

Robotik I: Einführung in die Robotik

Regelung von Robotersystemen

Tamim Asfour

KIT-Fakultät für Informatik, Institut für Anthropomatik und Robotik (IAR)
Hochperformante Humanoide Technologien (H²T)



- Einführung
- Grundlagen der Regelung
- Regler
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

Regelungstechnik

■ Regelungstechnik:

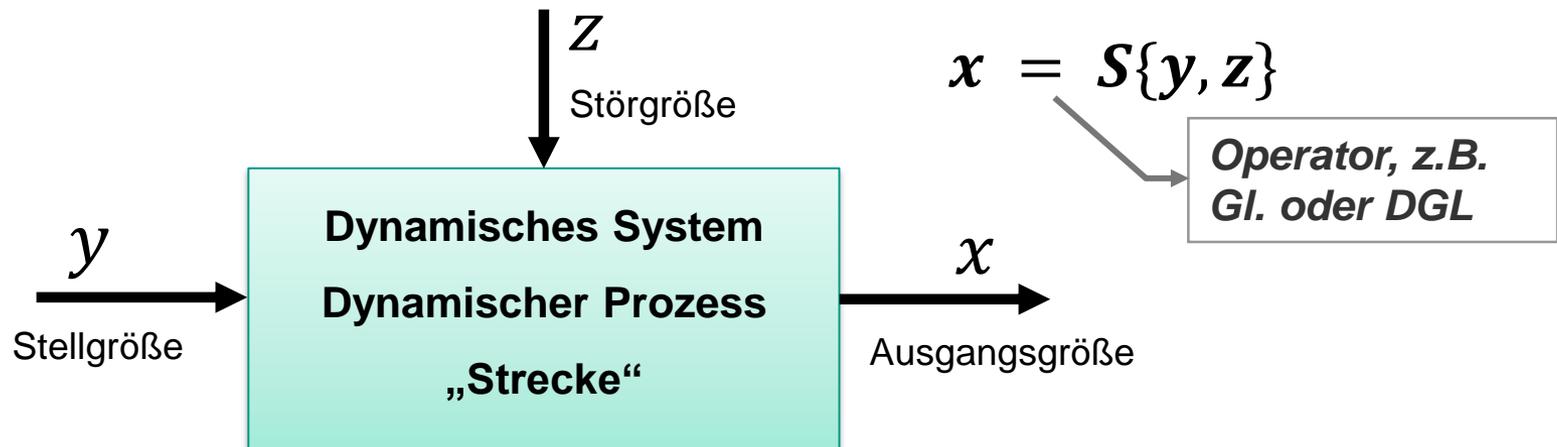
Lehre von der selbsttätigen, gezielten Beeinflussung dynamischer Prozesse während des Prozessablaufs

■ 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

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

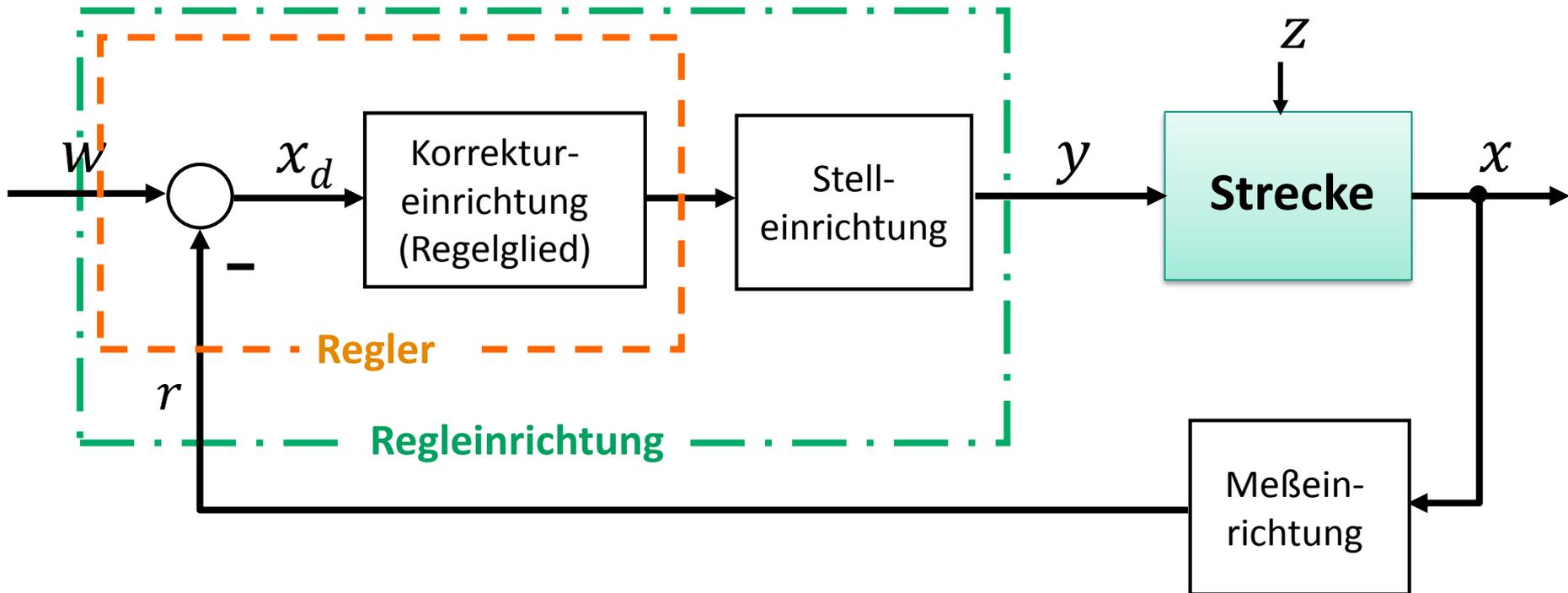
Aufbau und Wirkungsweise einer Regelung

■ 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

y Stellgröße

r Rückführgröße

x_d Regeldifferenz

x Regelgröße

z Störgröße

Wirkungsweise der Regelung

Sollwert von x : x_s

Messeinrichtung: $r = K_j x$ $K_j > 0$ (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 werde 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.

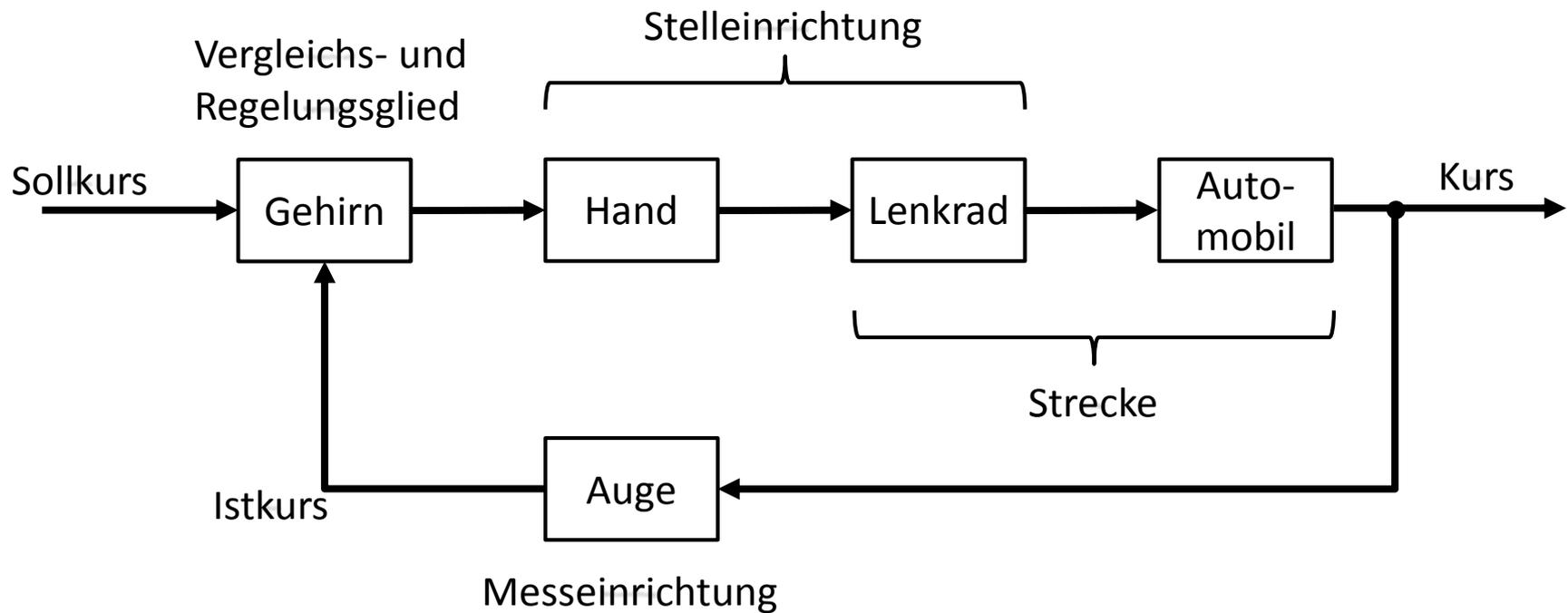
Kurz: **Die Störgröße wird ausgeregelt.**

