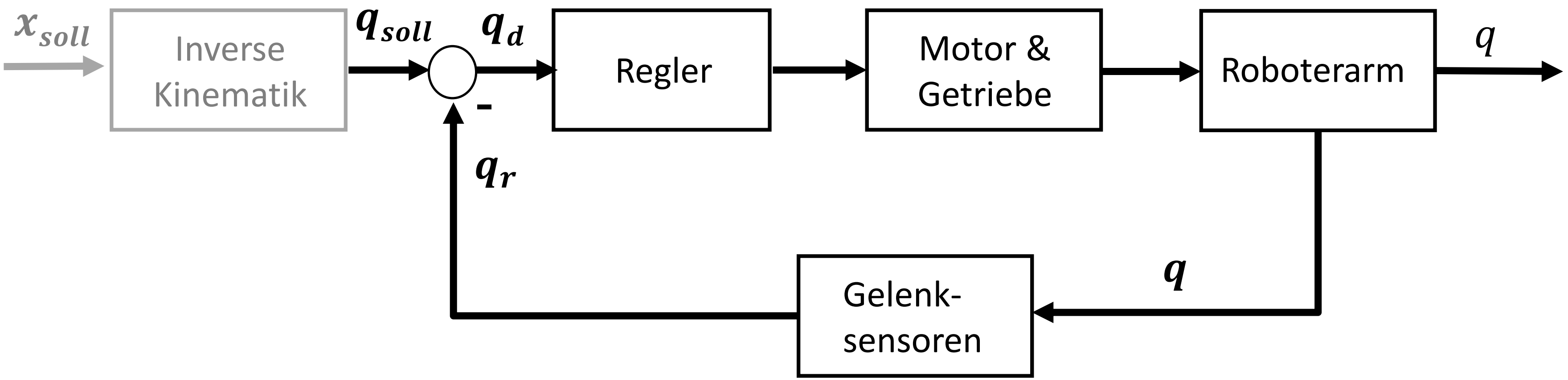
Unter einer Regelung versteht man eine Anordnung, durch welche bei unvollständig bekannter Strecke, insbesondere unvollständiger Kenntnis der Störgröße, die Regelgröße, d.h. die Ausgangsgröße der Strecke, laufend erfasst und mit der Führungsgröße verglichen wird, um mittels der so gebildeten Differenz die Regelgröße an den Sollverlauf anzugleichen.

Beispiel: Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors



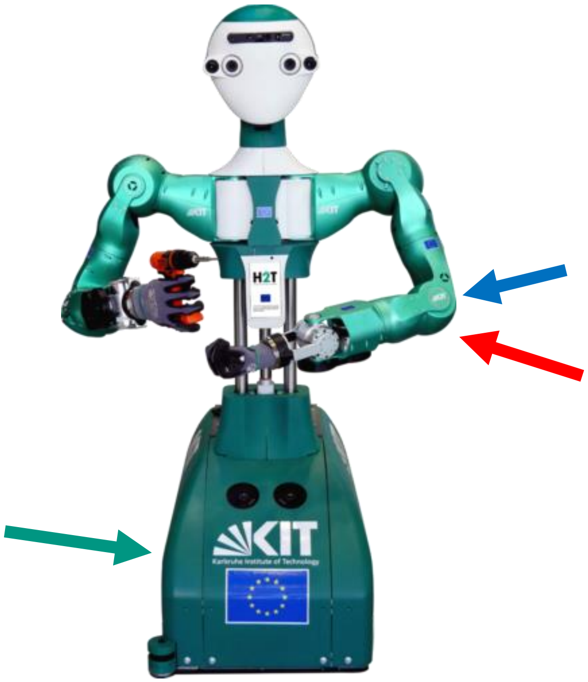
Beispiel: Regelung im Gelenkwinkelraum

- Aus den Gelenkwinkel-Sollwerten und den gemessenen Gelenkwinkeln werden Stellgrößen für die Gelenkantriebe generiert



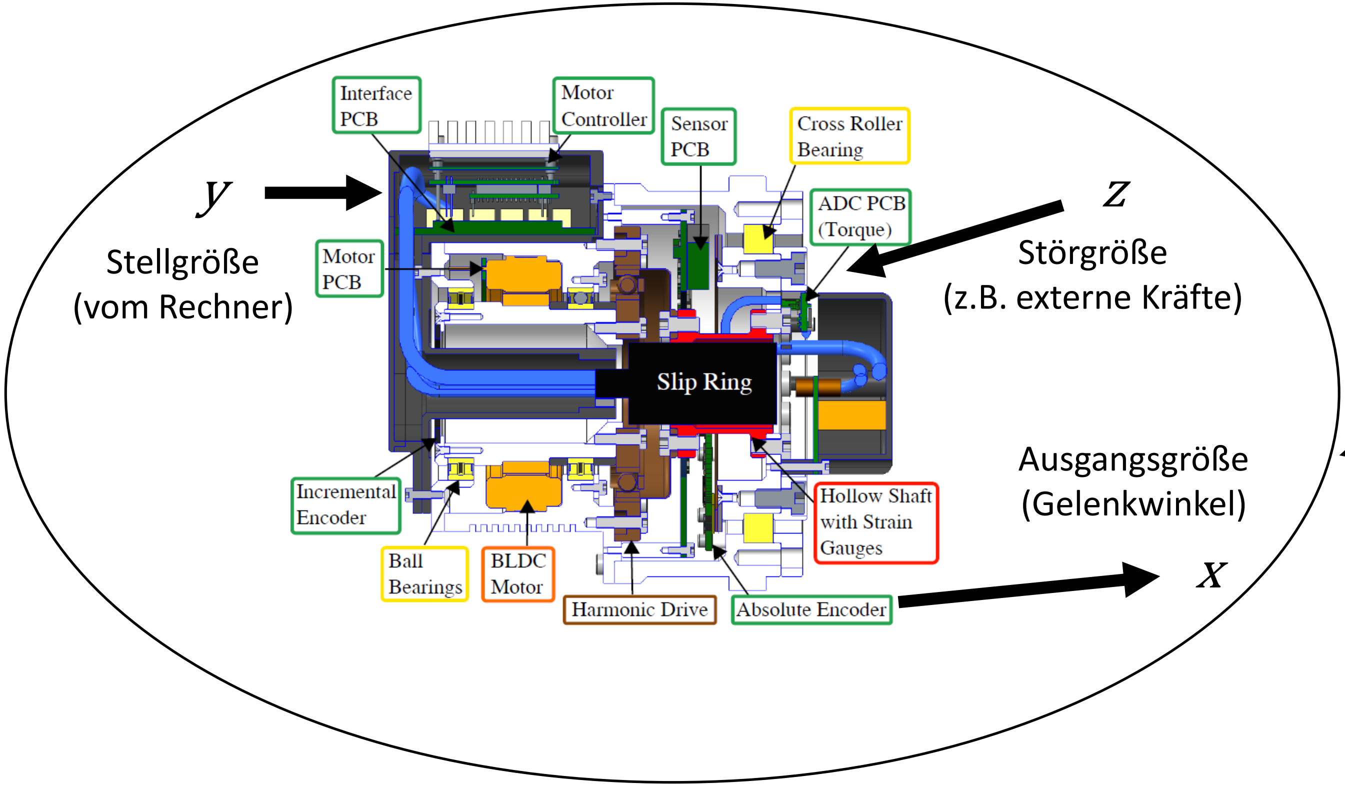
Beispiel: ARMAR-6

- High Level: **Rechner**
  - Zentrale Steuerung der Gelenke
  - Position (z.B. aus IK)
  - Geschwindigkeit (z.B. aus IK)
  - Drehmoment (z.B. aus ID)
  - **EtherCAT-Bus** (1000 Hz)
- Low Level: **Motorregler**
  - Regelung (bis 20 kHz) für
    - **PWM**
    - **Stromstärke**



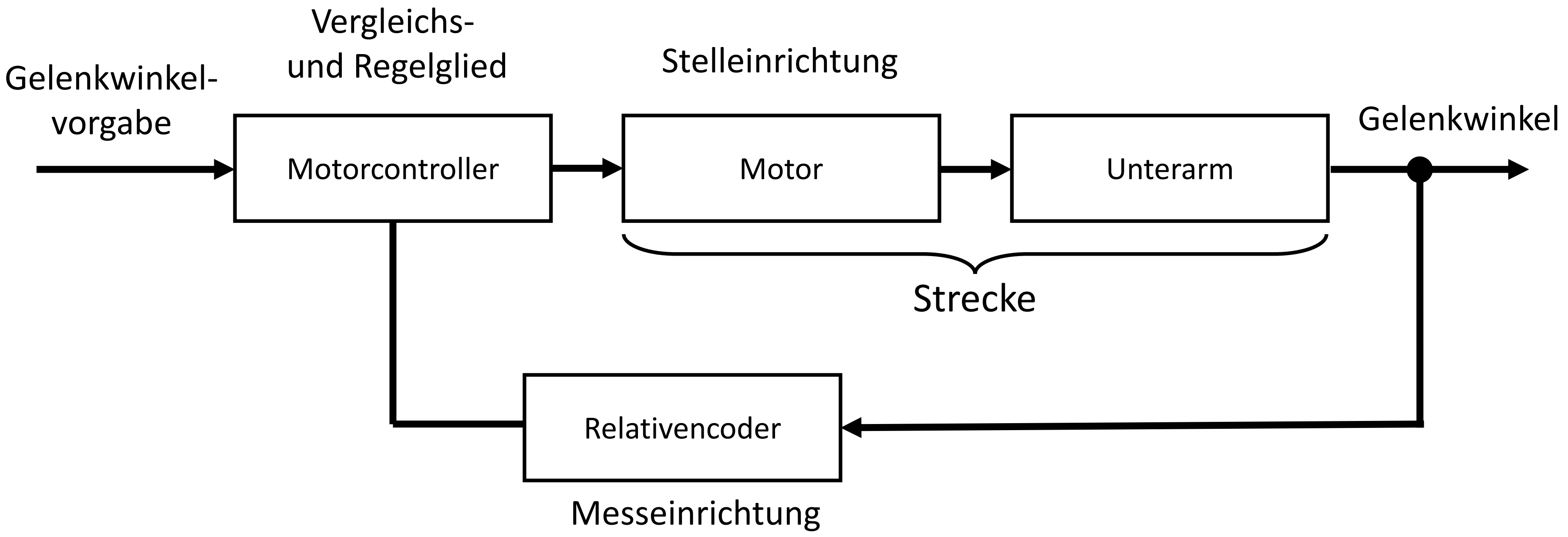
- Messung von Position, Drehmoment und Stromstärke im **Gelenk**

Beispiel: ARMAR-6



Dynamisches System

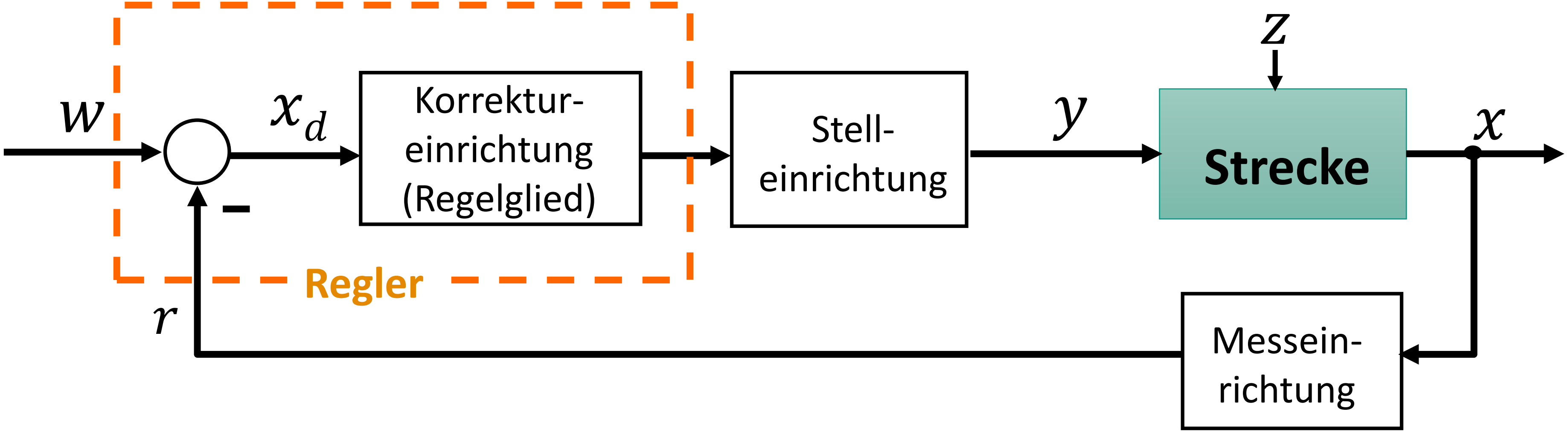
Beispiel: ARMAR-6



Einführung - Regelkreis

- Strukturbild einer Regelung
  - Aus den physikalischen Gesetzen ermittelt man **Gleichungen (Differential oder Differenzengleichungen), die Beziehungen zwischen zeitveränderlichen Größen** des Systems beschreiben
  - Die zeitveränderlichen Größen und ihre Gleichungen werden durch geeignete Symbole veranschaulicht
  - Ein Block des Strukturbildes ordnet jedem Zeitverlauf der Eingangsgröße eindeutig ein Zeitverlauf der Ausgangsgröße zu, und wirkt somit als **Übertragungsglied**

Einführung – Struktur eines Regelkreises

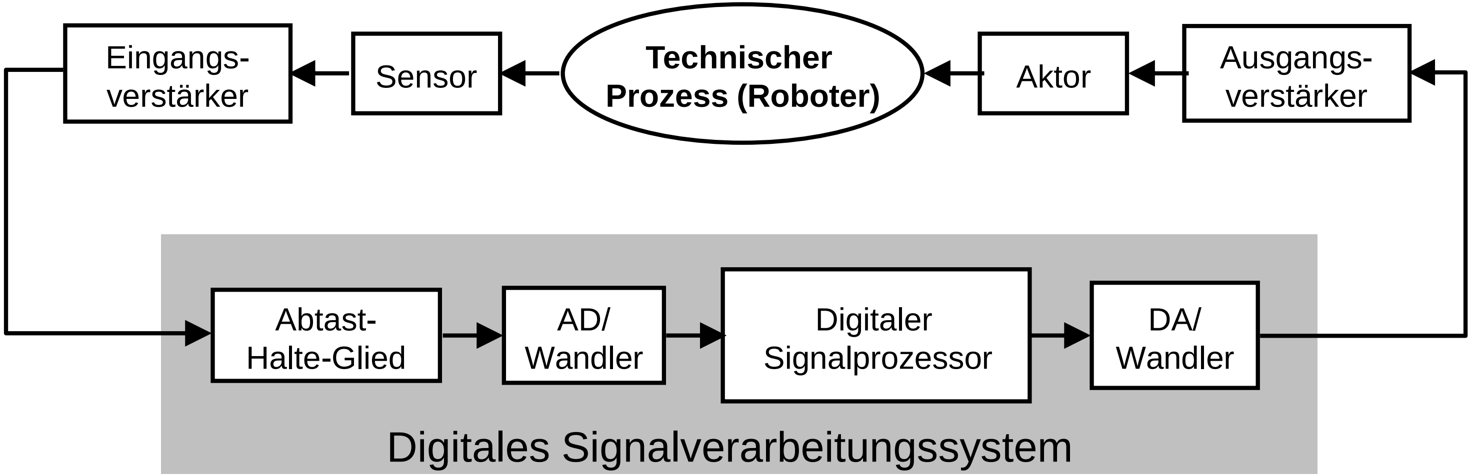


w	Führungsgröße	x_d	Regeldifferenz
y	Stellgröße	x	Regelgröße
r	Rückführgröße	z	Störgröße

Inhalt

- Einführung
- **Grundlagen der Regelung**
  - Einführung
  - Laplace-Transformation
  - Übertragungsglieder
  - Grundlegende Regelkreise
  - Stabilität einer Regelung
  - Testfunktionen
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

Aufbau eines digitalen Signalverarbeitungssystems



- Informationserfassung mittels Sensoren
- Sensordaten „digitalisieren“
- Algorithmen der digitalen Signalverarbeitung
- Verarbeitetes Signal wieder in ein analoges Signal umwandeln

Aufbau eines digitalen Signalverarbeitungssystems

- Eingangsverstärker zur Verstärkung des Sensorsignals und dessen Umsetzung in den erforderlichen Spannungsbereich

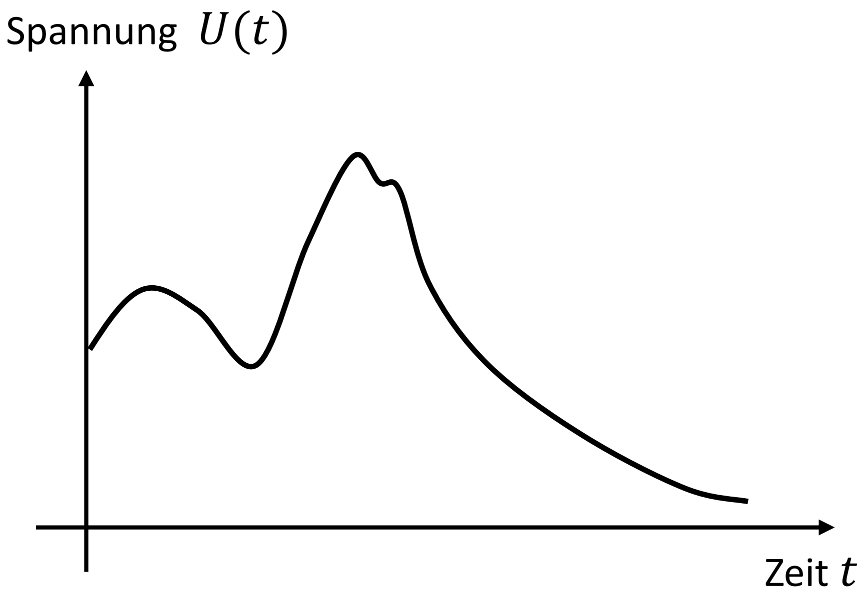
- Abtast-Halte-Glied zur periodischen Abtastung des Eingangssignals. Der abgetastete Wert wird innerhalb einer Abtastperiode konstant gehalten

- Eingangsverstärker mit *Anti-aliasing*-Filter zur Beseitigung von hohen Störfrequenzen des Sensorsignals

- Der Ausgangsverstärker sorgt für die Glättung des vom DA/Wandler kommenden Signals (Rekonstruktionsfilter)

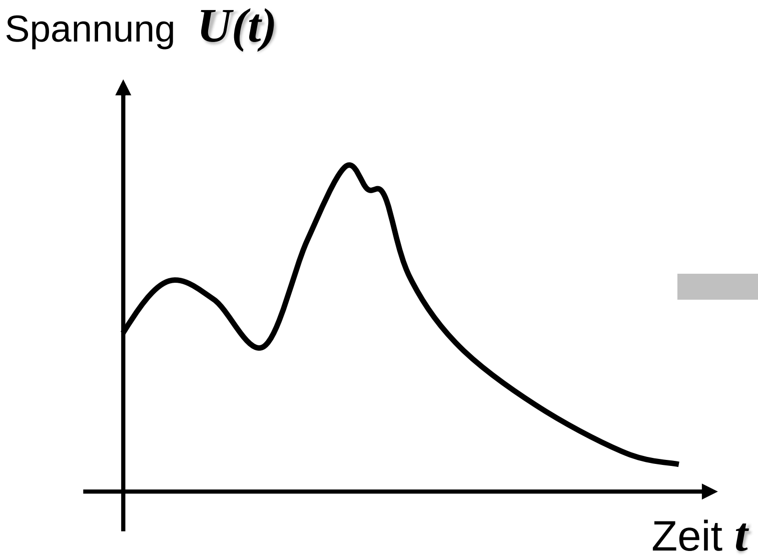
Kontinuierliche und diskrete Signale (1)

- Signal als physikalischer Träger einer Information
  - Ein Signal ist eine Funktion einer unabhängigen Variable t, die gewöhnlich die Zeit repräsentiert. Das Signal wird als $U(t)$ angegeben.
  - Analoges Signal: $U(t)$ ist zu jedem Zeitpunkt definiert und kann jeden beliebigen Wert annehmen (Signal mit kontinuierlichen Werten).