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

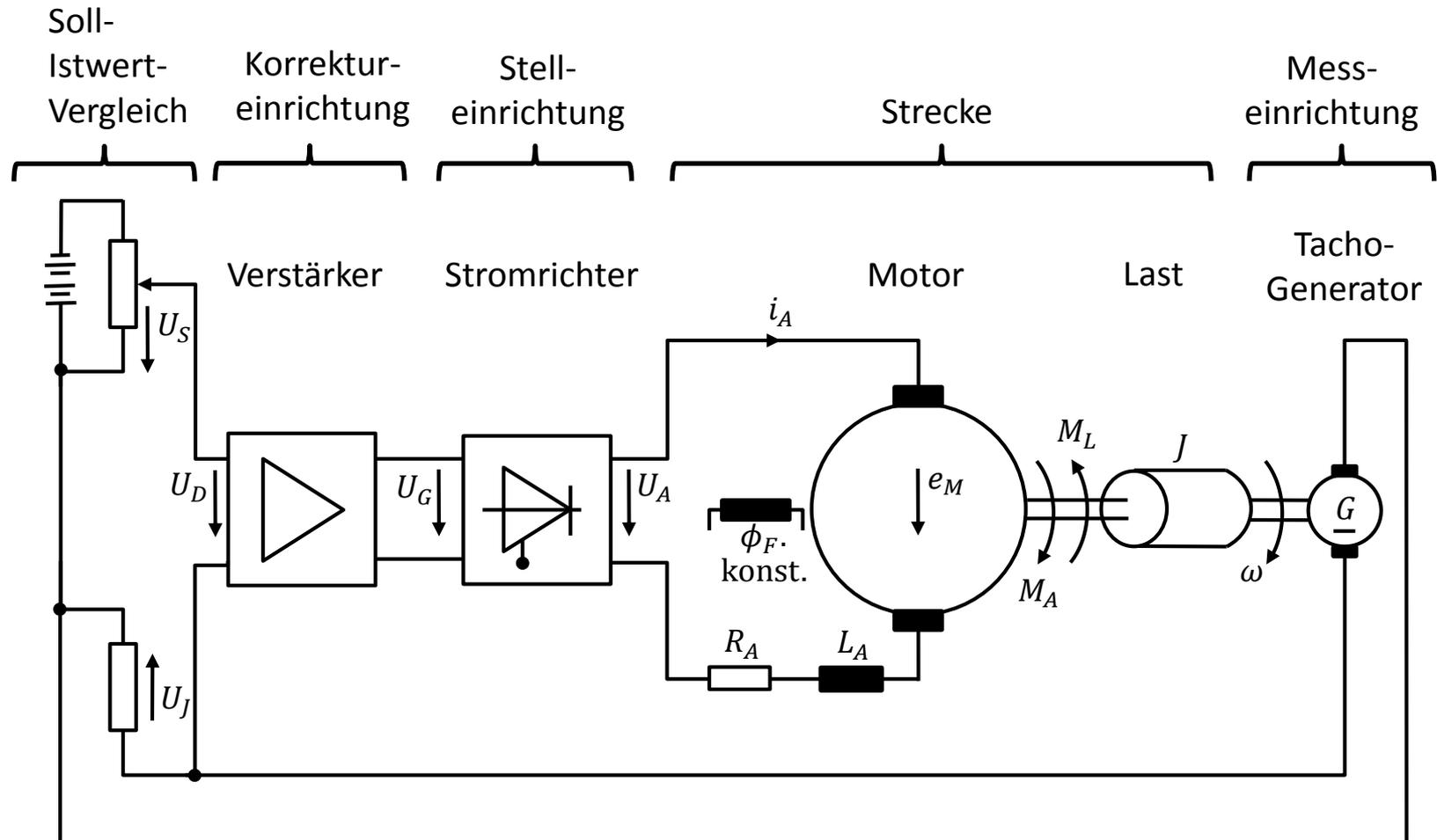


Nach: Regelungstechnik; O. Föllinger

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.

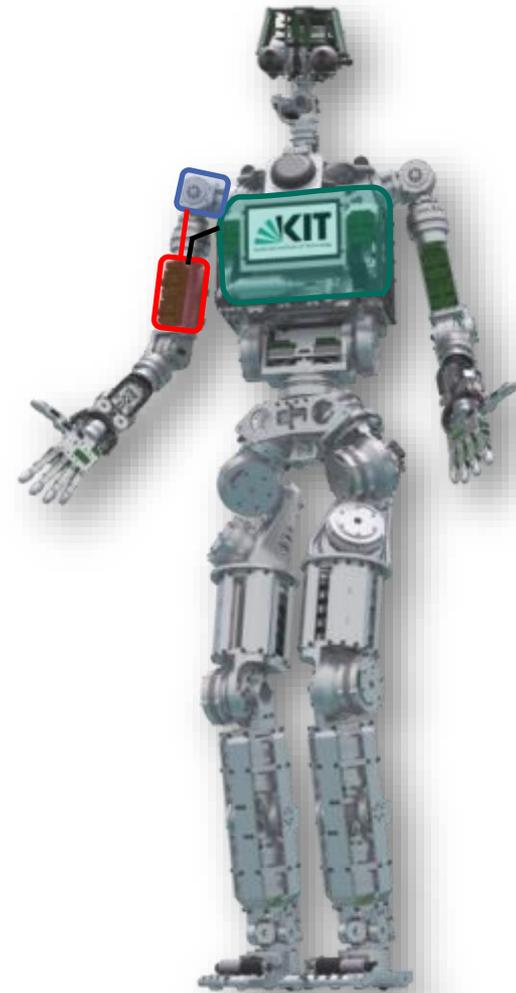
Beispiel: Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors



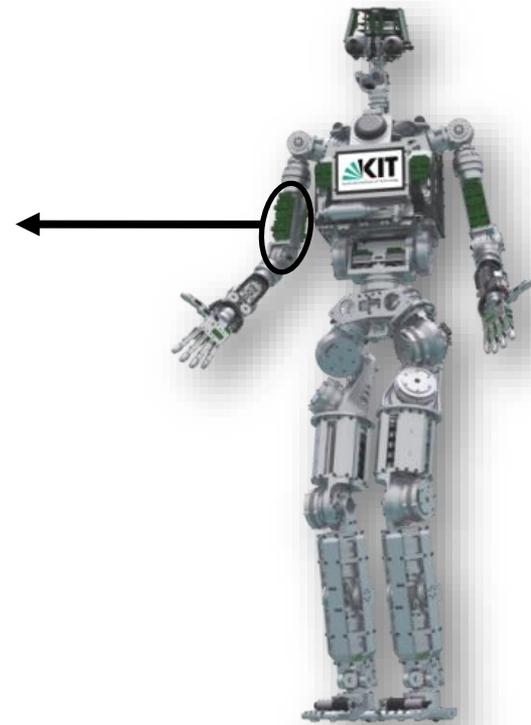
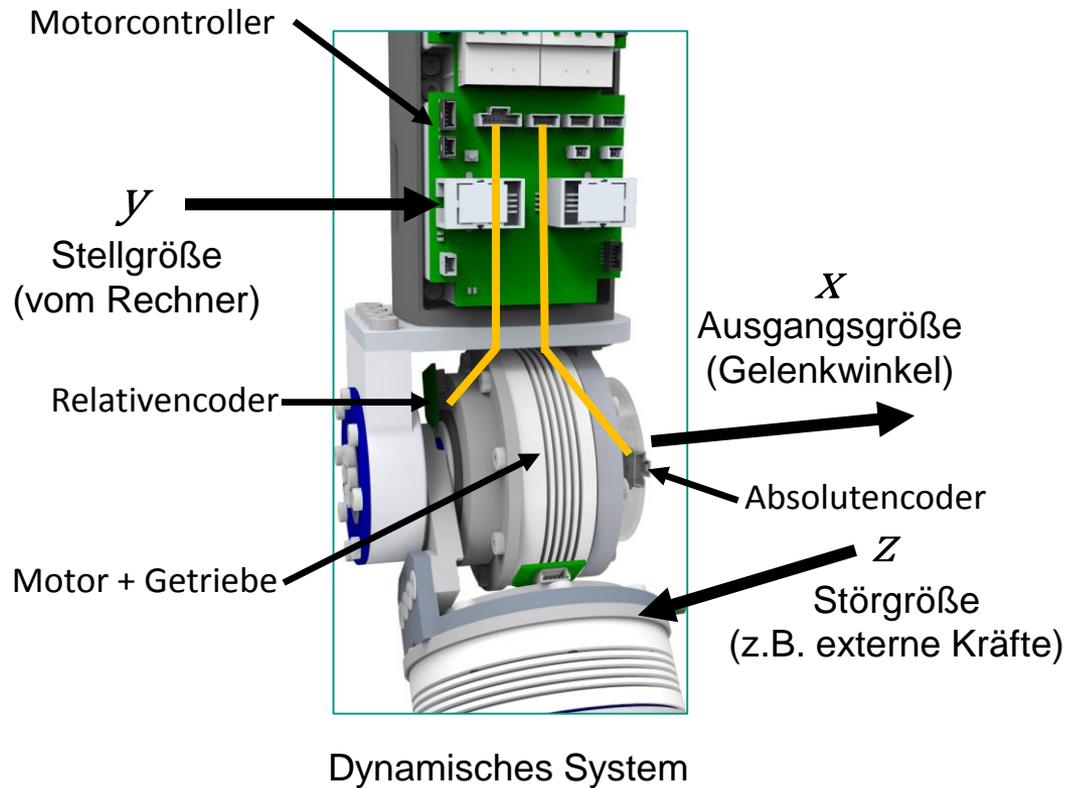
Nach: *Regelungstechnik*; O. Föllinger

Beispiel: ARMAR-4

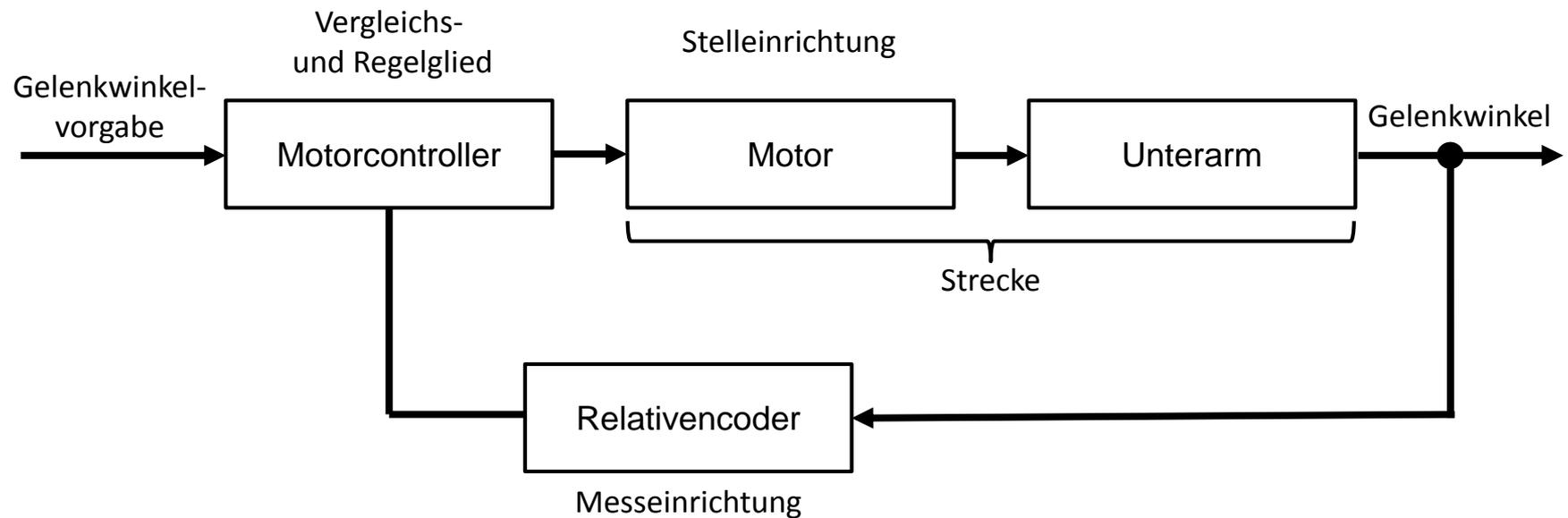
- High Level: **Rechner**
 - Zentrale Steuerung der Gelenke
 - Position (z.B. aus IK)
 - Geschwindigkeit (z.B. aus IK)
 - Drehmoment (z.B. aus ID)
 - **Can-Bus** (200Hz)
- Low Level: **Motorregler**
 - Regelung (bis 1 kHz) für
 - **PWM**
 - **Stromstärke**
- Messung von Position, Drehmoment und Stromstärke im **Gelenk**