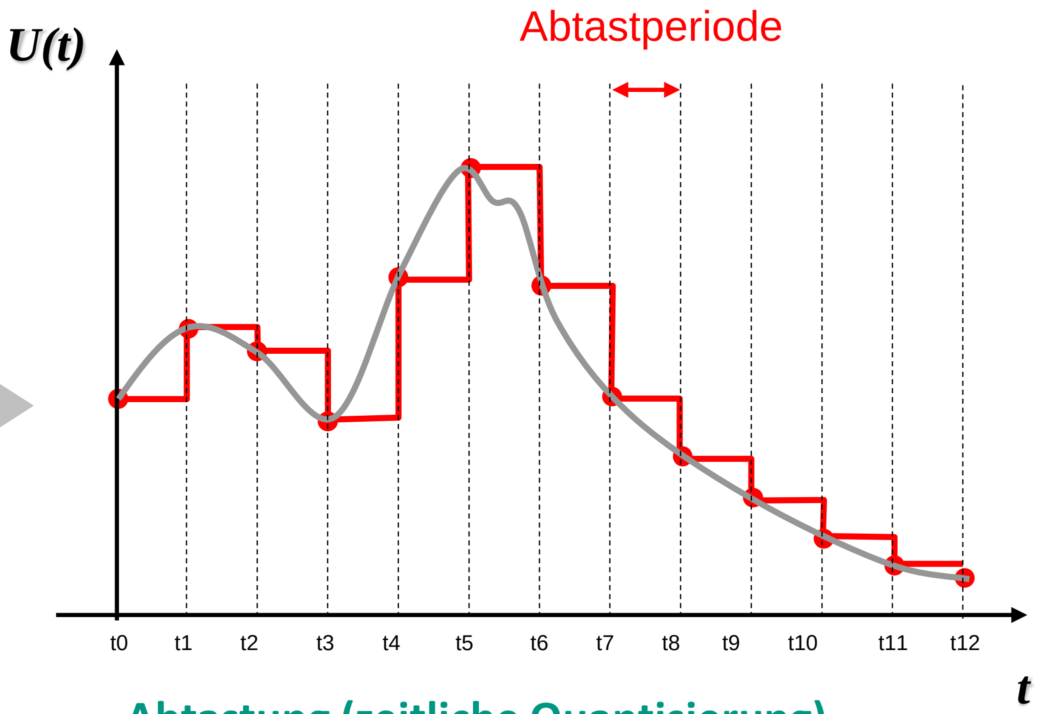


Analoges Signal
Zeit- und wertkontinuierlich

Kontinuierliche und diskrete Signale (2)



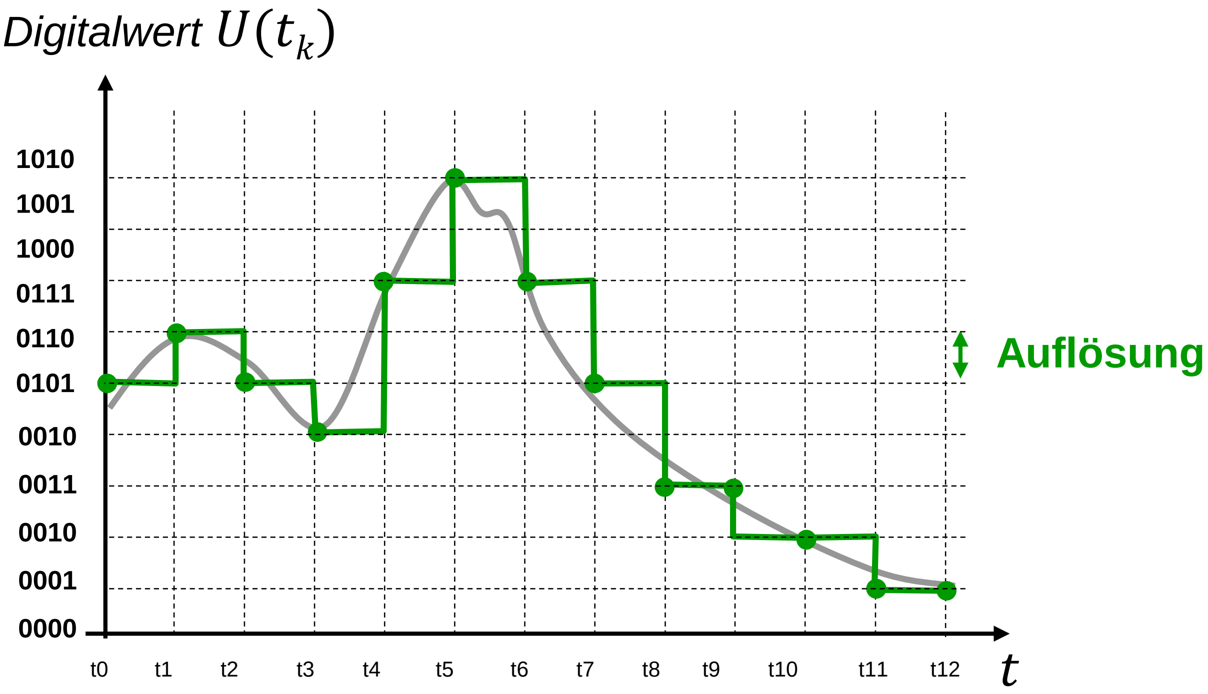
Analoges Signal
Zeit- und wertkontinuierlich



Abtastung (zeitliche Quantisierung)
Zeitdiskret und wertkontinuierlich

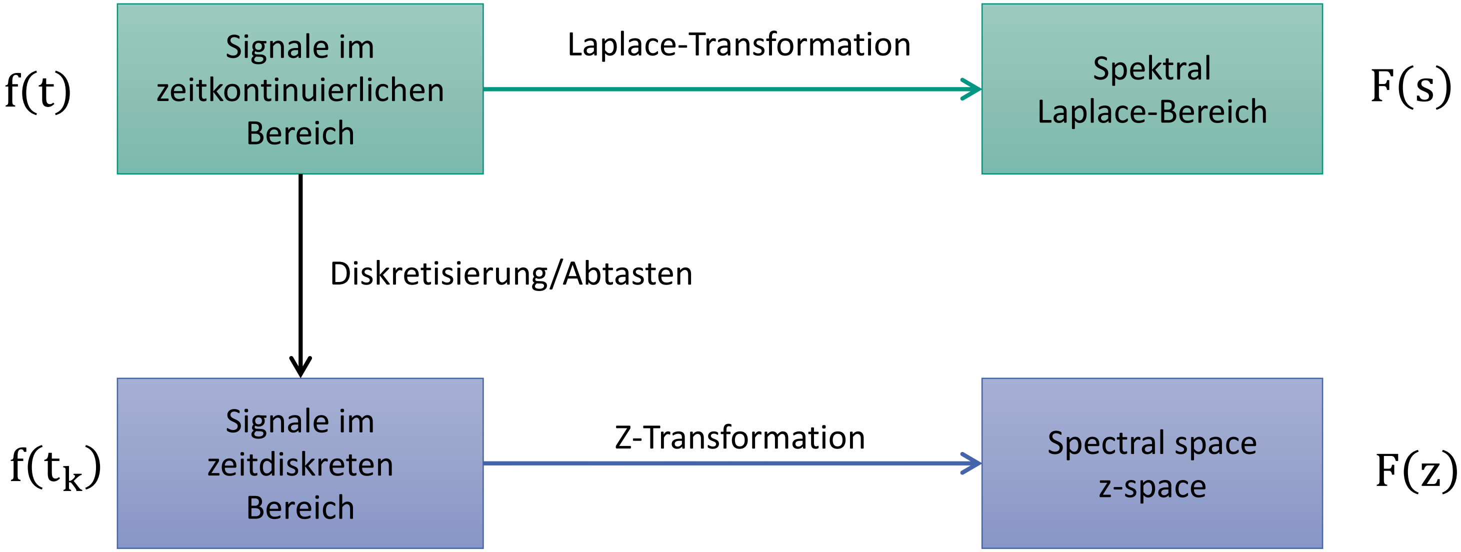
Kontinuierliche und diskrete Signale (3)

- Signal $U(t_k)$ mit einer endlichen Anzahl an unterschiedlichen Werten
- Wichtig: Signale mit zwei unterschiedlichen Werten



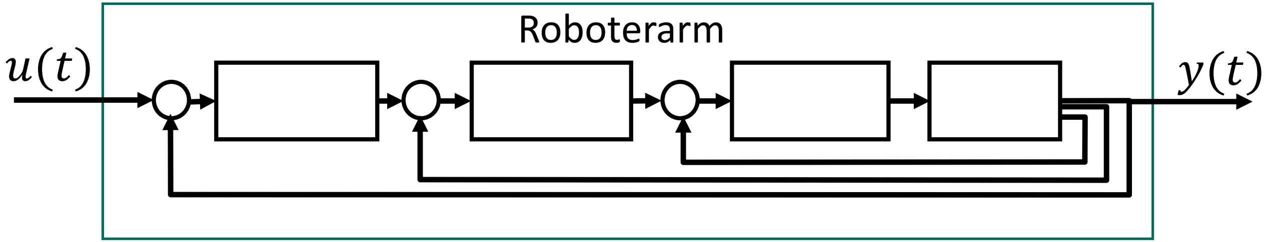
Amplituden-Quantisierung
Zeit- und wertdiskret

Beschreibung von Dynamischen Systemen



Grundlagen der Regelung

- Beispiel: Positionsregelung für einen Robotergelenk



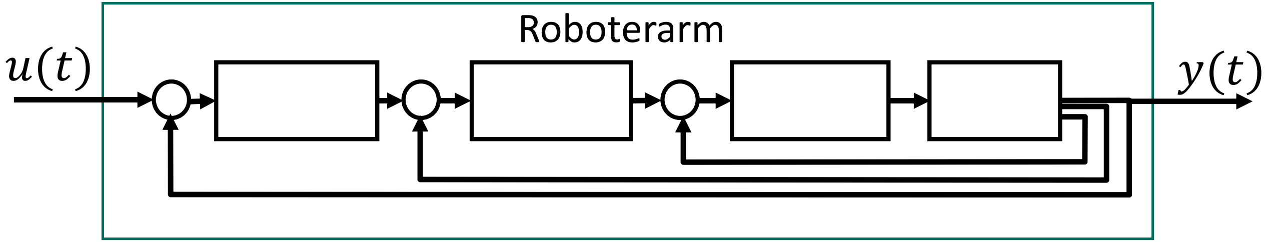
  - Eingabesignal $u(t)$: Gewünschte Position (Führungsgröße)
  - Ausgabesignal $y(t)$: Tatsächliche Position (Regelgröße)

- Ziel: Ausgabesignals bei gegebenem Eingabesignal beschreiben

- Vorgehen:
  1. Beschreibung des Systems mit Differentialgleichungen (bzw. Differenzengleichungen)
  2. Transformation in den Frequenzbereich (Laplace)
  3. Aufstellen der Übertragungsfunktion

Grundlagen der Regelung

- Beispiel: Positionsregelung für einen Robotergelenk



  - Eingabesignal $u(t)$: Gewünschte Position (Führungsgröße)
  - Ausgabesignal $y(t)$: Tatsächliche Position (Regelgröße)

- Transformation in den Frequenzbereich (**Laplace-Transformation**)

$$L[u(t)] = U(s), \qquad L[y(t)] = Y(s)$$

- **Übertragungsfunktion** $G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\text{Ausgang}}{\text{Eingang}}$

Übertragungsfunktion: Verwendung

- Transformation in den Frequenzbereich (**Laplace-Transformation**)

$$L[u(t)] = U(s) \qquad\qquad L[y(t)] = Y(s)$$

- **Übertragungsfunktion**

$$\mathrm{G(s)} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\text{Ausgang}}{\text{Eingang}}$$

- Die Übertragungsfunktion ist für den Reglerentwurf wichtig:
  - Analyse des Systemverhaltens bei unterschiedlichen Eingabesignalen
    ➔ Beispiel: Stabilitätsanalyse
  - Bestimmung der Reglerparameter
    ➔ Optimierung der Parameter für das gegebene System

Inhalt

- Einführung
- **Grundlagen der Regelung**
  - Einführung
  - **Laplace-Transformation**
  - Übertragungsglieder
  - Grundlegende Regelkreise
  - Stabilität einer Regelung
  - Testfunktionen
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

Laplace-Transformation

$$\boldsymbol{L\{f(t)\} = F(s) = \int_0^\infty f(t)e^{-st}dt} \qquad s := \sigma + j\omega; \quad f(t) = 0, t < 0$$

- Rechenvereinfachung:
  - Differential- und Integralausdrücke werden durch **algebraische Ausdrücke** ersetzt
- Gleichungslösung im **Frequenzbereich** statt im Zeitbereich
- Integral muss konvergieren - erfüllt für lineare $f(t)$

Laplace-Transformation

- Beispiel: $f(t) = a$

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathrm{F}(s) = \int_0^\infty f(t) \cdot e^{-st} dt$$

Laplace-Transformation

- Beispiel: $f(t) = a$

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathrm{F}(s) = \int_0^\infty f(t) \cdot e^{-st} dt$$

$$\mathcal{L}[a] = \int_0^\infty a \cdot e^{-st} dt = a \cdot \int_0^\infty e^{-st} dt$$

$$\mathcal{L}[a] = a \cdot \left[-\frac{1}{s} \cdot e^{-st}\right]_0^\infty = a \cdot \left(0 - \left(-\frac{1}{s} \cdot 1\right)\right)$$

$$\mathcal{L}[a] = \frac{a}{s}$$

Laplace-Transformation

- Beispiel: $f(t) = t$

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathrm{F}(s) = \int_0^\infty f(t) \cdot e^{-st} dt$$

$$\mathcal{L}[t] = \int_0^\infty t \cdot e^{-st} dt$$

$$\int_0^\infty u(t) \cdot v'(t)\, dt = u(t) \cdot v(t)|_0^\infty - \int_0^\infty u'(t) \cdot v(t) dt$$

Partielle Integration

$$u(t) = t,\ u'(t) = 1 \qquad v'^{(t)} = e^{-st},\ v(t) = -\frac{1}{s} \cdot e^{-st}$$

Laplace-Transformation

- Beispiel: $f(t) = t$

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathrm{F}(s) = \int_0^\infty f(t) \cdot e^{-st} dt$$

$$\mathcal{L}[t] = \int_0^\infty t \cdot e^{-st} dt$$

$$\int_0^\infty u(t) \cdot v'(t)\, dt = u(t) \cdot v(t)|_0^\infty - \int_0^\infty u'(t) \cdot v(t) dt$$

$$\mathcal{L}[t] = \left[t \cdot \left(-\frac{1}{s} \cdot e^{-st}\right)\right]_0^\infty - \int_0^\infty 1 \cdot \left(-\frac{1}{s} \cdot e^{-st}\right) dt$$

$$u(t) = t,\ u'(t) = 1$$
$$v'(t) = e^{-st}, v(t) = -\frac{1}{s} \cdot e^{-st}$$

$$\mathcal{L}[t] = (0\ - 0) - \left[\frac{1}{s^2} \cdot e^{-st}\right]_0^\infty = 0 - \left(0 - \frac{1}{s^2}\right) = \frac{1}{s^2}$$

Laplace-Transformation

- Ableitungsfunktion $\dot{f}(t)$

$$\int_a^b u(x) \cdot v'(x)\, dx = u(x) \cdot v(x)\Big|_a^b - \int_a^b u'(x) \cdot v(x) dx$$

$$\mathcal{L}[\dot{f}(t)] = \int_0^\infty e^{-st} \frac{df}{dt} dt =$$

Laplace-Transformation

- Ableitungsfunktion $\dot{f}(t)$

$$\int_a^b u(x)\cdot v'(x)\,dx = u(x)\cdot v(x)\Big|_a^b - \int_a^b u'(x)\cdot v(x)dx$$

$$\mathcal{L}[\dot{f}(t)] = \int_0^\infty e^{-st}\frac{df}{dt}dt = e^{-st}f(t)\Big|_0^\infty - \int_0^\infty -s\cdot e^{-st}f(t)dt$$

- Annahme: $\lim\limits_{t\to\infty} e^{-st}f(t) \to 0$

$$\mathcal{L}[\dot{f}(t)] = s\int_0^\infty e^{-st}f(t)dt - f(0) = s\cdot F(s) - f(0)$$