Beispiel: ARMAR-4



Beispiel: ARMAR-4

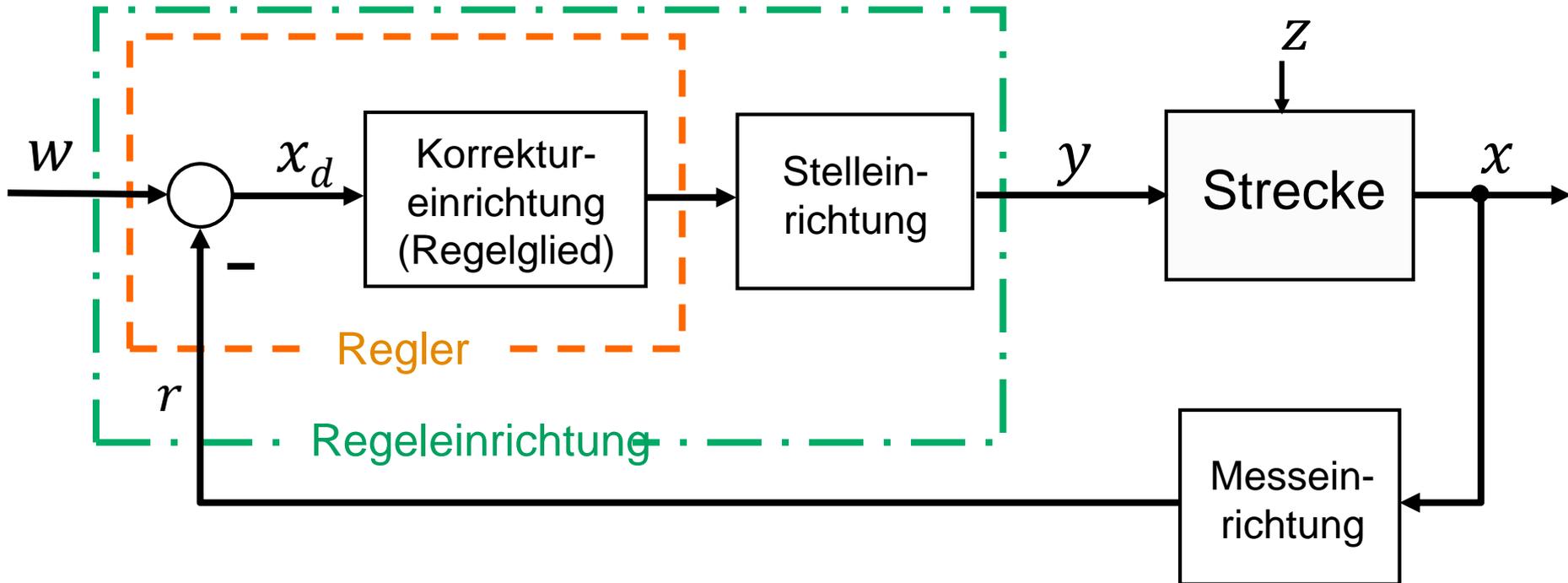


Einführung - Regelkreis

■ Strukturbild einer Regelung

- Aus den physikalischen Gesetzen ermittelt man **Gleichungen zwischen zeitveränderlichen Größen** des Systems
- 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

y : Stellgröße

r : Rückführgröße

x_d : Regeldifferenz

x : Regelgröße

z : Störgröße

Grundlagen der Regelung

Übersicht

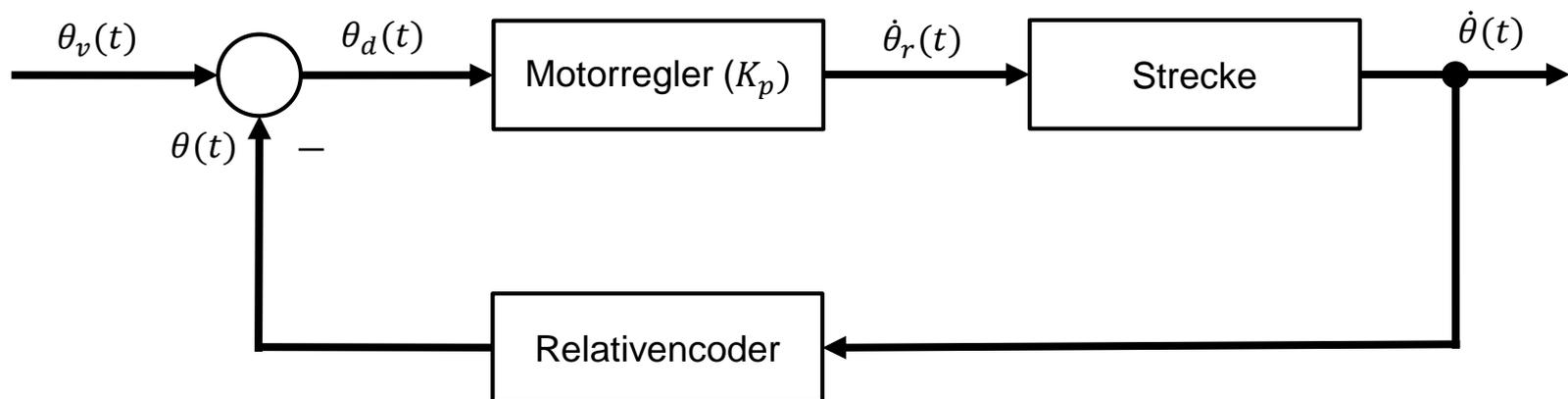
- Einführung
- **Grundlagen der Regelung**
 - **Grundlegende Regelkreise**
 - Laplace-Transformation
 - Übertragungsglieder
 - Stabilität einer Regelung
 - Testfunktionen
- Regler
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

Geschwindigkeitsregelung

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

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

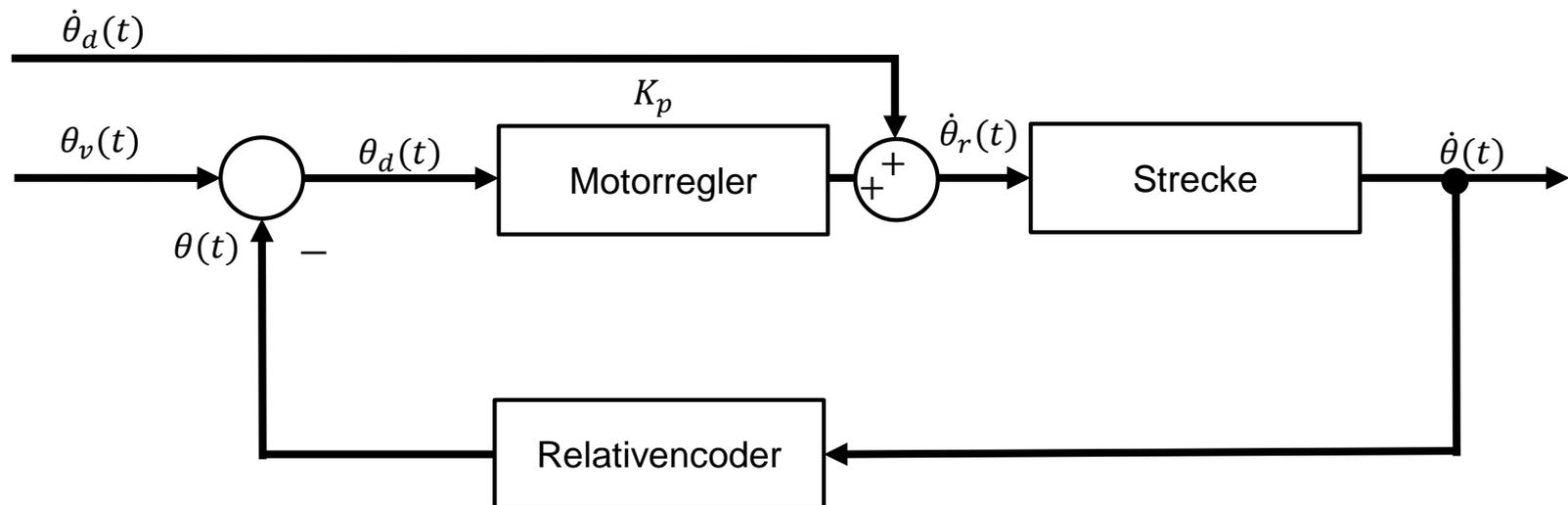
- Nachteil: Wenn $\theta_d = 0$ bewegt sich das Gelenk nicht.