Laplace-Transformation

- Integral einer Funktion $\int_0^t f(\tau)\,d\tau$

$$\int_a^b u(x)v'(x)\,dx = u(x)v(x)\Big|_a^b - \int_a^b u'(x)v(x)dx$$

$$\mathcal{L}\left[\int_0^t f(\tau)\,d\tau\right]$$
$$= \int_0^\infty \int_0^t f(\tau)\,d\tau \cdot e^{-st}\,dt = \int_0^t f(\tau)\,d\tau \cdot \left[-\frac{1}{s}\cdot e^{-st}\right]_0^\infty$$
$$- \int_0^\infty \left(-\frac{1}{s}\right)\cdot e^{-st} f(t)dt = \frac{1}{s}\int_0^\infty f(t)\cdot e^{-st}\,dt = \frac{1}{s}\,F(s)$$

$$\boxed{\mathcal{L}\left[\int_0^t f(t)\,dt\right] = \frac{1}{s}\,F(s)}$$

Laplace-Transformation

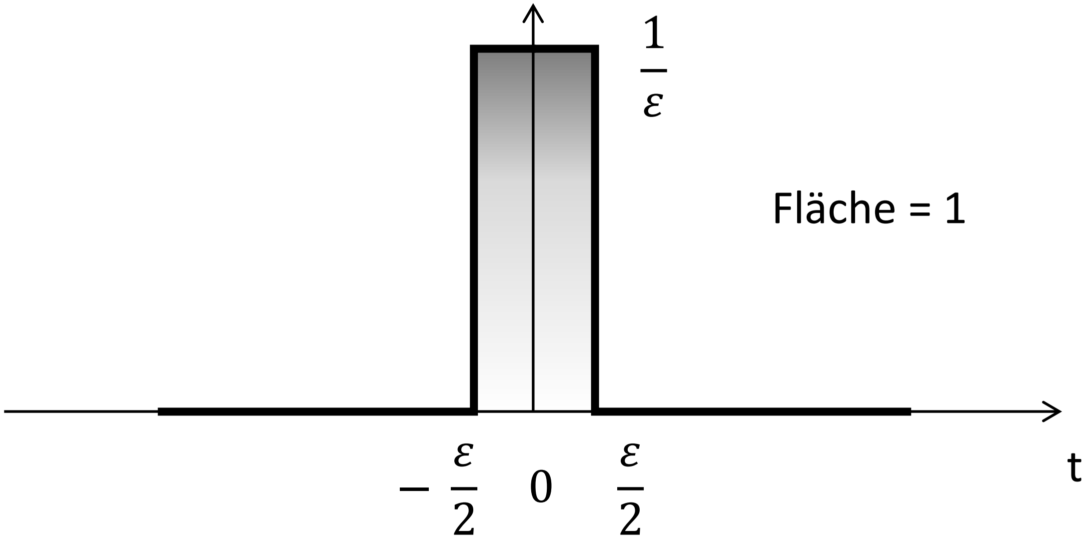
- Laplace-Transformation von $\mathrm{f(t)} = e^{-\alpha t}$

$$\mathcal{L}[e^{-\alpha t}] = \int_0^\infty e^{-\alpha t} \cdot e^{-st}\, dt = \int_0^\infty e^{-(s+\alpha)t}\, dt = \frac{1}{s+\alpha}$$

$$\boxed{\mathcal{L}[e^{-\alpha t}] = \frac{1}{s+\alpha}}$$

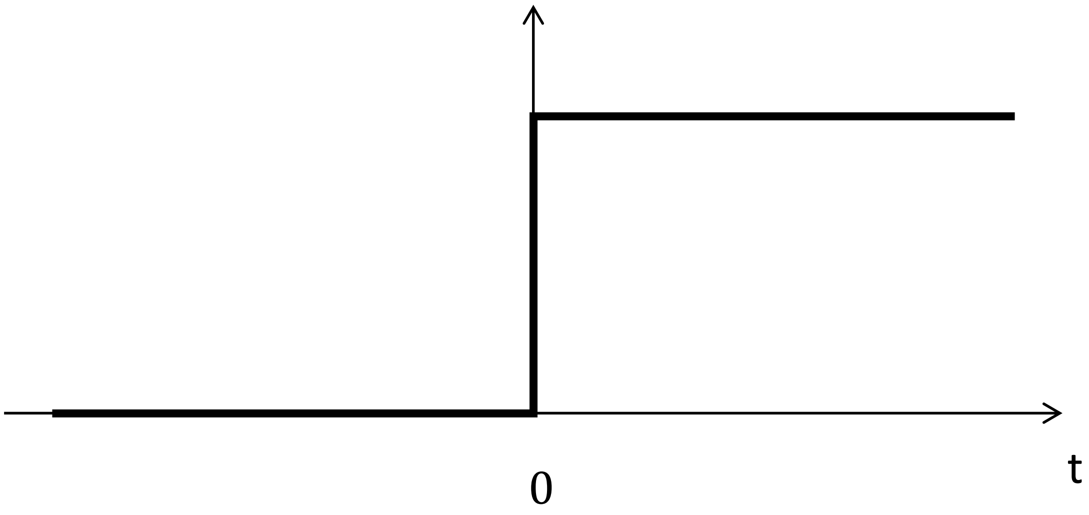
Impulsfunktion (Dirac-Impuls)

$$\partial(t) = \begin{cases} \infty & \text{, für } t = 0 \\ 0 & \text{, für } t \neq 0 \end{cases}$$



Einheitssprungfunktion

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0 & , \text{für } t < 0 \\ 1 & , \text{für } t \geq 0 \end{cases}$$



Laplace-Transformation

- Impulsfunktion (Dirac-Impuls) $\delta(t)$

$$\boxed{\mathcal{L}[\delta(t)] = \int_0^\infty \delta(t) \cdot e^{-st} dt = 1}$$

- Sprungfunktion $\sigma\,(t)$

$$\mathcal{L}[\sigma(t)] = \int_0^\infty \sigma(t) \cdot e^{-st}\, dt = \int_0^\infty 1 \cdot e^{-st}\, dt = \left[-\frac{1}{s} \cdot e^{-st}\right]_0^\infty$$

Wann konvergiert die Laplace-Transformation?

$$s = \delta + j\omega \Rightarrow e^{-st} = e^{-(\delta+j\omega)t} = e^{-\delta t} \cdot e^{-j\omega t}$$
$$= e^{-\delta t} \cdot (\cos \omega t - j \sin \omega t)$$

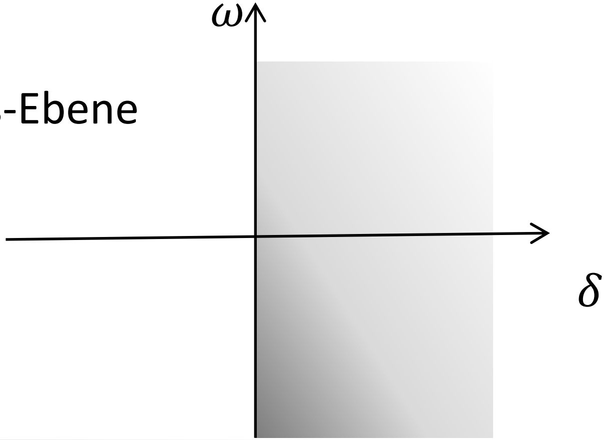
Laplace-Transformation der Sprungfunktion

$$e^{-\delta t} = \begin{cases} 0 & \text{für } \delta > 0 \quad \Rightarrow \text{Konvergenz (Schwingung klingt ab)} \\ 1 & \text{für } \delta = 0 \quad \Rightarrow \text{Keine Konvergenz (Dauerschwingung)} \\ -\infty & \text{für } \delta < 0 \quad \Rightarrow \text{Keine Konvergenz (Schwingung klingt auf)} \end{cases}$$

Laplace-Transformation von $\sigma\ (t)$ existiert nur für $\delta > 0$ bzw. $Re(s) > 0$
(Rechte Hälfte der komplexen Ebene)

$$\boxed{\mathcal{L}[\sigma(t)] = \frac{1}{s}}$$

s-Ebene



Laplace-Transformation: Regeln

- Linearitätssatz $L\{\alpha f_1(t) + \beta f_2(t)\} = \alpha F_1(s) + \beta F_2(s)$
- Faltungssatz: $L\{f_1(t) * f_2(t)\} = F_1(s) \cdot F_2(s)$
- Grenzwertsatz: $f(t = 0) = \lim_{s \to \infty} sF(s)$
- Differentiationssatz: $L\left\{\frac{d}{dt} f(t)\right\} = sF(s) - f(0)$
- Integrationssatz: $L\{\int f(t)dt\} = \frac{1}{s} F(s)$
- Verschiebung: $L\{f(t-\tau)\} = e^{-\tau s} F(s)$
- $L\{e^{\alpha t}\} = \frac{1}{s-\alpha}$ $\qquad$ $L\{t^n\} = \frac{n!}{s^{n+1}} \quad (n = 1{,}2 \ \dots)$
- $L\{\sin(\alpha t)\} = \frac{\alpha}{s^2 + \alpha^2}$ $\qquad$ $L\{cos(\alpha t)\} = \frac{s}{s^2 + \alpha^2}$

Laplace-Transformationstabellen (I)

Zeitbereich	Laplace-Bereich
$f(t)$	$\mathcal{L}\big(f(t)\big) = F(s)$
$f(t), g(t)$	$F(s), G(s)$
1	$1/s$
$e^{\alpha t}$	$1/(s-\alpha)$
$t^n e^{\alpha t}, n = 1,2,\ldots$	$n!/(s-a)^{n+1}$
t^n	$n!/s^{n+1}, n = 1,2,\ldots$
$t^{-\frac{1}{2}}$	$\sqrt{\pi/s}$
$\sin(\alpha t)$	$\alpha/(s^2+\alpha^2)$
$\cos(\alpha t)$	$s/(s^2+\alpha^2)$
$\sinh(kt)$	$k/(s^2-k^2)$
$\cosh(kt)$	$s/(s^2-k^2)$

Inhalt

- Einführung
- **Grundlagen der Regelung**
  - Laplace-Transformation
  - **Übertragungsglieder**
  - Grundlegende Regelkreise
  - Stabilität einer Regelung
  - Testfunktionen
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

Übertragungsglieder/funktionen

- Häufig Blöcke von folgendem Typ:
  - Lineares zeitinvariantes Übertragungsglied (LZI-Glied)

$$u(t) \longrightarrow \boxed{g(t)} \longrightarrow y(t)$$

  - Im komplexen s-Bereich:

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s)$$

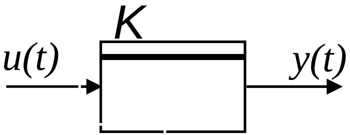
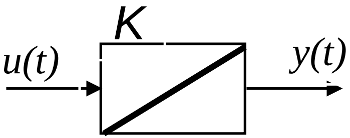
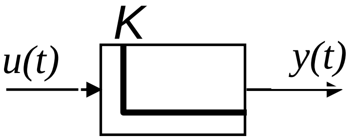
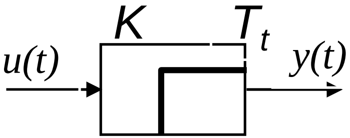
$G(s)$: **Übertragungsfunktion**

Faltungsregel der Laplace-Transformation

  - Im Zeitbereich:

$$y(t) \quad = \quad g(t) * u(t) = \int_0^t g(\tau) \cdot u(t-\tau) d\tau, \text{ für } t \geq 0$$

Elementare Übertragungsglieder (1)

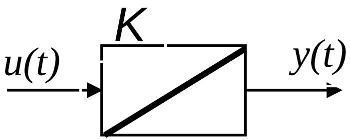
Benennung	Funktionalbeziehung	Symbol
P-Glied Proportionalglied	$y(t) = K \cdot u(t)$	
I-Glied Integrierglied	$y(t) = K \cdot \int_0^t u(\tau) d\tau$	
D-Glied Differenzierglied	$y(t) = K \cdot \dot{u}(t)$	
T_t-Glied Totzeit-Glied	$y(t) = K \cdot u(t - T_t)$	

Übertragungsfunktion eines I-Glieds

I-Glied

Integrierglied

$$y(t) = K \cdot \int_0^t u(\tau) d\tau$$

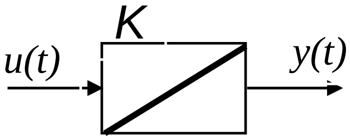


Übertragungsfunktion eines I-Glieds

I-Glied

Integrierglied

$$y(t) = K \cdot \int_0^t u(\tau)d\tau$$



Laplace:

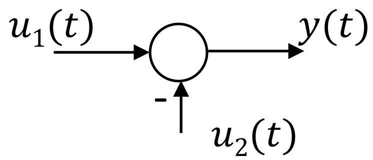
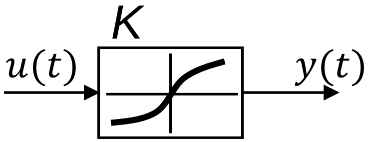
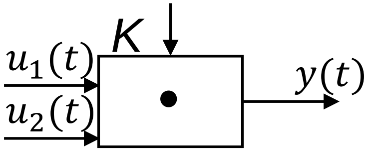
$$Y(s) = K \cdot \frac{1}{s} \cdot U(s) = \underbrace{\frac{K}{s}}_{G(s)} \cdot U(s)$$

Beispiel: $u(t) = \sigma(t)$, $\mathrm{U}(s) = \frac{1}{s}$ (Sprungfunktion)

$$Y(s) = \frac{K}{s} \cdot \frac{1}{s} = \frac{K}{s^2} \Rightarrow y(t) = K \cdot t$$

t^n	$n!/s^{n+1}, n = 1,2, \ldots$

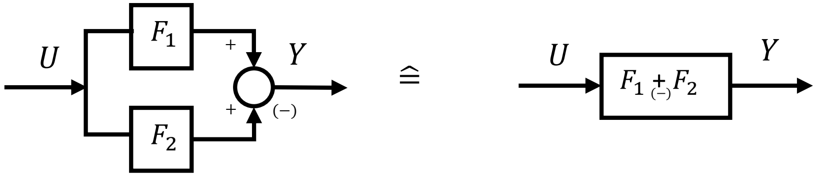
Elementare Übertragungsglieder (2)

Benennung	Funktionalbeziehung	Symbol
S-Glied Summenglied	$y(t) = \pm u_1(t) \pm u_2(t)$	
KL-Glied Kennlinienglied	$y(t) = K \cdot f(u(t))$	
M-Glied Multiplizierglied	$y(t) = K \cdot u_1(t) u_2(t)$	

Übertragungsglieder: Regeln

Umformregeln für Wirkungspläne

1)



$$Y(s) = (F_{1(s)} \pm F_{2(s)})U(s)$$

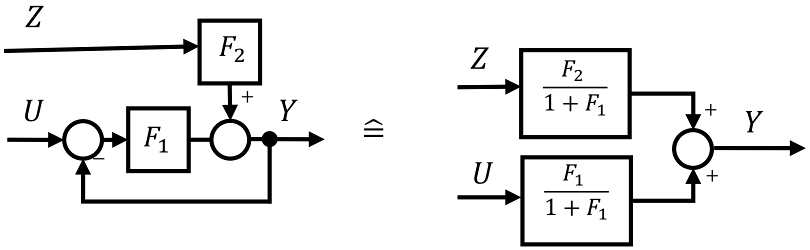
2)

$$Y(s) = (F_{1(s)} \cdot F_{2(s)})U(s)$$

3)

$$Y(s) = \left(\frac{F(s)}{1+F(s)}\right)U(s)$$

4)



$$Y(s) = \frac{F_1(s)}{1+F_1(s)} \cdot U(s) + \frac{F_2(s)}{1+F_1(s)} \cdot Z(s)$$

Übertragungsglieder: Regeln

Umformregeln für Wirkungspläne

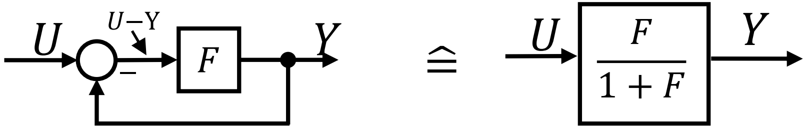
3)

$$Y(s) = \left(\frac{F(s)}{1 + F(s)}\right) U(s)$$

Übertragungsglieder: Regeln

Umformregeln für Wirkungspläne

3)



$$Y(s) = \left(\frac{F(s)}{1+F(s)}\right) U(s)$$

$$Y(s) = F(s) \cdot \big(U(s) - Y(s)\big)$$

$$Y(s) + F(s) \cdot Y(s) = F(s) \cdot U(s)$$

$$Y(s) \cdot \big(1 + F(s)\big) = F(s) \cdot U(s)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{F(s)}{1+F(s)}$$

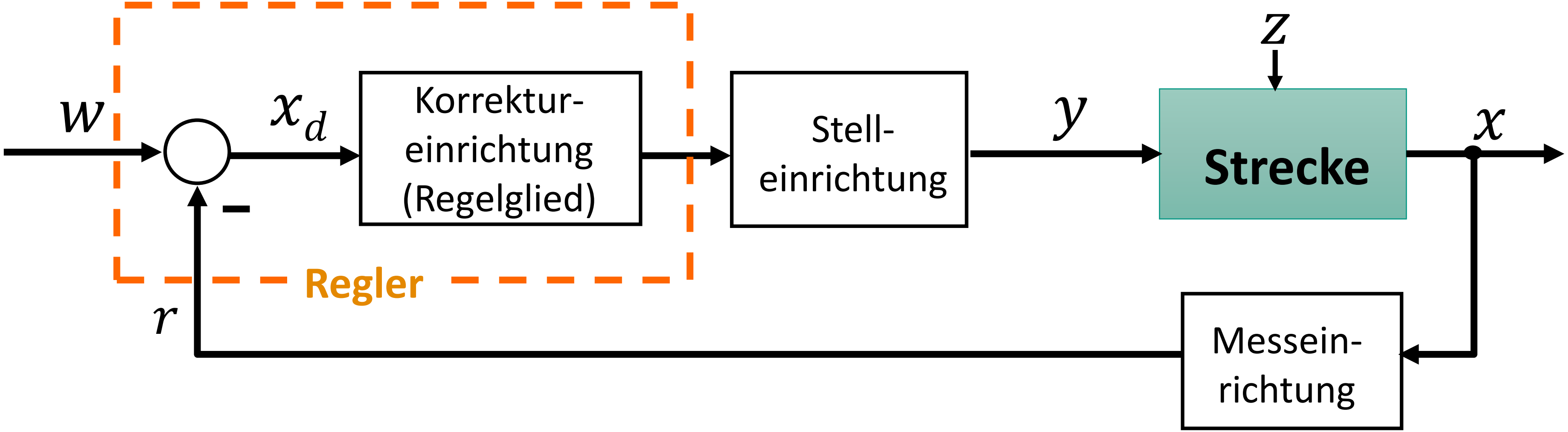
Recap

- Definition einer Regelung
- Laplace-Transformation
- Übertragungsfunktion
- Übertragungsglieder