Vorsteuerung

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

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



Grundlagen der Regelung

Übersicht

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

Laplace-Transformation

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

- 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

■ Ableitungsfunktion

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

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

■ Annahme: $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-st} f(t) \rightarrow 0$

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

Laplace-Transformation

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

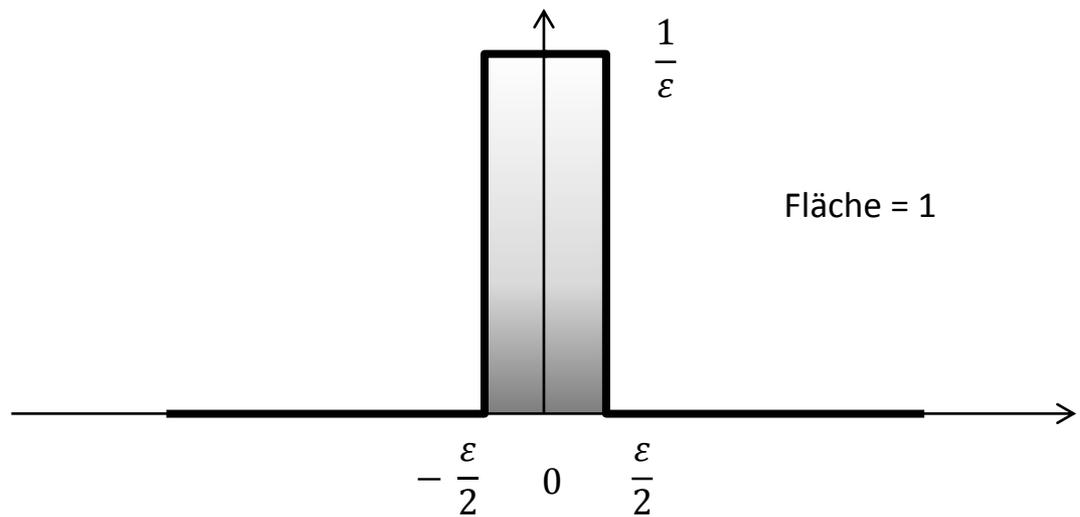
$$\int_a^b u(x)v'(x) dx = u(x)v(x) \Big|_a^b - \int_a^b u'(x)v(x) dx$$

$$\begin{aligned} & \mathcal{L} \left[\int_0^t f(\tau) d\tau \right] \\ &= \int_0^\infty \int_0^t f(\tau) d\tau \cdot e^{-st} dt = \int_0^\infty \int_0^t f(\tau) d\tau \cdot \left(-\frac{1}{s} \cdot e^{-st} \right) \Big|_0^\infty \\ &- \int_0^\infty \left(-\frac{1}{s} \right) \cdot e^{-st} f(t) dt = \frac{1}{s} \int_0^\infty f(t) \cdot e^{-st} dt = \frac{1}{s} f(s) \end{aligned}$$

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

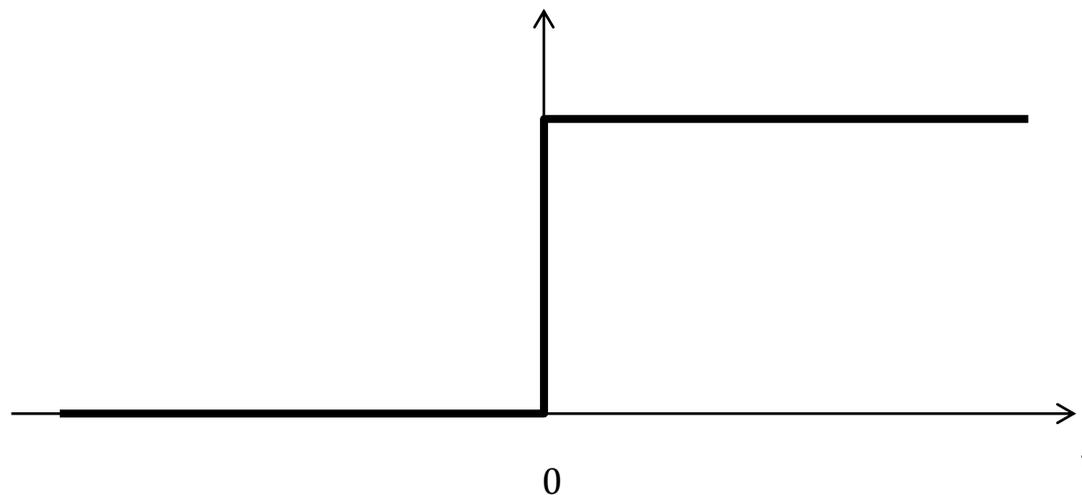
Impulsfunktion (Dirac-Impuls)

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



Einheitssprungfunktion

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



Laplace-Transformation

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

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

- Sprungfunktion $\sigma(t)$

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

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

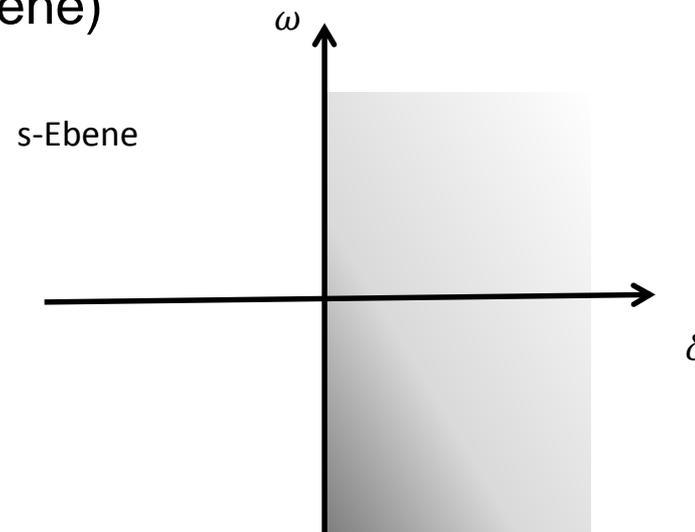
Komplexe Darstellung einer Schwingung

Laplace-Transformation

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

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

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



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: $f_1(t = 0) = \lim_{s \rightarrow \infty} s * f(s)$

■ Differentiationssatz: $L\left\{\frac{d}{dt} f(t)\right\} = sF(s)$

■ Integrationsatz: $L\left\{\int f(t)dt\right\} = \frac{1}{s}F(s)$

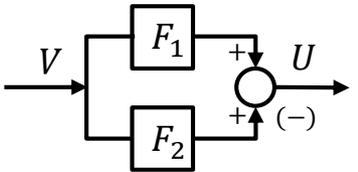
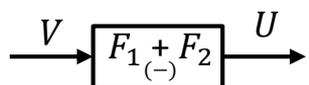
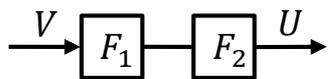
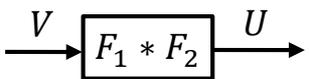
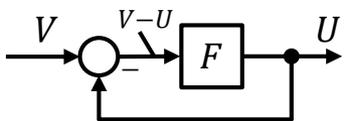
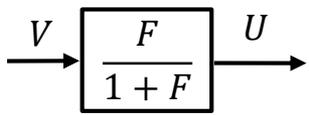
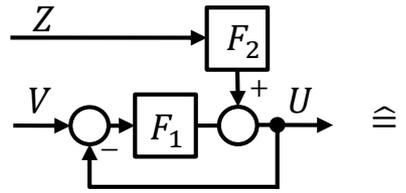
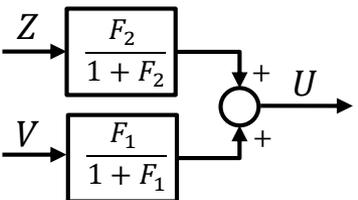
■ Verschiebung: $L\{f(t - \tau)\} = e^{-\tau s} F(s)$

■ $L\{e^{\alpha t}\} = \frac{1}{s - \alpha}$ $L\{t^n\} = \frac{n!}{s^{n+1}}$ ($n = 1, 2 \dots$)

■ $L\{\sin(\alpha t)\} = \frac{\alpha}{s^2 + \alpha^2}$ $L\{\cos(\alpha t)\} = \frac{s}{s^2 + \alpha^2}$