Erstellung des Strukturbildes des Regelkreis

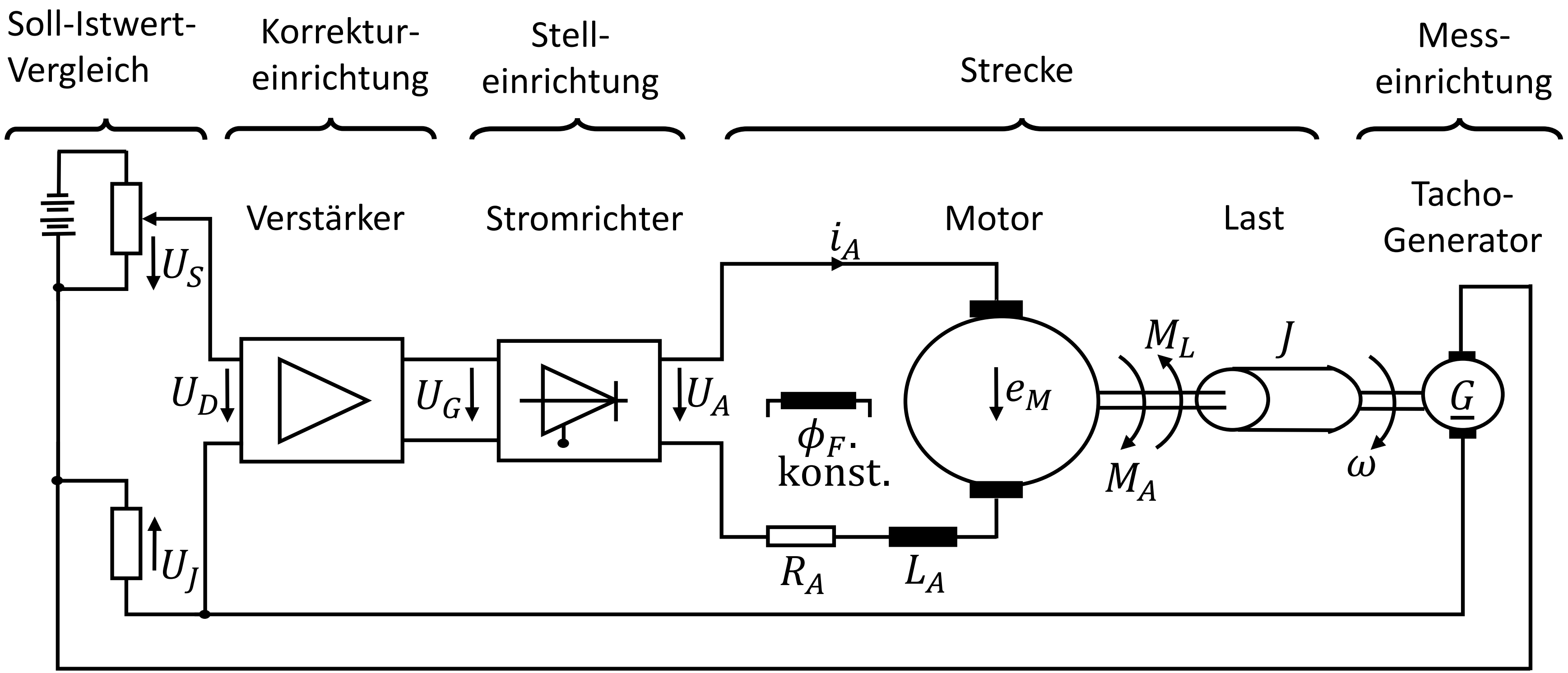
- Strukturbild einer Regelung
  - Aus den physikalischen Gesetzen ermittelt man **Gleichungen (Differential oder Differenzengleichungen), die Beziehungen zwischen zeitveränderlichen Größen** des Systems beschreiben
  - Die zeitveränderlichen Größen und ihre Gleichungen werden durch geeignete Symbole veranschaulicht
  - Ein Block des Strukturbildes ordnet jedem Zeitverlauf der Eingangsgröße eindeutig ein Zeitverlauf der Ausgangsgröße zu, und wirkt somit als **Übertragungsglied**

Struktur eines Regelkreises

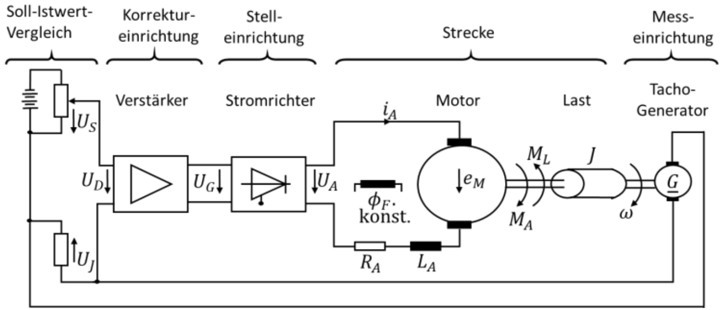


w	Führungsgröße	x_d	Regeldifferenz
y	Stellgröße	x	Regelgröße
r	Rückführgröße	z	Störgröße

Beispiel: Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors



Gleichungen der Drehzahlregelung



- Ankerkreis des Motors

$u_R = u_A - e_M$ — e_M = Gegen EMK

$e_M = K_F \cdot \omega$ — K_F = Feldkonstante

$$u_R = u_A - e_M = R_A \cdot i_A + L_A \cdot \dot{i}_A \quad \rightarrow \quad \frac{L_A}{R_A} \dot{i}_A + i_A = \frac{1}{R_A} u_A$$

- Mechanische Bewegung des Ankers mit Last

$J \cdot \dot{\omega} = M_B$ — J = Trägheitsmoment von Anker und Last; M_B = Beschleunigungsmoment

$M_B = M_A - M_L$ — M_A = Ankermoment des Motors; M_L = Lastmoment des Motors

$M_A = K_F \cdot i_A$

- Stromrichter: $T_{ST} \cdot \dot{u}_A + u_A = K_{ST} \cdot u_G$
- Elektrischer Verstärker: $u_G = K_V \cdot u_D$
- Tachogenerator: $u_J = K_J \cdot \omega$

Verwandlung der DGLen in gewöhnliche Gleichungen

Karlsruher Institut für Technologie

- Ankerkreis des Motors

  $u_R = u_A - e_M$ $\quad$ e_M = Gegen-EMK

  $e_M = K_F \cdot \omega$ $\quad$ K_F = Feldkonstante

  $u_R = u_A - e_M = R_A \cdot i_A + L_A \cdot \dot{i}_A \quad \rightarrow \quad \frac{L_A}{R_A}\dot{i}_A + i_A = \frac{1}{R_A}u_R$

- Mechanische Bewegungs des Ankers mit Last

  $J \cdot \dot{\omega} = M_B$ $\quad$ J = Trägheitsmoment von Anker und Last

  M_B = Beschleunigungsmoment

  $M_B = M_A - M_L$ $\quad$ M_A = Ankermoment des Motors

  M_L = Lastmoment des Motors

  $M_A = K_F \cdot i_A$

- Stromrichter: $T_{ST} \cdot \dot{u}_A + u_A = K_{ST} \cdot u_G$

- Elektrischer Verstärker: $u_G = K_V \cdot u_D$

- Tachogenerator: $u_J = K_J \cdot \omega$

Differentialgleichungen (DGLen)

Wie?

Mit Laplace Transformation

H2T

Lapalce Transformation

$$\frac{L_A}{R_A}\,\dot{i}_A + i_A = \frac{1}{R_A} u_R$$

$$\Big\downarrow \mathcal{L}$$

$$\mathcal{L}[\dot{f}(t)] = s\int_0^\infty e^{-st} f(t)dt - f(0) = s \cdot F(s) - f(0)$$

$$\mathcal{L}[\dot{i}_A(t)] = s\,I_A(s) - i_A(0) \qquad i_A(0) = 0$$

$$\frac{L_A}{R_A}\, s \cdot I_A(s) + I_A(s) = \frac{1}{R_A} U_R(s)$$

$$\left(\frac{L_A}{R_A} \cdot s + 1\right) \cdot I_A(s) = \frac{1}{R_A} U_R(s) \quad \rightarrow \quad I_A(s) = \underbrace{\frac{\frac{1}{R_A}}{1 + \frac{L_A}{R_A} \cdot s}} \cdot U_R(s)$$

$$\boxed{Y(s) = G(s) \cdot U(s)}$$

$G(s)$: Übertragungsfunktion

Lapalace Transformation

$$J \cdot \dot{\omega} = M_B$$

$$\omega\,(t) = \int \frac{1}{J} \cdot M_B(t)\, dt$$

$$\Big\downarrow \mathcal{L}$$

$$\omega\,(s) = \underbrace{\frac{1}{J} \cdot \frac{1}{s}} \cdot M_B\,(s)$$

$$\boxed{Y(s) \;=\; G(s) \cdot\; U(s)}$$

$$\boxed{\mathcal{L}\left[\int_0^t f(t)\, dt\right] = \frac{1}{s}\, F(s)}$$

Lapalace Transformation

Entsprechend

$$\mathcal{L}[\dot{f}(t)] = s\int_0^\infty e^{-st} f(t)dt - f(0) = s \cdot F(s) - f(0)$$

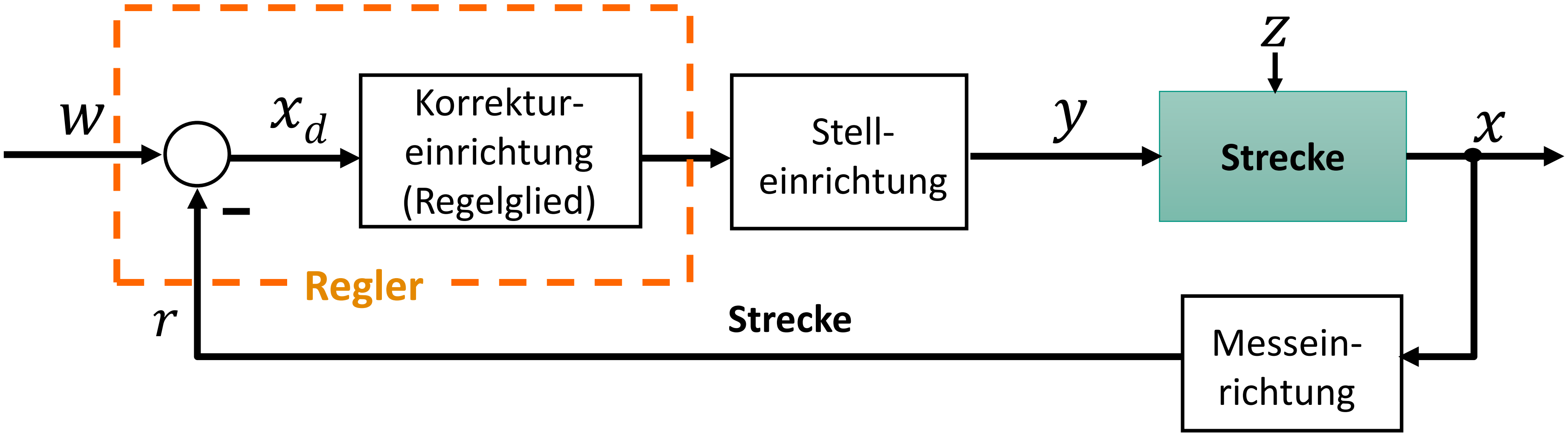
$$T_{ST} \cdot \dot{u}_A + u_A = K_{ST} \cdot u_G$$

$$\Big\downarrow \mathcal{L}$$

$$U_A(s) = \underbrace{\frac{K_{ST}}{1+\ T_{ST} \cdot s}} \cdot U_G(s)$$

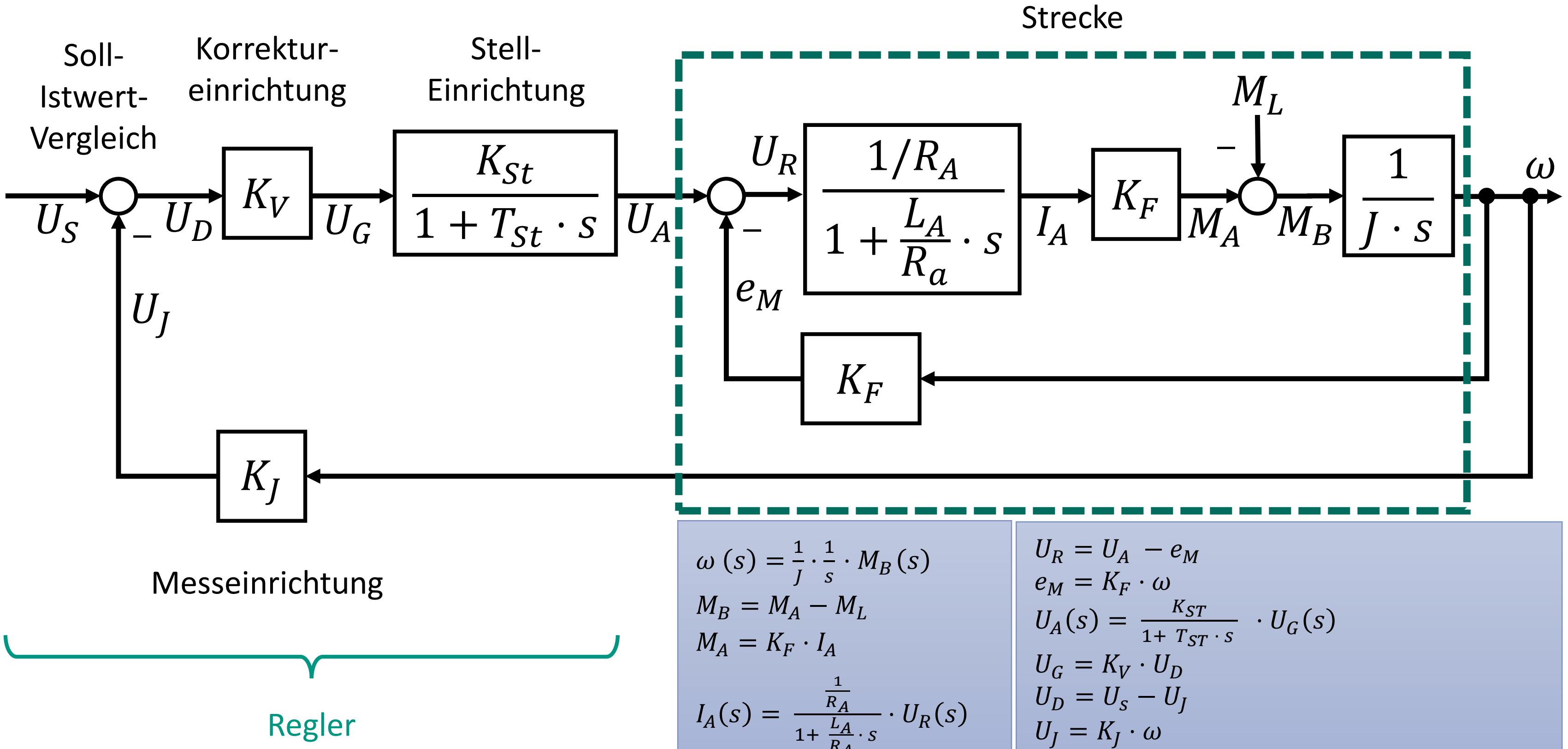
$$\boxed{Y(s) = G(s) \cdot U(s)}$$

Aufbau einer Regelung



w	Führungsgröße	x_d	Regeldifferenz
y	Stellgröße	x	Regelgröße
r	Rückführgröße	z	Störgröße

Regelkreis - Drehzahlregelung



$$\omega\,(s) = \frac{1}{J} \cdot \frac{1}{s} \cdot M_B(s)$$
$$M_B = M_A - M_L$$
$$M_A = K_F \cdot I_A$$
$$I_A(s) = \frac{\frac{1}{R_A}}{1 + \frac{L_A}{R_A} \cdot s} \cdot U_R(s)$$

$$U_R = U_A - e_M$$
$$e_M = K_F \cdot \omega$$
$$U_A(s) = \frac{K_{ST}}{1 + T_{ST} \cdot s} \cdot U_G(s)$$
$$U_G = K_V \cdot U_D$$
$$U_D = U_s - U_J$$
$$U_J = K_J \cdot \omega$$

Recap

- Einführung
- Grundlagen der Regelung
  - Laplace-Transformation
  - Übertragungsglieder
  - Grundlegende Regelkreise
  - Stabilität einer Regelung
  - Testfunktionen
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

Heute

- Einführung
- Grundlagen der Regelung
  - Laplace-Transformation
  - Übertragungsglieder
  - Grundlegende Regelkreise
  - Stabilität einer Regelung
  - Testfunktionen
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

Inhalt

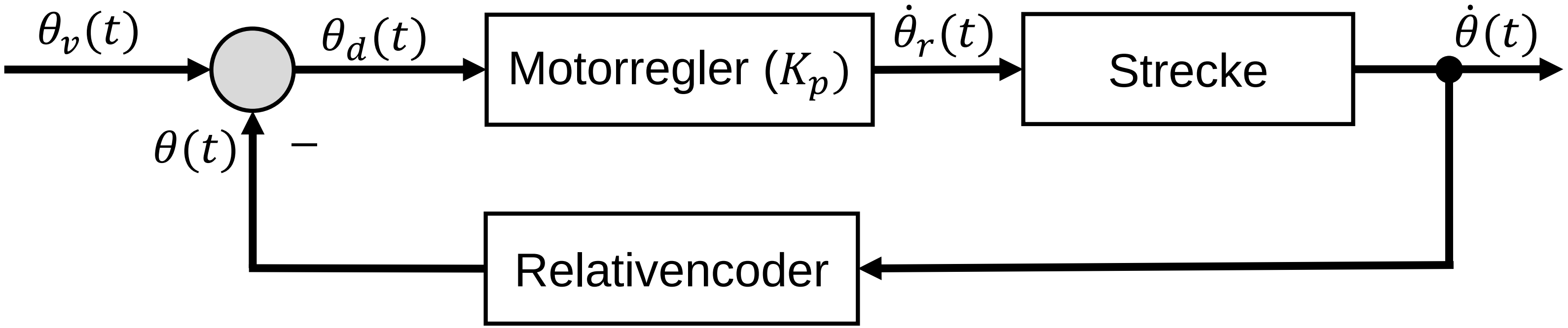
- Einführung
- **Grundlagen der Regelung**
  - Laplace-Transformation
  - Übertragungsglieder
  - **Grundlegende Regelkreise**
  - Stabilität einer Regelung
  - Testfunktionen
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

Geschwindigkeitsregelung

- Im Gelenkraum: Kontinuierliche Vorgabe von Gelenkgeschwindigkeiten
- **Proportionale Regelung** mit Faktor K_p

$$\dot{\theta}_r(t) = K_p \cdot \big(\theta_v(t) - \theta(t)\big)$$

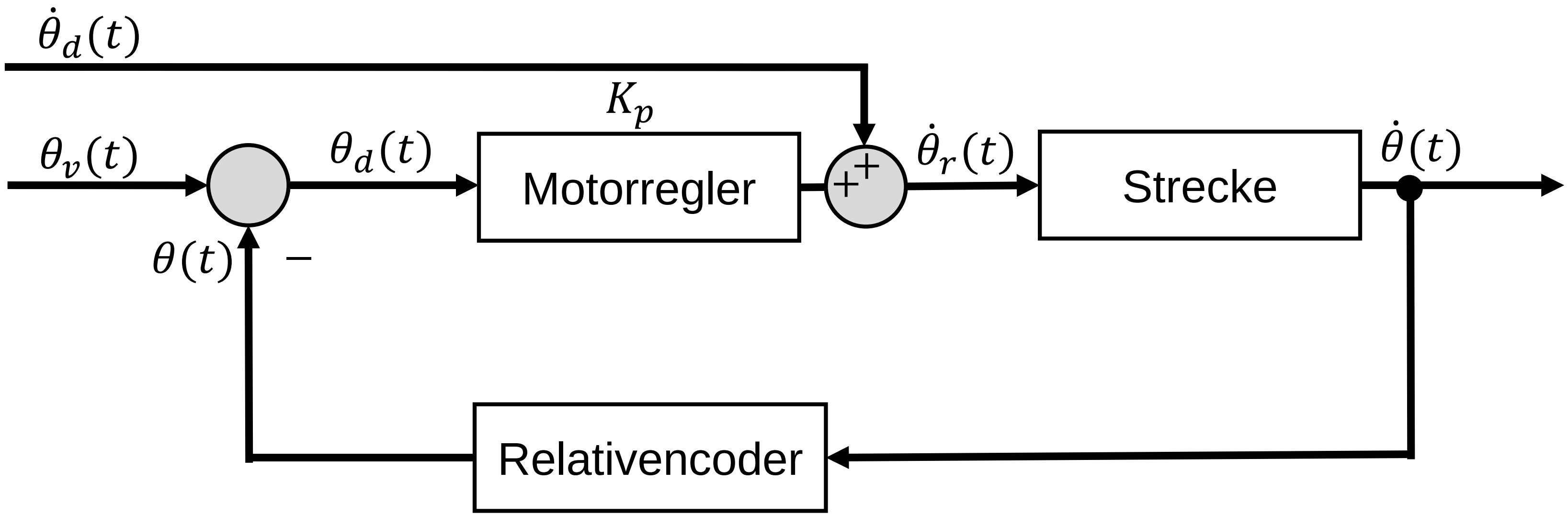
- Eigenschaft: Wenn $\theta_d = 0$ bewegt sich das Gelenk nicht.



Vorsteuerung

- Geschwindigkeitsvorgabe auch wenn $\theta_d = 0$ ist.

$$\dot{\theta}_r(t) = K_p \cdot \big(\theta_v(t) - \theta(t)\big) + \dot{\theta}_d(t)$$

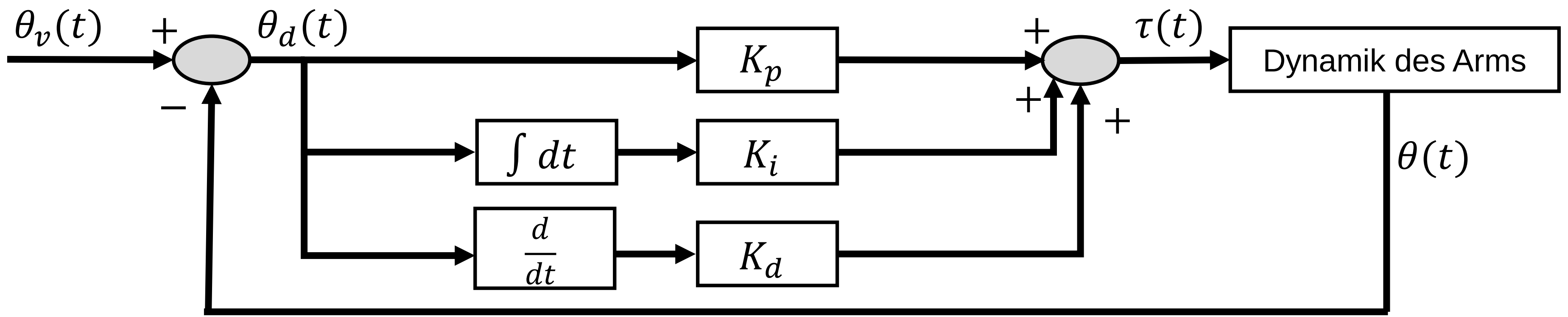


PID-Regler

- **Proportional-Integral-Derivative** Controller

$$\tau(t) = K_p\theta_d(t) + K_i\int \theta_d(t)dt + K_d\dot{\theta}_d(t)$$

- K_p: „virtuelle Feder“, die den Positionsfehler reduziert
- K_d: „virtuelle Dämpfer“, der den Geschwindigkeitsfehler reduziert
- K_i: reduziert Regelabweichungen (Offsets)



Laplace-Transformation des PID-Reglers

$$\tau(t) = K_P\theta_d(t) + K_I\int \theta_d(t)dt \ + K_D\frac{d}{dt}\theta_d(t)$$

$$\Big\downarrow \ \mathcal{L}$$

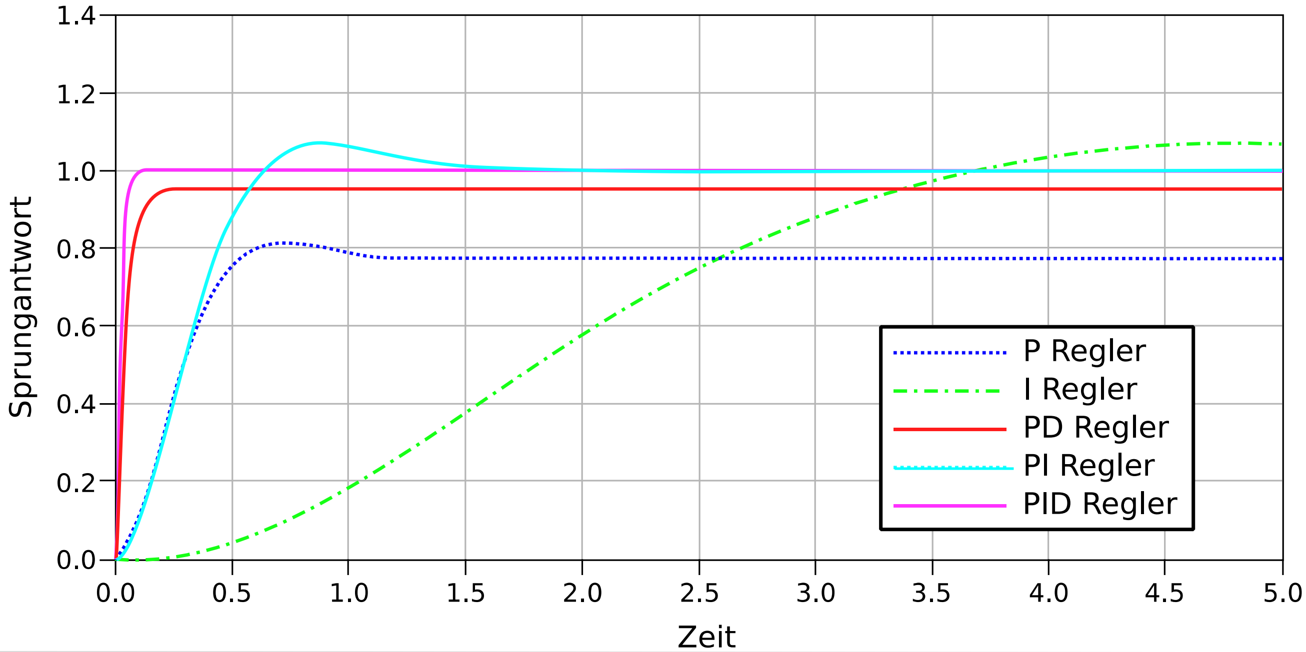
$$\tau(s) = K_P \cdot \theta_d(s) + K_I\frac{1}{s} \cdot \theta_d(s) + K_D s \cdot \theta_d(s)$$

$$\frac{\tau(s)}{\theta_d(s)} = G(s) = K_P + K_I\frac{1}{s} + K_D s$$

$$\frac{\text{Ausgang}}{\text{Eingang}} = \text{Übertragungsfunktion}$$

PID-Regelung

Vergleich von P-, I-, PD-, PI- und PID-Regler in einem Regelkreis mit
PT2-Glied als Regelstrecke (lineares zeit-invariantes Verzögerungsglied 2. Ordnung)



I-Anteil:
Regelabweichungen kompensieren (stationäre Genauigkeit)

D-Anteil:
Dynamik (wie schnell)

Klassische Reglertypen

- PID-Regler (und Unterklassen)
  - sehr verbreitet, da für nahezu alle Prozesstypen geeignet, robust und mit geringem Aufwand realisierbar
  - **Charakteristische Gleichung:**

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_N} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_V \frac{d}{dt} e(t) \right)$$

    - P-Anteil: günstiges Regelverhalten
    - I-Anteil: stationäre Genauigkeit
    - D-Anteil: schnelle Ausregelung

mit T_N = Nachstellzeit, T_V =Vorhaltzeit

Inhalt

- Einführung
- **Grundlagen der Regelung**
  - Laplace-Transformation
  - Übertragungsglieder
  - Grundlegende Regelkreise
  - **Stabilität einer Regelung**
  - Testfunktionen
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

Beispiel: 1-DoF Drehmomentregelung

- **Dynamisches Robotermodell** wird in die Regelung miteinbezogen
- Dynamische Gleichung für 1-DoF Arm (planare Rotation, keine Gravitation):

$$\tau = M\ddot{\theta} + b\dot{\theta}$$

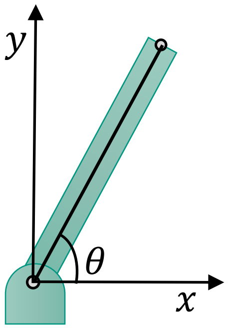
- **Ziel:**
  Festpunkregler (Wert konstant halten) als PD-Regler realisieren.

  Sollwert (Vorgabe): $\boldsymbol{\theta_v = const}$

- PD-Regler

$$\tau = K_p\theta_d + K_d\dot{\theta}_d$$

τ: Drehmoment des Motors
M: Inertialtensor
b: Reibung



Stabilität: 1-DoF Drehmomentregelung (1)

- System (Strecke)

$$\tau = M\ddot{\theta} + b\dot{\theta}$$

- Regler

$$\tau = K_p\theta_d + K_d\dot{\theta}_d$$

- Für uns relevant: Regeldifferenz $\theta_d = \theta_v - \theta$ $\quad (\theta_v = const)$

$$\theta = \theta_v - \theta_d, \qquad \dot{\theta} = -\dot{\theta}_d, \qquad \ddot{\theta} = -\ddot{\theta}_d$$

Stabilität: 1-DoF Drehmomentregelung (1)

- System (Strecke)

$$\tau = M\ddot{\theta} + b\dot{\theta}$$

- Regler

$$\tau = K_p\theta_d + K_d\dot{\theta}_d$$

- Für uns relevant: Regeldifferenz $\theta_d = \theta_v - \theta \quad (\theta_v = const)$

$$\theta = \theta_v - \theta_d, \qquad \dot{\theta} = -\dot{\theta}_d, \qquad \ddot{\theta} = -\ddot{\theta}_d$$

- Gleichsetzen gibt Differentialgleichung:

$$K_p\theta_d + K_d\dot{\theta}_d = M\ddot{\theta} + b\dot{\theta}$$
$$K_p\theta_d + K_d\dot{\theta}_d = -M\ddot{\theta}_d - b\dot{\theta}_d$$
$$M\ddot{\theta}_d + (K_d + b)\dot{\theta}_d + K_p\theta_d = 0$$
$$\ddot{\theta}_d + \frac{(K_d + b)}{M} \cdot \dot{\theta}_d + \frac{K_p}{M} \cdot \theta_d = 0$$

DGL 2. Ordnung: Kann mit Hilfe der Laplace-Transformation gelöst werden

Stabilität: 1-DoF Drehmomentregelung (Rechenweg)

$\theta_v = const \qquad \dot{\theta}_v = 0 \qquad \ddot{\theta}_v = 0$

$\theta_d = \theta_v - \theta \qquad \dot{\theta}_d = -\dot{\theta} \qquad \ddot{\theta}_d = -\ddot{\theta}$

$$M\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = K_p(\theta_v - \theta) + K_d(\dot{\theta}_v - \dot{\theta})$$

$$M(-\ddot{\theta}_d) + b(-\dot{\theta}_d) = K_p\theta_d + K_d\left(0 - (-\dot{\theta}_d)\right)$$

$$-M\ddot{\theta}_d - b\dot{\theta}_d = K_p\theta_d + K_d\dot{\theta}_d$$

$$-M\ddot{\theta}_d - b\dot{\theta}_d - K_d\dot{\theta}_d - K_p\theta_d = 0 \qquad | -K_d\dot{\theta}_d - K_p\theta_d$$

$$-M\ddot{\theta}_d - (K_d + b)\dot{\theta}_d - K_p\theta_d = 0 \qquad | \cdot \left(-\frac{1}{M}\right)$$

$$\ddot{\theta}_d + \frac{(K_d + b)}{M}\dot{\theta}_d + \frac{K_p}{M}\theta_d = 0$$

Stabilität: 1-DoF Drehmomentregelung (2)

- Beschreibung des System mit DGL:

$$\ddot{\theta}_d + \frac{(K_d + b)}{M} \cdot \dot{\theta}_d + \frac{K_p}{M} \cdot \theta_d = 0$$

- Harmonische Schwingung:

$$\ddot{\theta}_d + 2\zeta\omega_n\dot{\theta}_d + \omega_n^2\,\theta_d = 0$$

  - ζ: Dämpfung
  - ω_n: Eigenfrequenz

- Für die 1-DoF Drehmomentregelung:

$$\zeta = \frac{b + \boldsymbol{K_d}}{2\sqrt{\boldsymbol{K_p} M}}, \qquad \omega_n = \sqrt{\frac{\boldsymbol{K_p}}{M}}$$

Stabilität: 1-DoF Drehmomentregelung (3)

- Harmonische Schwingung:

$$\ddot{\theta}_d + 2\zeta\omega_n\dot{\theta}_d + \omega_n^2\,\theta_d = 0$$

- Laplace-Transformation:

Stabilität: 1-DoF Drehmomentregelung (3)

- Harmonische Schwingung:

$$\ddot{\theta}_d + 2\zeta\omega_n\dot{\theta}_d + \omega_n^2\,\theta_d = 0$$

- Laplace-Transformation:

$$s^2 \cdot \mathcal{L}[\theta_d] + 2\zeta\omega_n \cdot s \cdot \mathcal{L}[\theta_d] + \omega_n^2 \cdot \mathcal{L}[\theta_d] = 0$$
$$(s^2 + 2\zeta\omega_n \cdot s + \omega_n^2) \cdot \mathcal{L}[\theta_d] = 0$$

- Zwei Lösungen (abgesehen von der trivialen Lösung $\mathcal{L}[\theta_d] = 0$)

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

Stabilität: 1-DoF Drehmomentregelung (4)

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

- 3 mögliche **Lösungstypen**
  - $\zeta > 1$: **aperiodische Lösung:** zwei reelle unterschiedliche Lösungen

    $$\theta_d(t) = c_1 e^{s_1 t} + c_2 e^{s_2 t}$$

    Zielwert wird ohne zu schwingen (langsam) über die Exponentialfunktion erreicht

  - $\zeta = 1$: **aperiodischer Grenzfall:** zwei reelle identische Lösungen ($s_{1,2} = -\zeta\omega_n$)

    $$\theta_d(t) = (c_1 + c_2 t)e^{-\zeta\omega_n t}$$

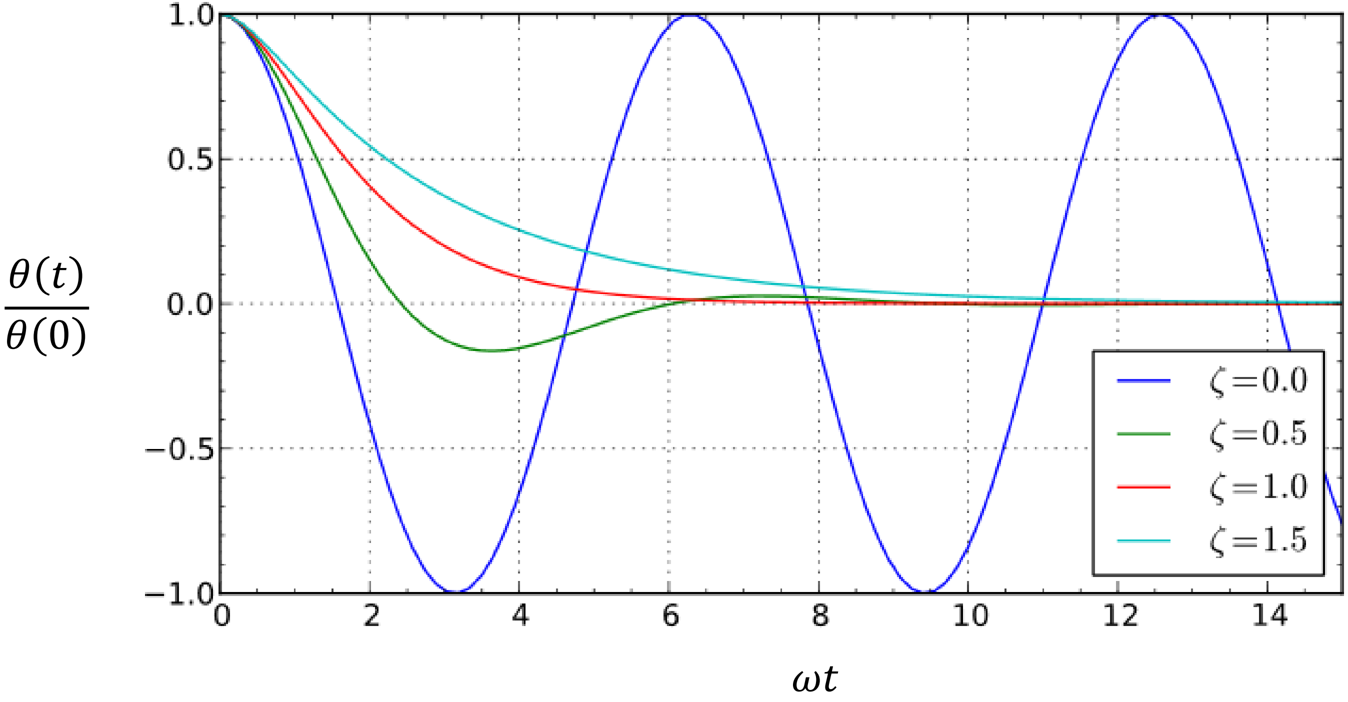
    Der Zielwert wird schnell erreicht, und das System überschwingt gerade nicht

  - $\zeta < 1$: **gedämpfte Schwingung:** zwei komplexe Lösungen

    $$\theta_d(t) = (c_1 \cos(\omega_n t) + c_2 \sin(\omega_n t))e^{-\zeta\omega_n t}$$

    Das System überschwingt

Stabilität: 1-DoF Drehmomentregelung (5)



Stabilität: 1-DoF Drehmomentregelung (6)

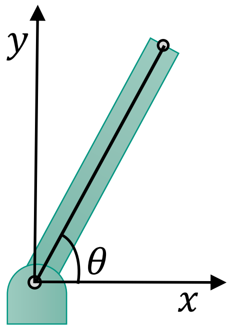
- Dämpfung ζ wird nach Anwendungsfall gewählt
- Hier: Kein Überschwingen gewünscht $\Rightarrow \zeta = 1$

$$\zeta = \frac{b + \boldsymbol{K_d}}{2\sqrt{\boldsymbol{K_p} M}}, \qquad \omega_n = \sqrt{\frac{\boldsymbol{K_p}}{M}}$$

- Parameter für den PD-Regler:

$$1 = \frac{b + \boldsymbol{K_d}}{2\sqrt{\boldsymbol{K_p} M}} \quad \rightarrow \quad 2\sqrt{\boldsymbol{K_p} M} = b + \boldsymbol{K_d}$$

$$\boldsymbol{K_d} = 2\sqrt{\boldsymbol{K_p} M} - b$$



Inhalt

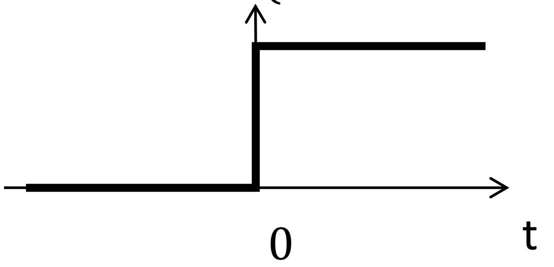
- Einführung
- **Grundlagen der Regelung**
  - Laplace-Transformation
  - Übertragungsglieder
  - Grundlegende Regelkreise
  - Stabilität einer Regelung
  - **Testfunktionen**
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

Testfunktionen (1)

- Impulsfunktion
- **Sprungfunktion**
- Anstiegsfunktion
- Harmonische Funktion
- Wird die Ausgangsgröße auf die Eingangsgröße bezogen, so entsteht die normierte Sprungantwort $h(t)$ (Übertragungsfunktion der Regelstrecke).