Laplace-Transformation: Regeln

Umformregeln für Wirkungspläne

- 1)  \cong  $U(s) = (F_1(s) \pm F_2(s))V(s)$
- 2)  \cong  $U(s) = (F_1(s) * F_2(s))V(s)$
- 3)  \cong  $U(s) = (F(s)/(1 + F(s)))V(s)$
- 4)  \cong  $U(s) = \left(\frac{F_1(s)}{1 + F_1(s)} \right) V(s) + (F_2(s)/(1 + F_2(s)))Z(s)$

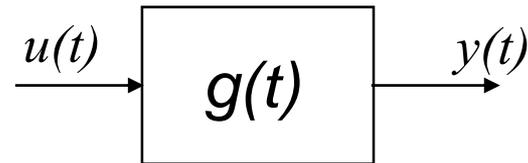
Grundlagen der Regelung

Übersicht

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

Übertragungsglieder

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



- Im komplexen s-Bereich:

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

- Im Zeitbereich:

Faltungsregel der Laplace-Transformation

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

Elementare Übertragungsglieder (1)

Benennung

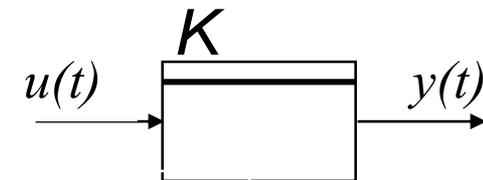
Funktionalbeziehung

Symbol

P-Glied

Proportionalglied

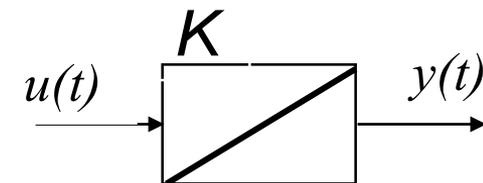
$$y(t) = K \cdot u(t)$$



I-Glied

Integrierglied

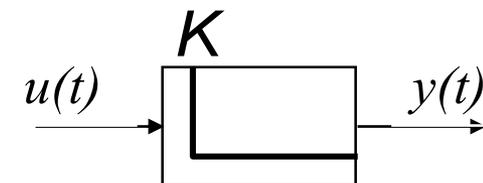
$$y(t) = K \cdot \int_0^t u(\tau) d\tau$$



D-Glied

Differenzierglied

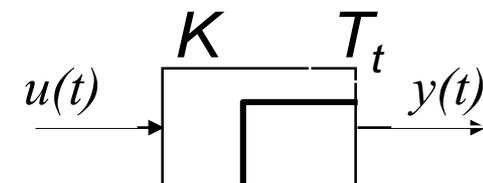
$$y(t) = K \cdot \dot{u}(t)$$



T_t-Glied

Totzeit-Glied

$$y(t) = K \cdot u(t - T_t)$$



Elementare Übertragungsglieder (2)