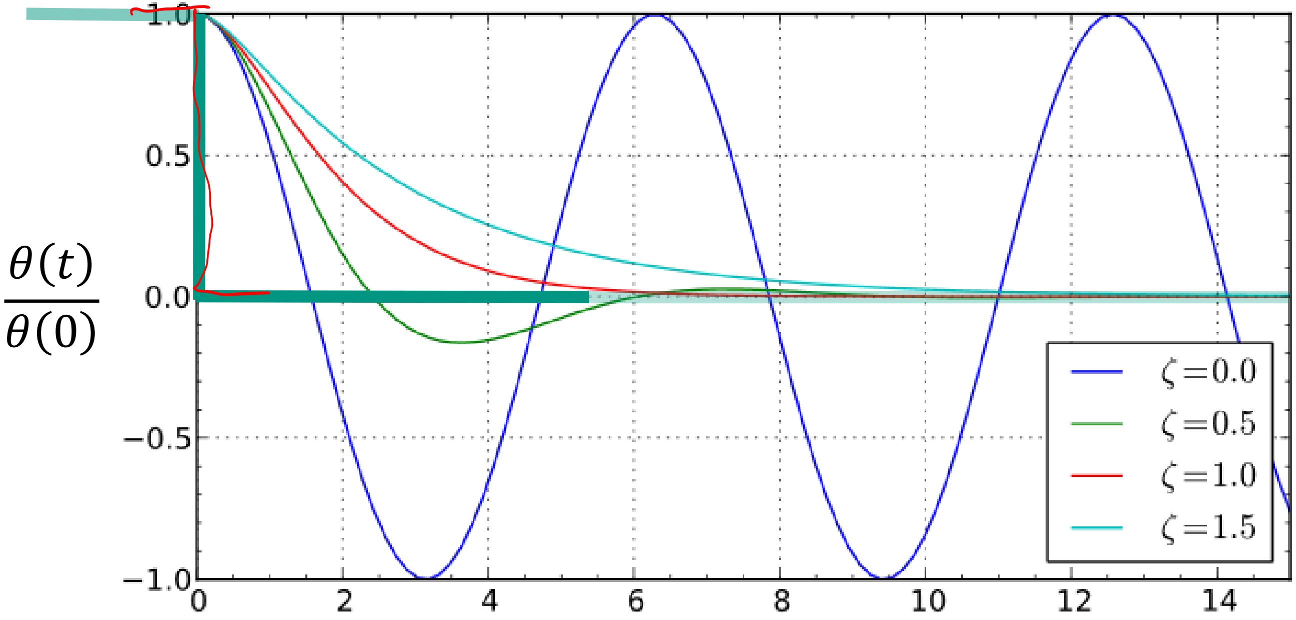
$$x_e(t) = -x_{e_0} E(t),$$

$$E(t) = \begin{cases} 0 \text{ für } t \leq 0 \\ 1 \text{ für } t > 0 \end{cases}$$



Testfunktionen (2)

- Sprungfunktion bei $t = 0$

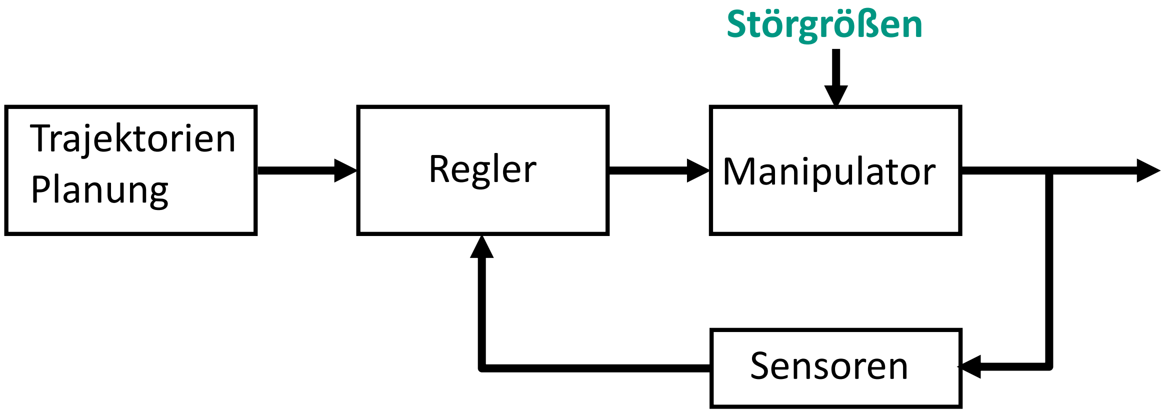


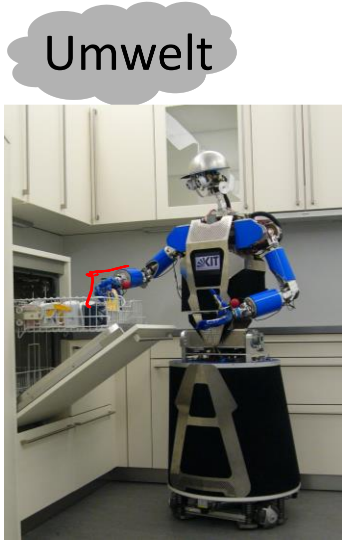
Inhalt

- Einführung
- Grundlagen der Regelung
  - Einführung
  - Laplace-Transformation
  - Übertragungsglieder
  - Grundlegende Regelkreise
  - Stabilität einer Regelung
  - Testfunktionen
- **Regelungskonzepte für Manipulatoren**

Regelung von Manipulatoren

- Blockschaltbild einer Manipulator-Regelung



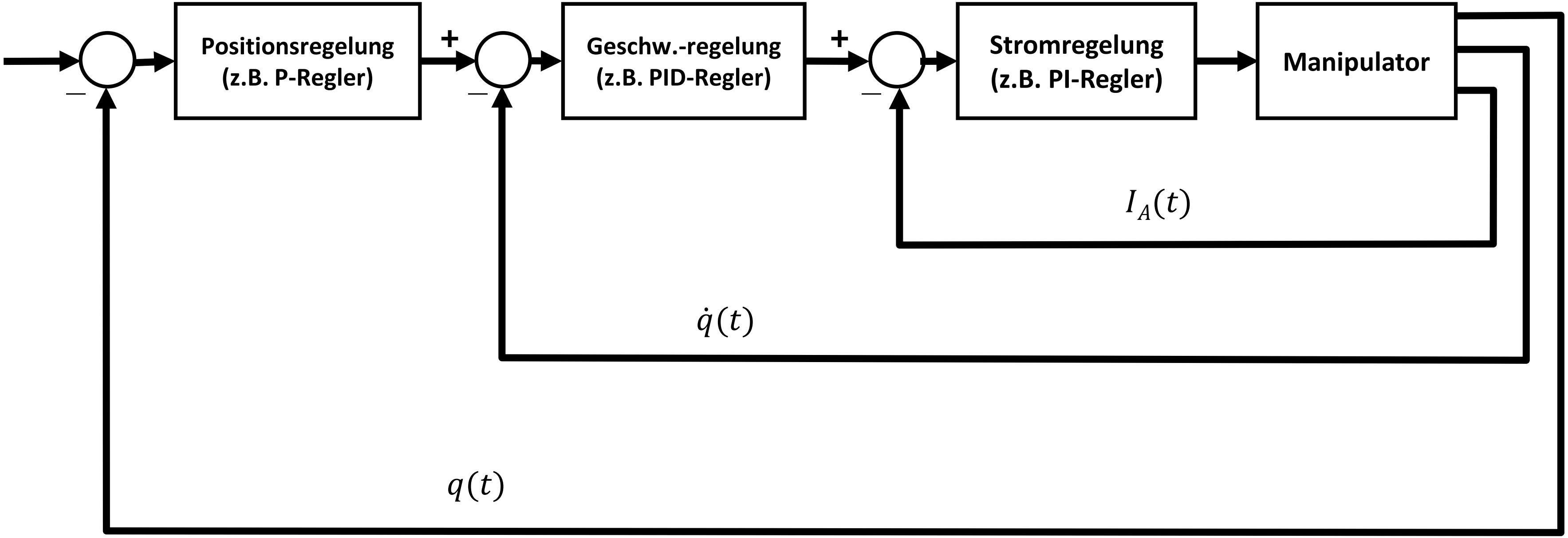


- Unter dem Begriff der Regelung von Manipulatoren fällt nicht nur die klassische Positionsregelung, sondern auch die Einbeziehung weiterer **Umwelteinflüsse**.
- Besondere Stellung nimmt dabei die Regelung von Kräften und Drehmomenten ein.

Regelung auf Gelenkebene: Kaskadenregelung

- Manipulator = **Mehrgrößensystem**

  Unabhängige lineare Einzelregelkreise der einzelnen Gelenke



Regelung von Manipulatoren

- Ausgangspunkt: **Dynamikmodell**

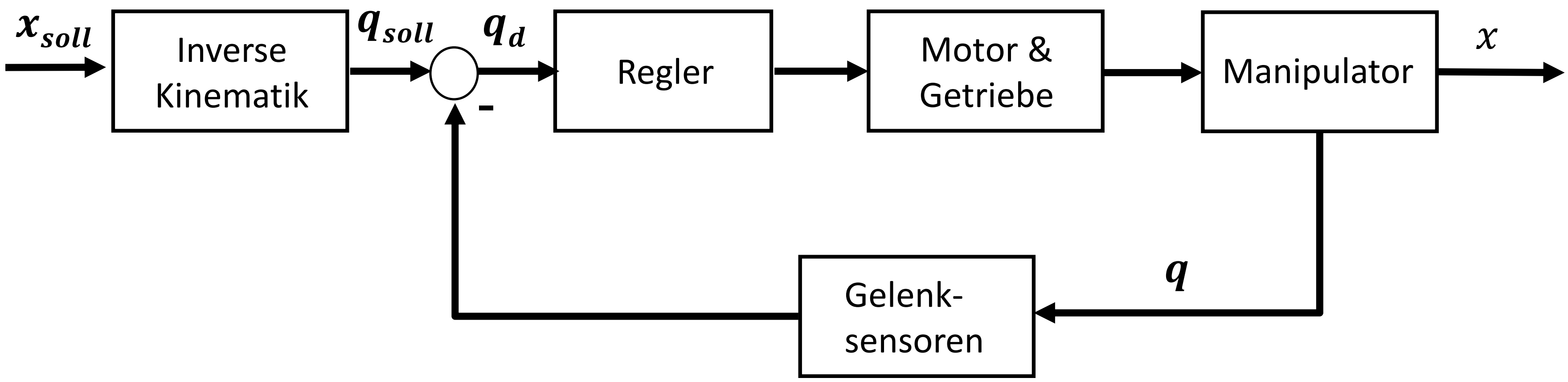
  Bei Bewegungen wirken aufgrund der Massenträgheit des Manipulators **Gravitations-, Zentrifugal-, Coriolis- und Reibungskräfte sowie -momente** auf die Gelenke.

$$\boldsymbol{\tau} = M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + n(\dot{\boldsymbol{q}}, \boldsymbol{q}) + g(\boldsymbol{q}) + R\dot{\boldsymbol{q}}$$

$\boldsymbol{\tau}$	$: n \times 1$ Vektor der allgemeinen Stellkräfte und -momente
$M(\boldsymbol{q})$	$: n \times n$ Trägheitsmatrix
$\boldsymbol{n}$	$: n \times 1$ Vektor mit Zentrifugal- und Corioliskomponenten
$g(\boldsymbol{q})$	$: n \times 1$ Vektor mit Gravitationskomponenten
R	$: n \times n$ Diagonalmatrix zur Beschreibung der Reibungskräfte
$\boldsymbol{q}$	$: n \times 1$ Winkellagen des Manipulators

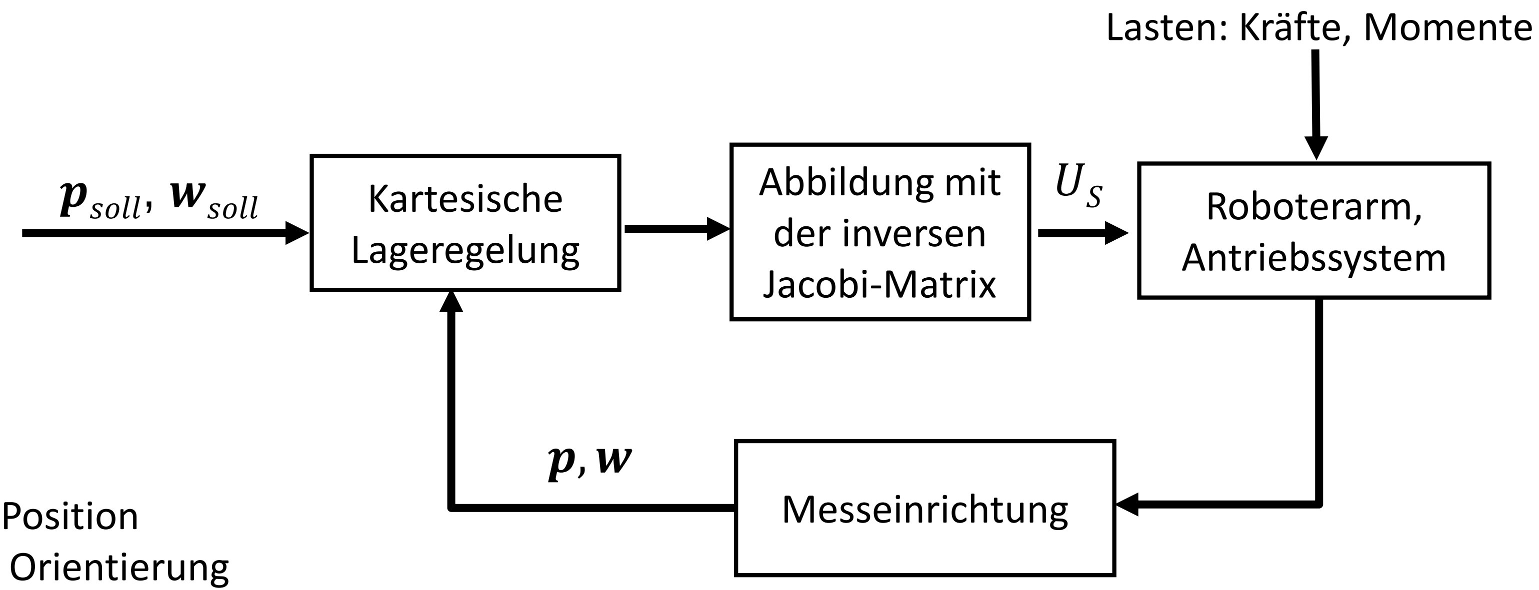
Regelung im Gelenkwinkelraum

- **Koordinatentransformation**
  → Soll-Trajektorien im Gelenkwinkelraum
- Aus den Gelenkwinkel-Sollwerten und den gemessenen Gelenkwinkeln werden Stellgrößen für die Gelenkantriebe generiert



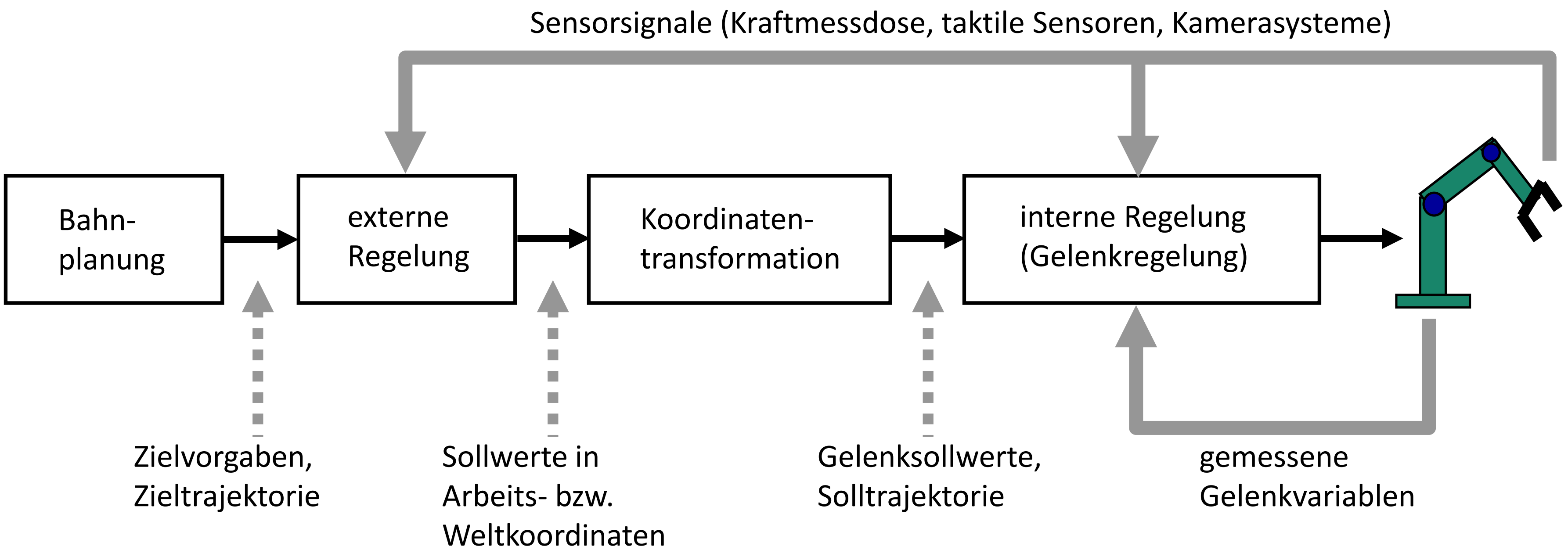
Regelung im kartesichen Raum

- **Höhere Komplexität** des Regelungsalgorithmus
- Direkte, gezielte Beeinflussung der einzelnen Raumkoordinaten



p = Position
w = Orientierung

Struktur einer Roboterregelung



Regelungskonzepte für Manipulatoren

- **Exakte Systemmodellierung**
  - Setzt a priori die exakte Kenntnis des Dynamikmodells und der Umgebung des Roboters voraus

- **Kraft-/Positionsregelung**
  - Zur Ausführung von Aufgaben, bei denen Interaktionskräfte berücksichtigt werden müssen
    - Hybride Kraft-/Positionsregelung
    - Impedanz Regelung

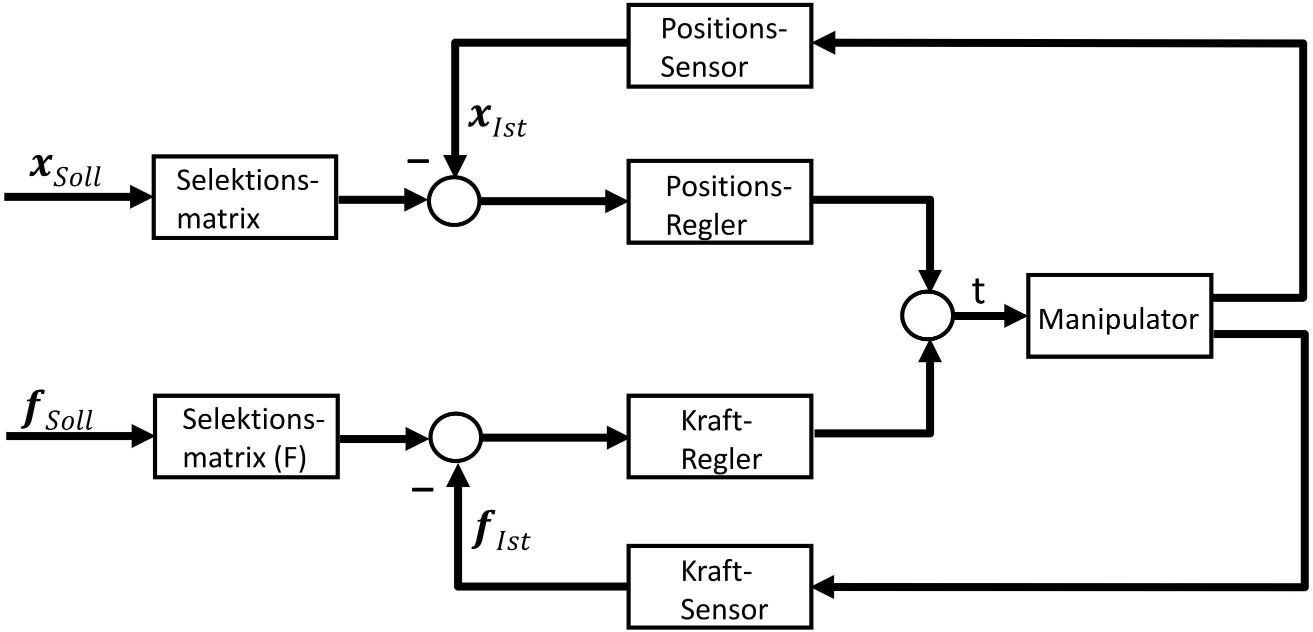
Kraft-Positionsregelung

- **Grundlegendes Problem**
  - Positionen und Kräfte sind eng miteinander verknüpft.
  - Steht der Roboter in **Kontakt mit Umgebung** so bedeutet jede Positionsänderung auch eine Kraftänderung und umgekehrt.