Benennung

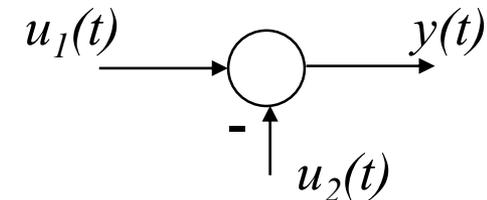
Funktionalbeziehung

Symbol

S-Glied

Summenglied

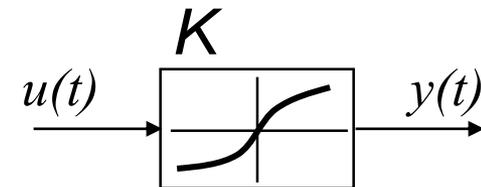
$$y(t) = \pm u_1(t) \pm u_2(t)$$



KL-Glied

Kennlinienglied

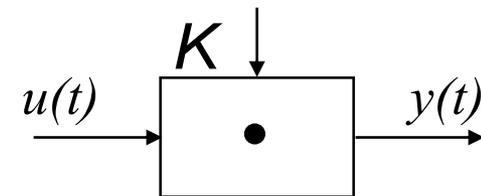
$$y(t) = K \cdot F(u(t))$$



M-Glied

Multiplizierglied

$$y(t) = K \cdot u_1(t)u_2(t)$$

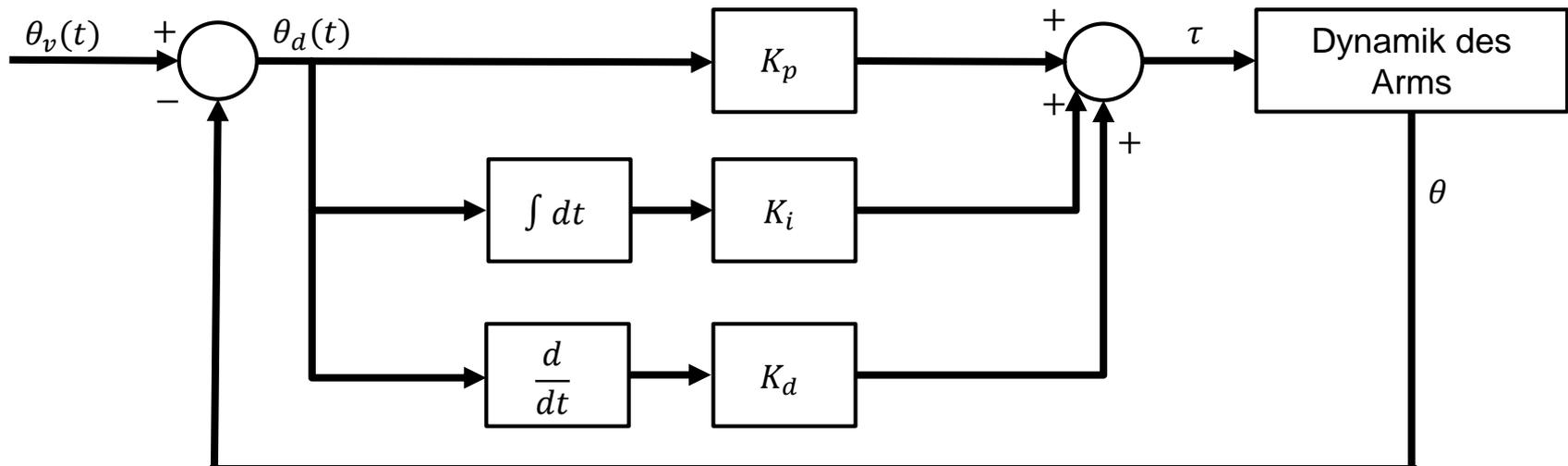


PID-Regelung

■ Proportional-Integral-Derivative Controller

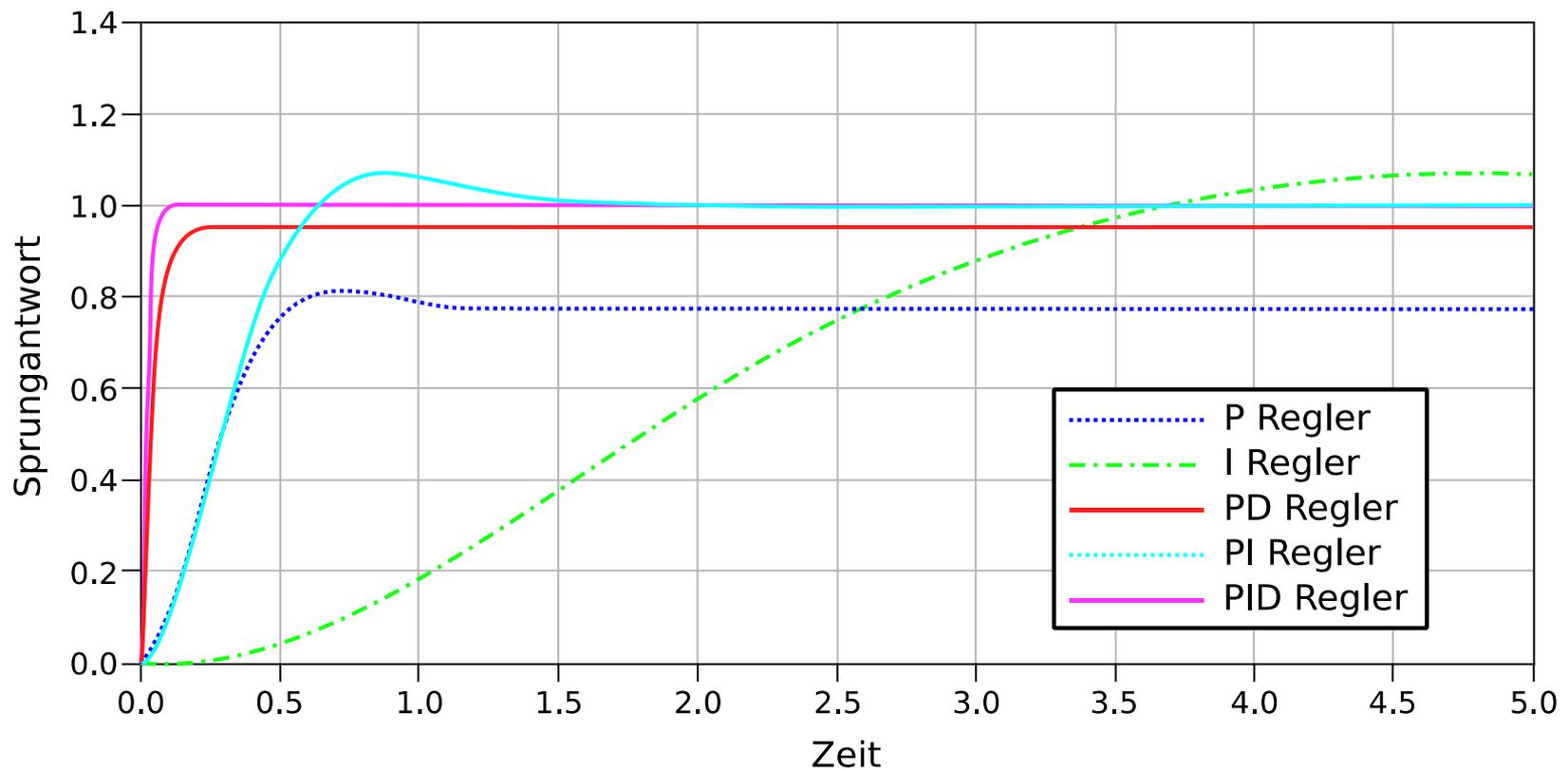
$$\tau = K_p \theta_d + K_i \int \theta_d(t) dt + K_d \dot{\theta}_d$$

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



PID-Regelung (2)

Vergleich von P-, I-, PD-, PI- und PID-Regler in einem Regelkreis mit PT2- (Schwingungs)-Glied als Regelstrecke



Grundlagen der Regelung

Übersicht

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

Drehmomentregelung

- **Dynamisches Robotermodell** wird in die Regelung miteinbezogen

- Dynamische Gleichung für 1DoF-Arm:

$$\tau = M\ddot{\theta} + mgr \cos(\theta)$$

- Vereinfachte Annahme: Viskose Reibung

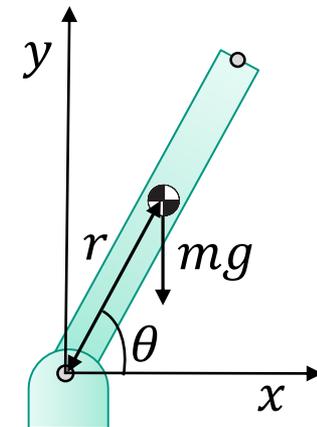
- Reibkoeffizient b

$$\tau = M\ddot{\theta} + mgr \cos(\theta) + b\dot{\theta}$$

- PID-Regler

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

- τ Drehmoment des Motors
- M Inertialtensor
- m Masse des Arms
- r Distanz vom Gelenk zum CoM



Stabilität

- Ziel: Stabiles System, d.h. **Regelabweichung geht mit der Zeit gegen 0**

- **1. Annahme:** $K_i = 0$; $g = 0$ → Roboter bewegt sich in horizontaler Ebene
- Gleichungen des PID- Reglers einsetzen (θ_v : Sollwert „desired value“)

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

- **2. Annahme:** Festpunktregler, d.h. Zielposition halten bei konstantem θ_d ($\dot{\theta}_v = \ddot{\theta}_v = 0 \rightarrow \theta_d = \theta_v - \theta$; $\dot{\theta}_d = -\dot{\theta}$; $\ddot{\theta}_d = -\ddot{\theta}$)

$$\ddot{\theta}_d + \frac{(b + K_d)\dot{\theta}_d}{M} + \frac{K_p}{M}\theta_d = 0 \rightarrow \ddot{\theta}_e + 2\zeta\omega_n\dot{\theta}_d + \omega_n^2\theta_d = 0$$

- Dämpfungsgrad: $\zeta = \frac{b+K_d}{2\sqrt{K_pM}}$; Eigenfrequenz: $\omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{M}}$

Stabilität (2)

■ Lösung der DGL mit **Laplace-Transformation**

$$a_n \theta_d^{(n)} + a_{n-1} \theta_d^{(n-1)} + \dots + a_2 \ddot{\theta}_d + a_1 \dot{\theta}_d + a_0 \theta_d = 0$$

$$\rightarrow a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0$$

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

$$\rightarrow s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2 = 0$$

■ **Komplexe Wurzel:**

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

Stabilität (3)