- **Allgemeine Methode** zur Lösung des Problems
  - Aus der Beschreibung der auszuführenden Aufgabe resultieren natürliche Randbedingungen. Künstliche Randbedingungen werden zusätzlich eingeführt, um den Bewegungsablauf vollständig zu beschreiben.

Hybride Kraft-/Positionsregelung

- Reine Kraft- oder Positionsregelung für jede kartesische Bewegungsrichtung des Arms



Impedanz-Regelung

- Regelung der **dynamischen Beziehung zwischen Kraft und Position** im Kontaktfall.
- **Idee:**
  - Die Interaktion zwischen einem Roboter und der Umwelt verhält sich wie ein Feder-Dämpfer-Masse-System
  - Kraft f und Bewegung (definiert durch: $\boldsymbol{x}(t), \dot{\boldsymbol{x}}(t), \ddot{\boldsymbol{x}}(t)$) können über die Feder-Dämpfer-Masse-Gleichung direkt in Zusammenhang gebracht werden:

$$f(t) = \underline{k} \cdot \boldsymbol{x}(t) + d \cdot \dot{\boldsymbol{x}}(t) + m \cdot \ddot{\boldsymbol{x}}(t)$$

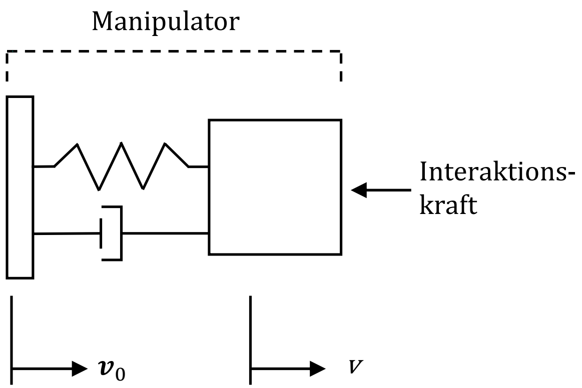
Impedanz-Regelung (2)

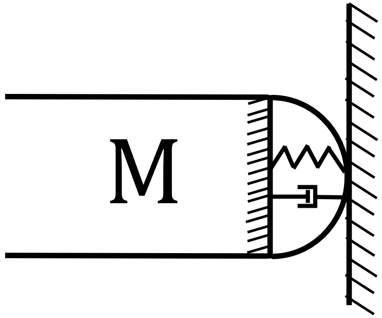
- Die **Impedanz** kann über Steifigkeit (k), Dämpfung (d) und Trägheit (m) beeinflusst werden

$$f(t) = k \cdot \boldsymbol{x}(t) + d \cdot \dot{\boldsymbol{x}}(t) + m \cdot \ddot{\boldsymbol{x}}(t)$$

Laplace-Transformation

$$F(s) = \underbrace{(k + d \cdot s + m \cdot s^2)}_{\text{Impedanz des Feder-Dämpfer-Masse-Systems}} \cdot X(s)$$



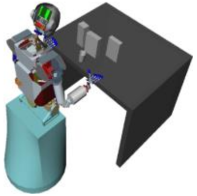


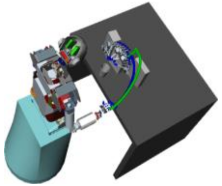
Regelung bei den ARMAR-Robotern

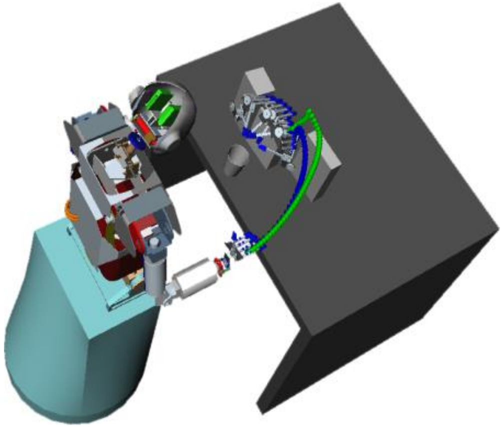
- Gelenkwinkelreglung
- Reglung im Kartesischen Raum
- Hybride Position/Kraft-Regelung
- Impedanz-Regelung: Kühlschrank/Geschirrspülmaschine aufmachen
- Bildbasierte Regelung (visual servoing)
- Bild- und Kraftbasierte Regelung
- Haptik-basierte Regelung (haptic servoing)

Ausführung von Manipulationsaufgaben

Greifaufgabe → Szenen-repräsentation → Bewegungs-planung → Sensorbasierte Ausführung



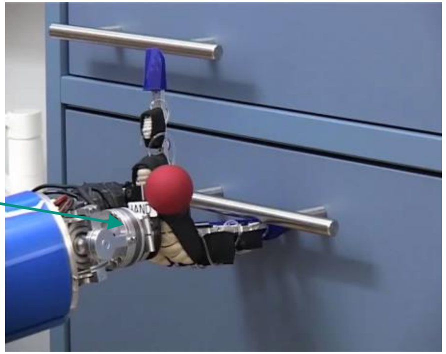




Bildbasierte Positionsregelung für das Greifen

Sensoren

- Kraft-Momenten-Sensor an beiden Handgelenken

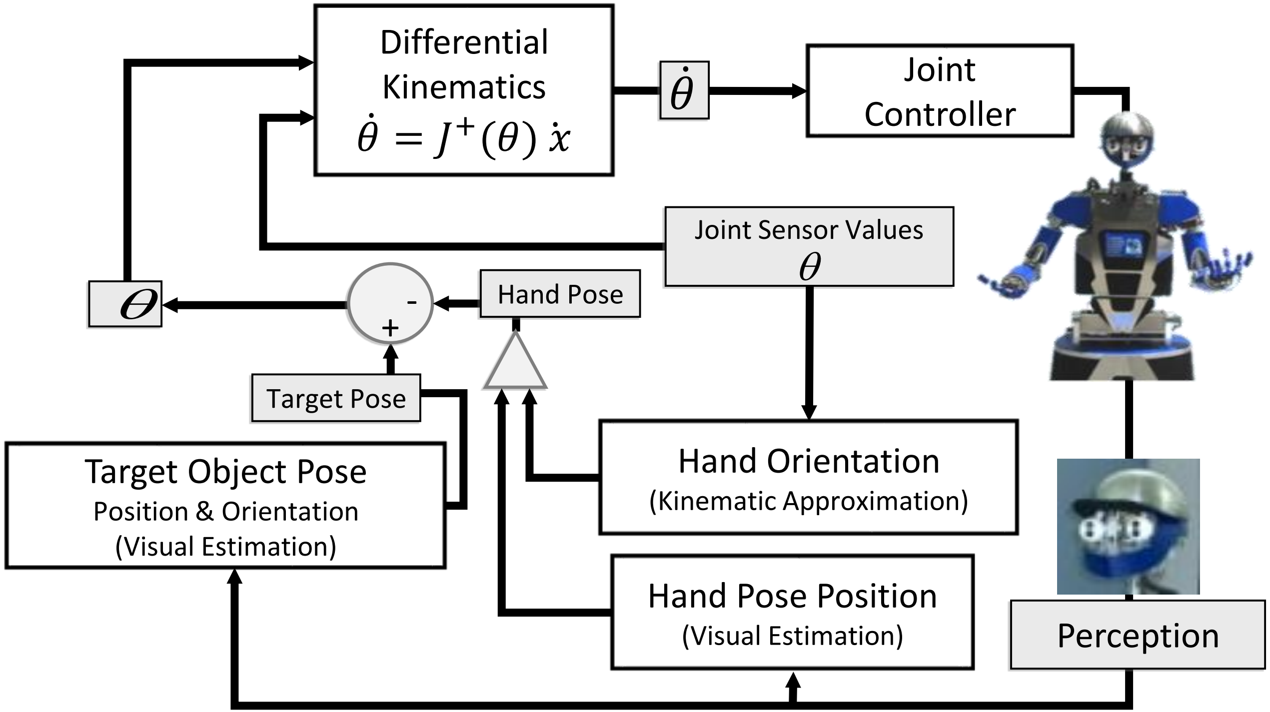


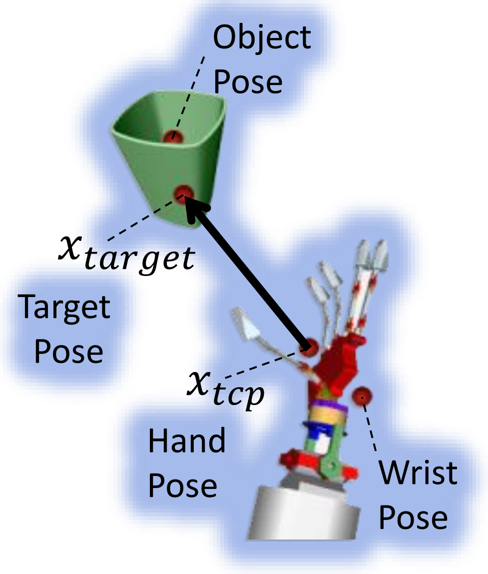
- Stereokamerasystem

- Taktile Haut (Ober- und Unterarm, Schulter)

- Interne Sensoren (Gelenkwinkelsensoren)

Positionsbasiertes Visual Servoing





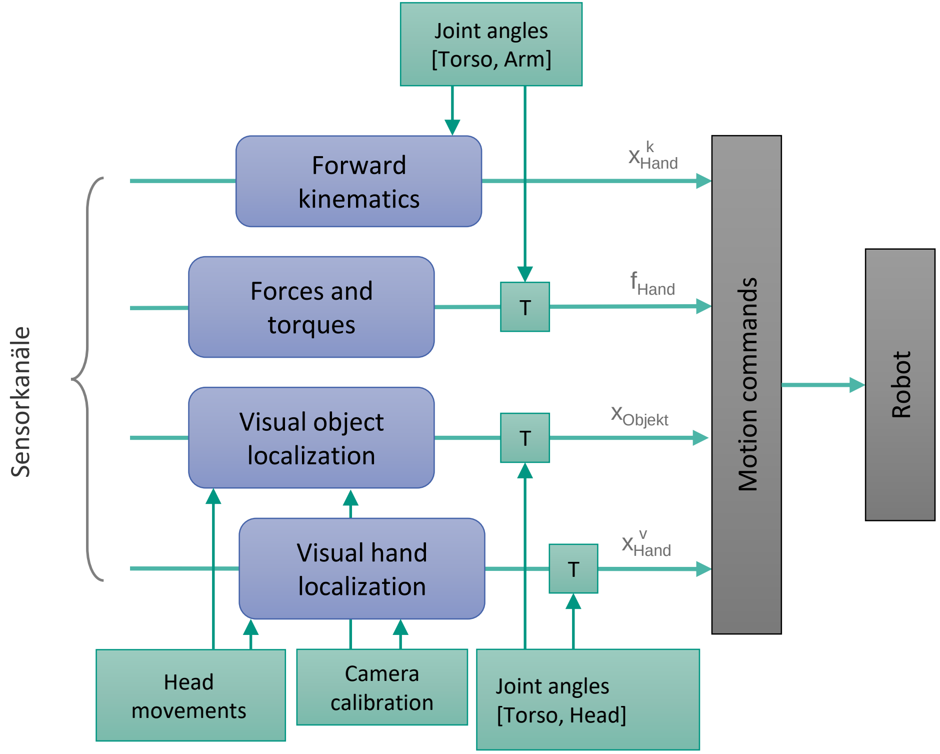
$$\delta^{t} = x^{t}_{vision} - x^{t}_{kinematic}$$

$$x^{t+1}_{tcp} = x^{t+1}_{kinematic} + \delta^{t}_{tcp}$$

$$\dot{\theta} = J^{+}(\theta)\dot{x}$$

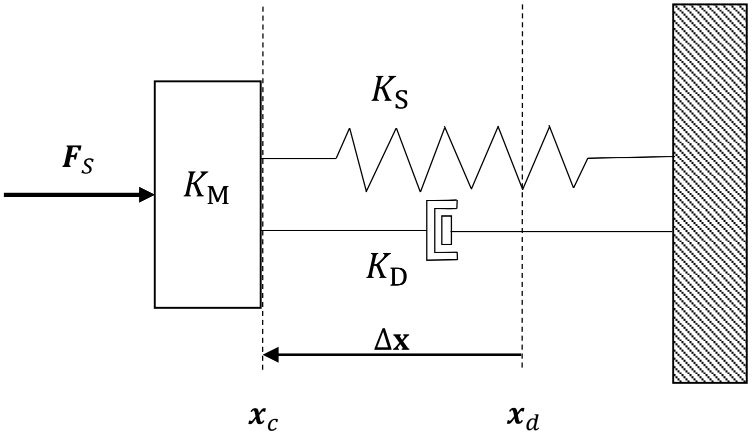
Sensorbasierte Ausführung von Manipulationsaufgaben

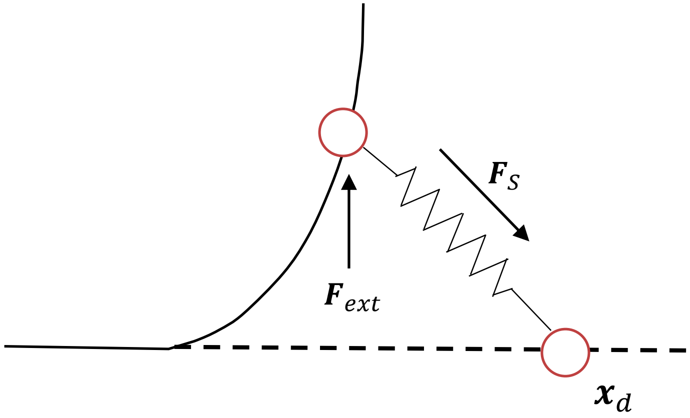
- Bild-basierte Ausführung
  - Modellwissen
- Sensoren
  - Kraft/Kontakt
  - Kameras
  - Interne Sensoren



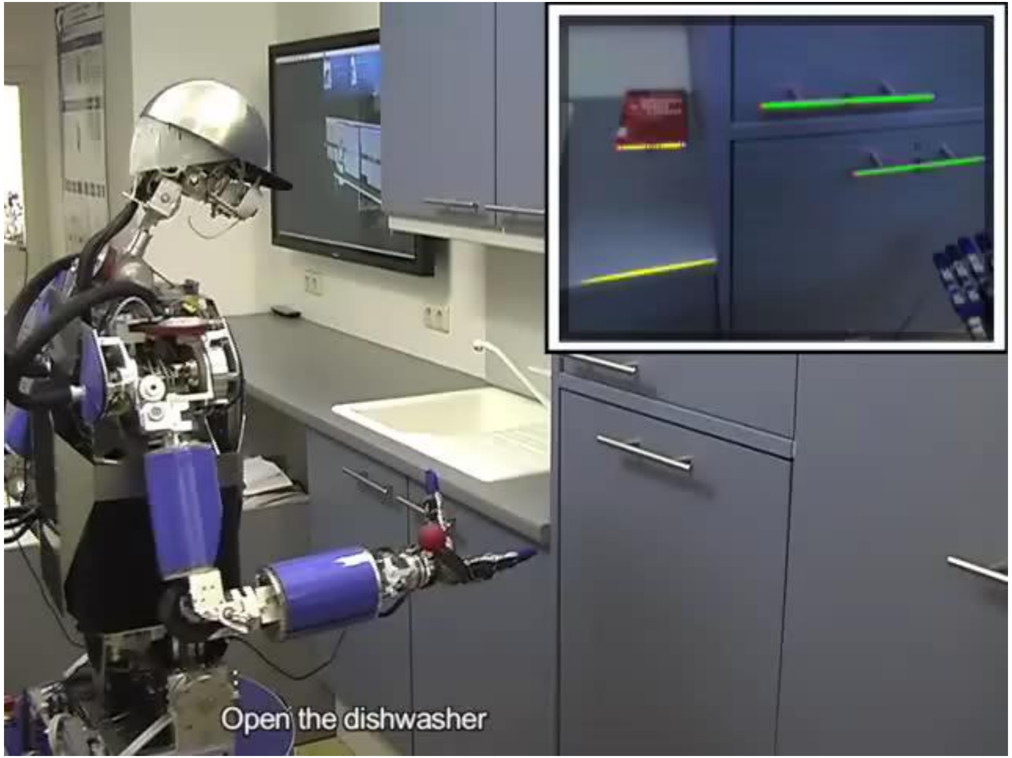
Kraftregelung

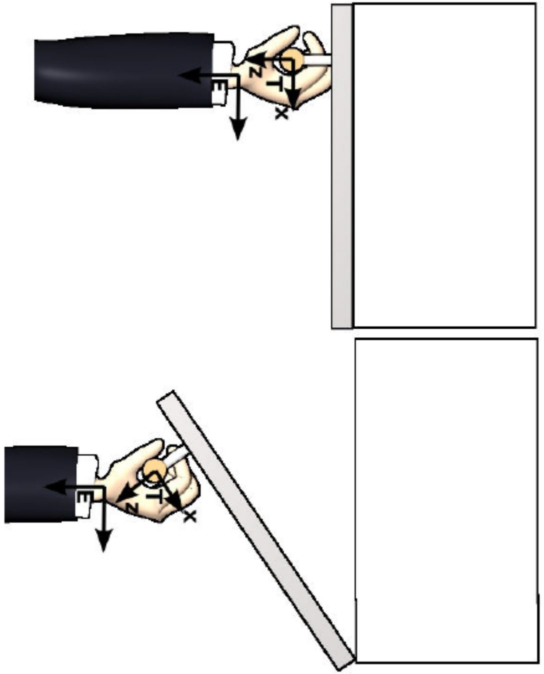
- **Impedanzregelung**
  - Regelung des Zusammenhang zwischen aufgebrachter Kraft und Positionsänderung (d.h. Geschwindigkeit) bei Kontakt mit der Umgebung!
  - Geschwindigkeitsbasierte Vereinfachungen:
    Steifigkeits- & Dämpfungsregelung



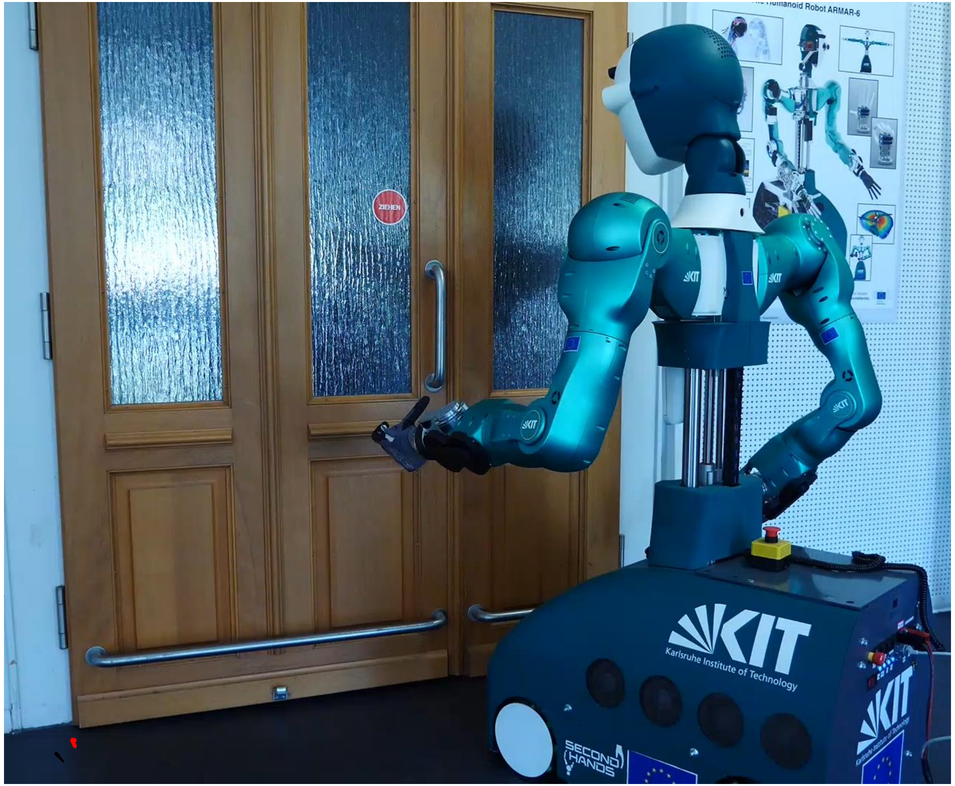


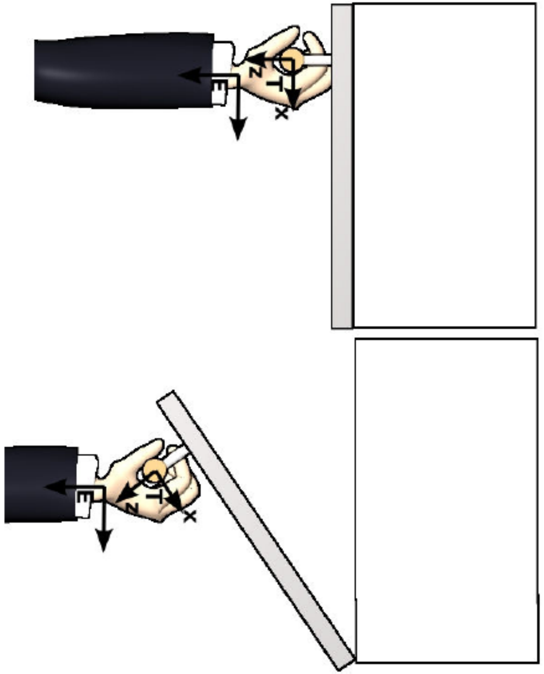
Impedanz-Regelung (Tür aufmachen)





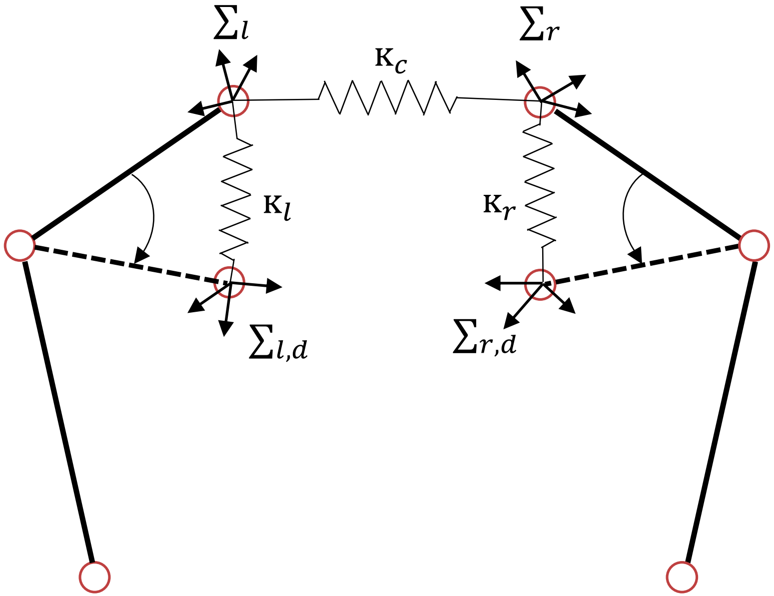
Impedanz-Regelung (Tür aufmachen)





Zweiarmige Impedanzregelung

- Zusätzliche Koppelsteifigkeit zwischen den Endeffektoren
- Steifigkeiten müssen kompatibel sein

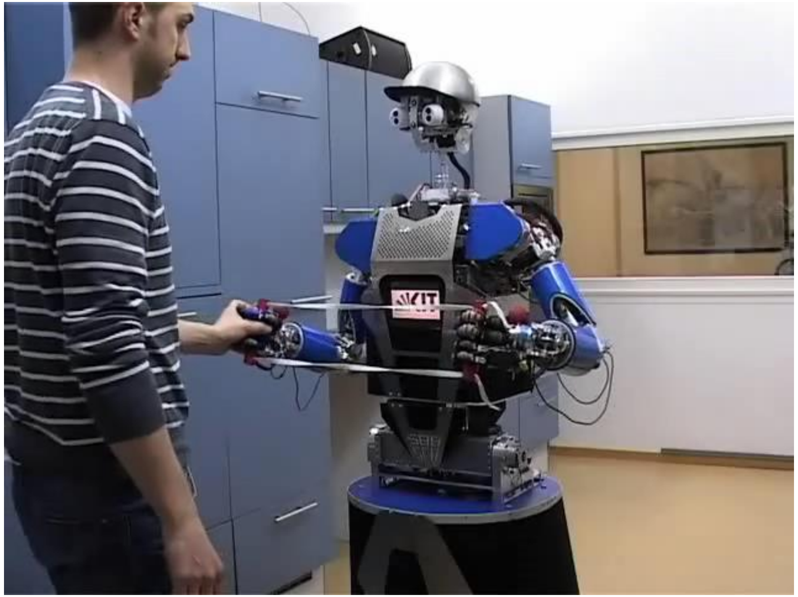


Zweiarmige Manipulation

- Entkoppelte Manipulation
  - Keine direkte Kopplung der Arme
  - Unabhängige Trajektorien

- Gekoppelte Manipulation
  - Master-Master: Gegenseitige Bahnänderung
  - Master-Slave: Bahnänderung des Slaves bei Ablenkung des Masters

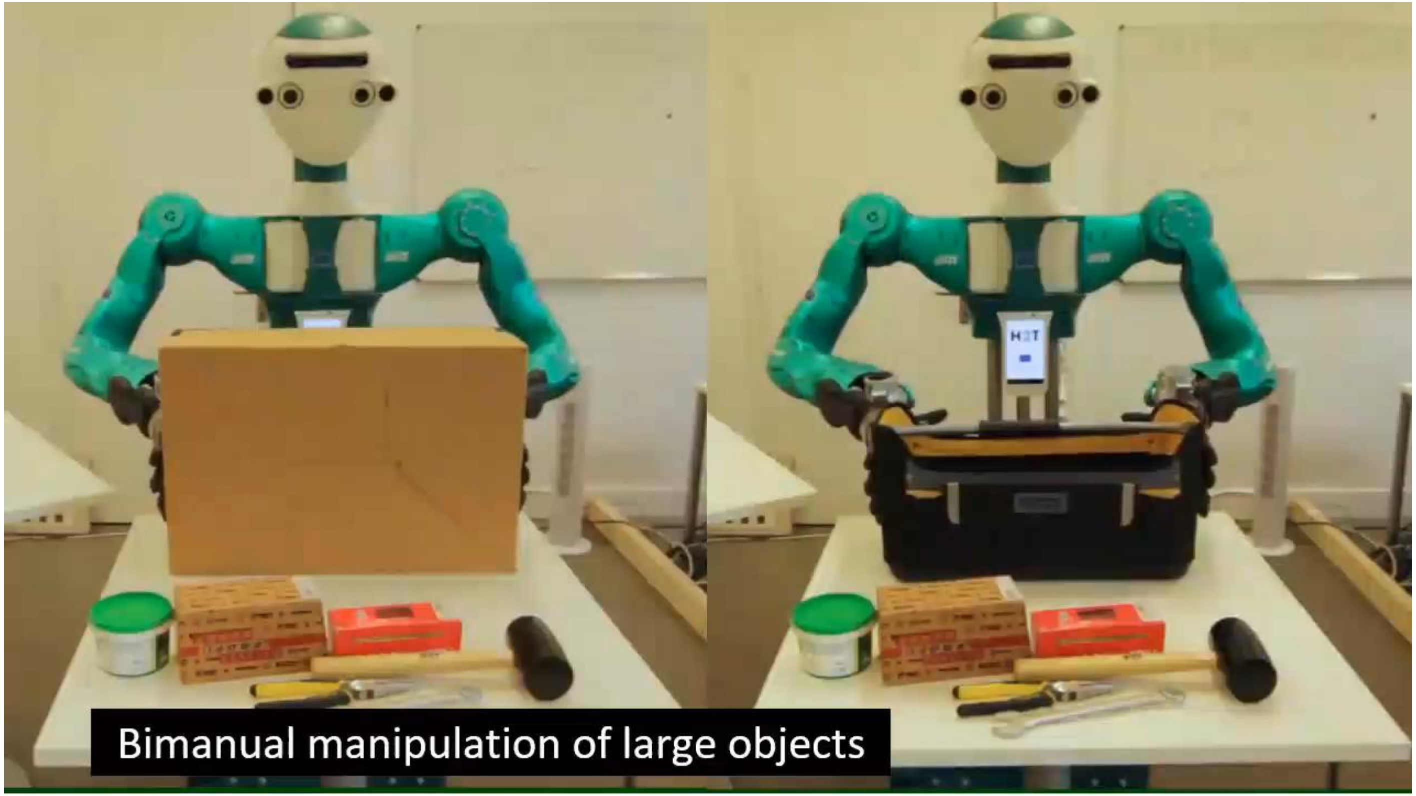
Nachgiebig und Starr Gekoppelte Manipulation



Nachgiebig gekoppelte Manipulation

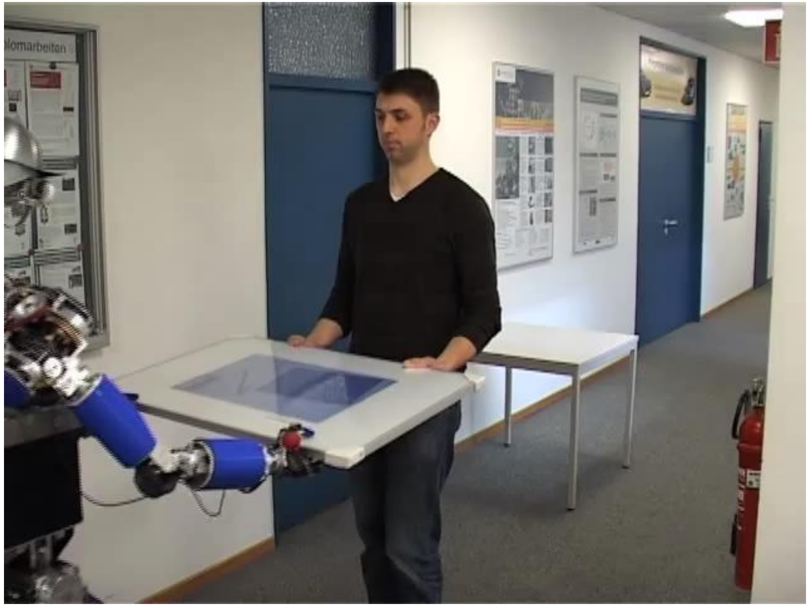
Starr gekoppelte Manipulation

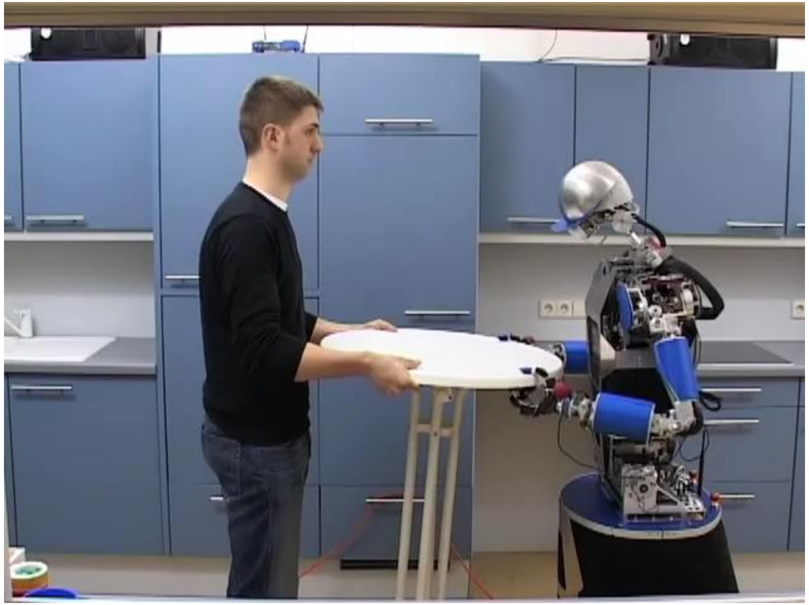
Starr Gekoppelte Manipulation



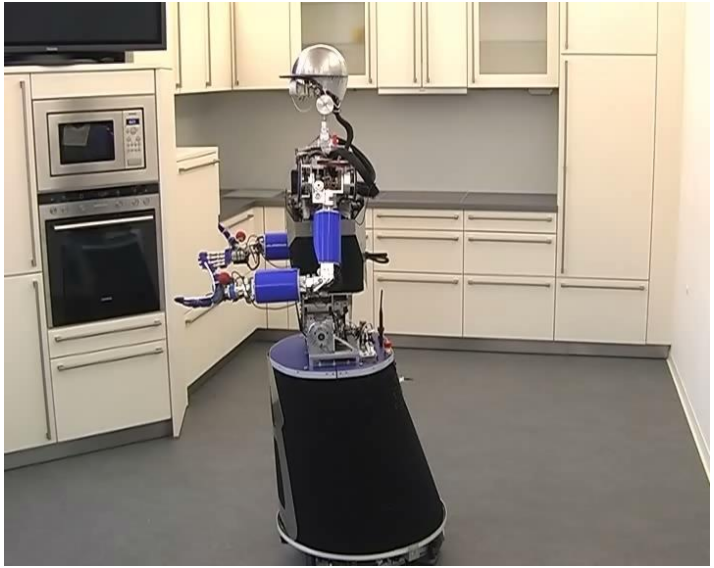
Mensch-Roboter-Kooperation

- Kraft/Positionsreglung



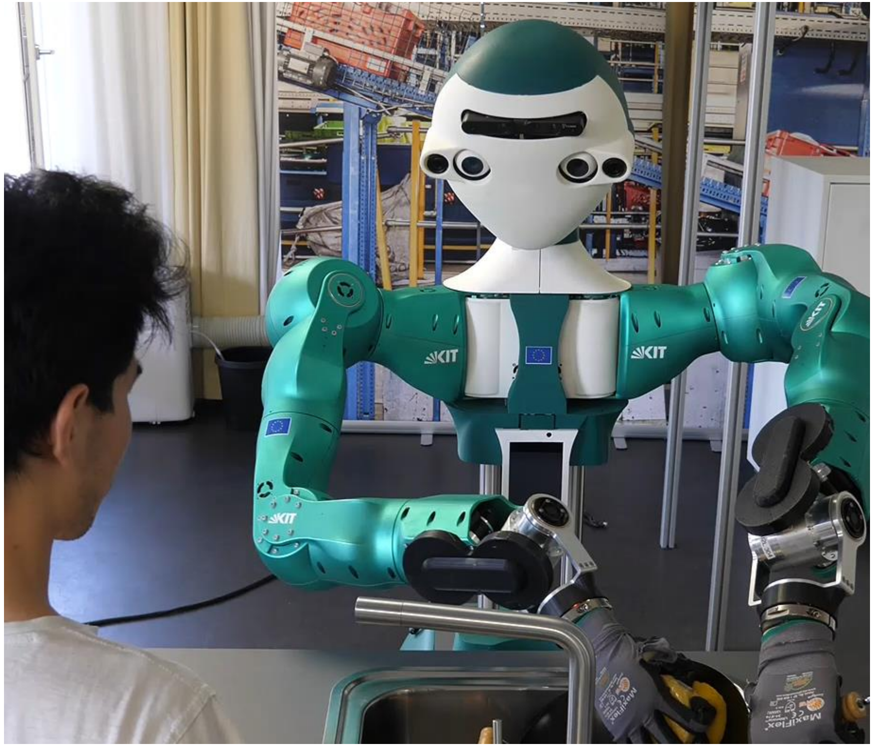


Mensch-Roboter-Kooperation



Physical Human-Robot Interaction

Karlsruher Institut für Technologie



H2T

Englische Begriffe

Deutsch	Englisch
Regler	Controller
Stellgröße	Control input
Ausgangsgröße	System output
Störgröße	Disturbance
Führungsgröße	Reference
Rückführgröße	Feedback
Regeldifferenz	Control error
Regelung mit geschlossener Schleife	Closed loop control
Regelung mit offener Schleife (Steuerung)	Open loop control
Strecke	Plant
Laplace-Transformation	Laplace transform
Drehmomentregelung	Torque control

Literaturverzeichnis

[1] Otto Föllinger, „Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung“, ISBN: 9783778529706

[2] Lynch, Kevin M., and Frank C. Park. *Modern Robotics*. Cambridge University Press, 2017