■ 3 mögliche Lösungstypen

■ $\zeta > 1$: aperiodische Lösung

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

$$\tau_{1,2} = -\frac{1}{s_{1,2}}$$

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

■ $\zeta = 1$: aperiodischer Grenzfall

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

$$\tau = \frac{1}{\zeta \omega_n}$$

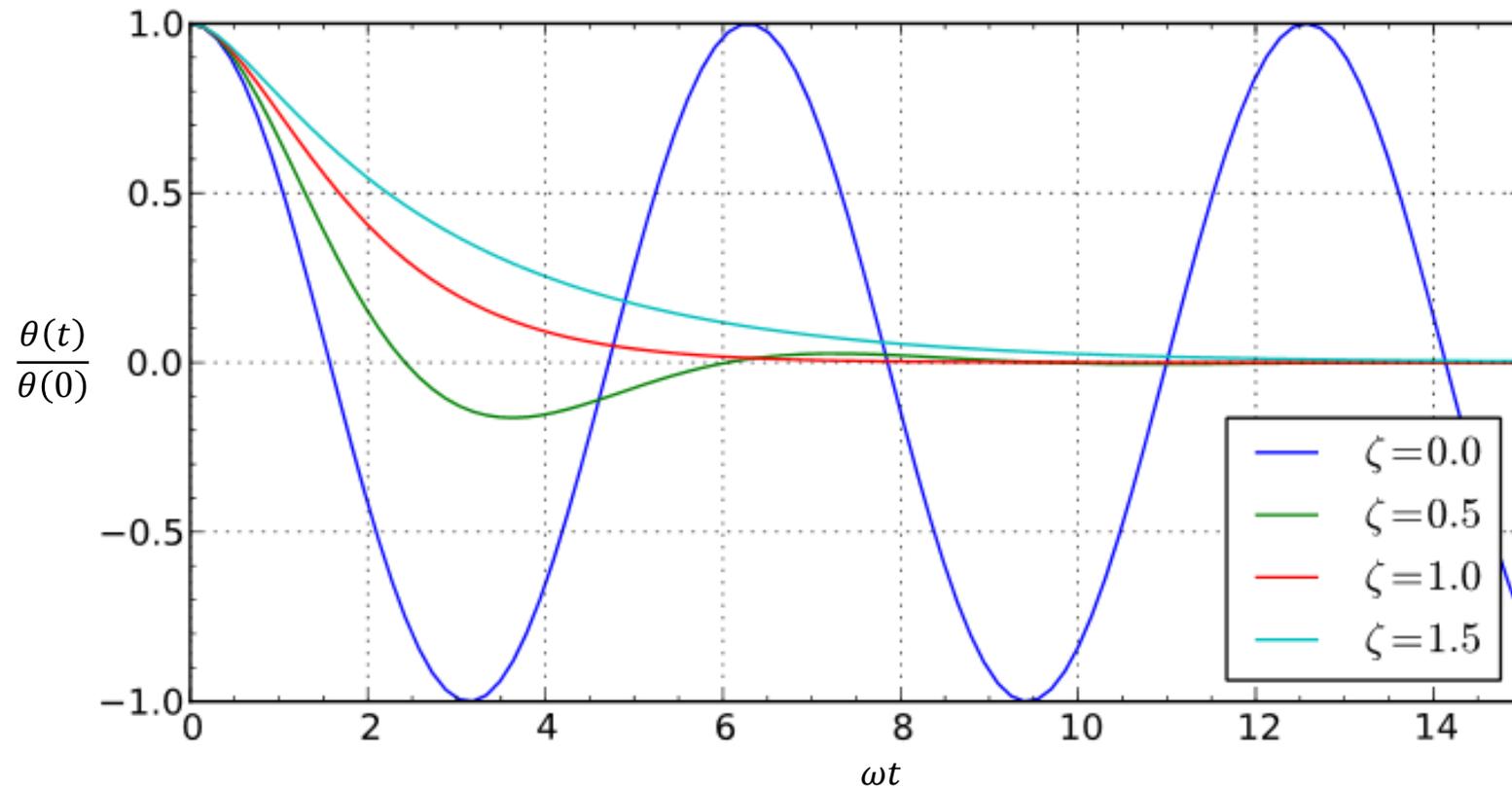
Der Zielwert wird schnell erreicht, und das System überschwingt gerade nicht

■ $\zeta < 1$: gedämpfte Schwingung

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

Das System überschwingt

Stabilität (4)



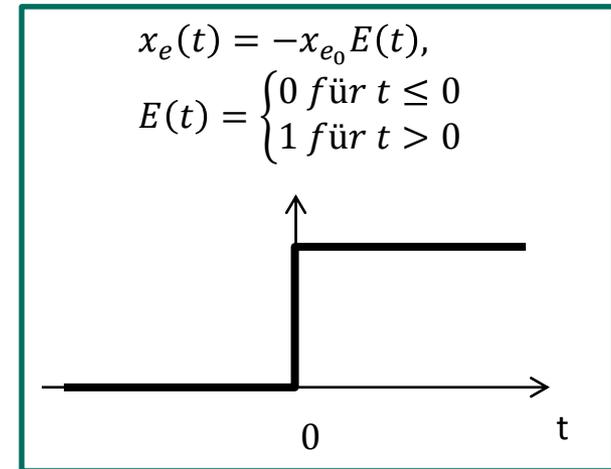
Grundlagen der Regelung

Übersicht

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

Testfunktionen

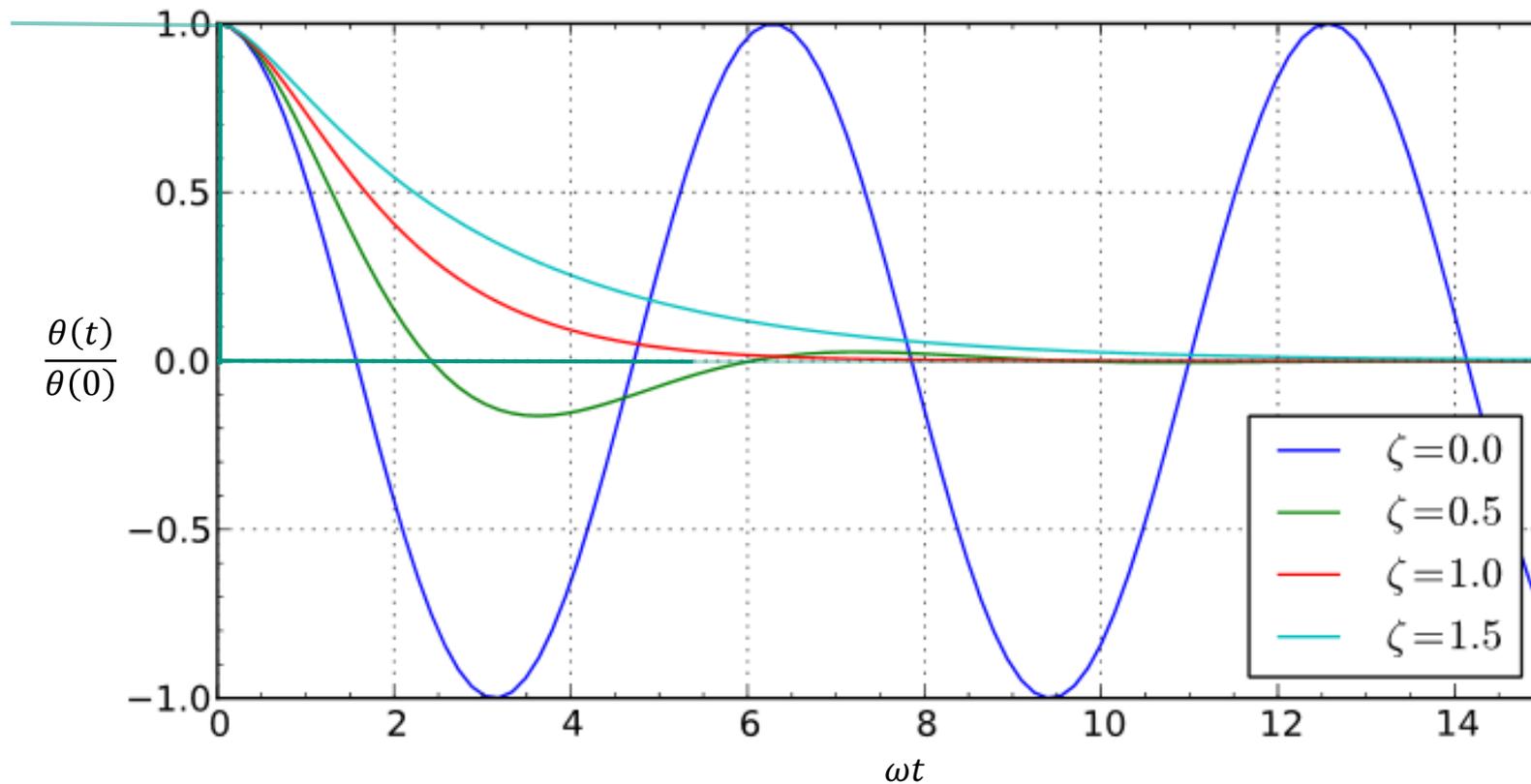
- Impulsfunktion
- Sprungfunktion
- Anstiegsfunktion
- Harmonische Funktion



- Wird die Ausgangsgröße auf die Eingangsgröße bezogen, so entsteht die normierte Sprungantwort $h(t)$ (Übertragungsfunktion der Regelstrecke).

Testfunktionen (2)

- Sprungfunktion bei $t = 0$



Robotik I: Einführung in die Robotik Regelung von Robotersystemen II

Tamim Asfour

KIT-Fakultät für Informatik, Institut für Anthropomatik und Robotik (IAR)
Hochperformante Humanoide Technologien (H²T)



Inhalt

- Einführung
- Grundlagen der Regelung
- Regler
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

Regler

- Übersicht
 - Zustandsregler
 - Kaskadenregler
 - Adaptive Regler

Zustandsregler

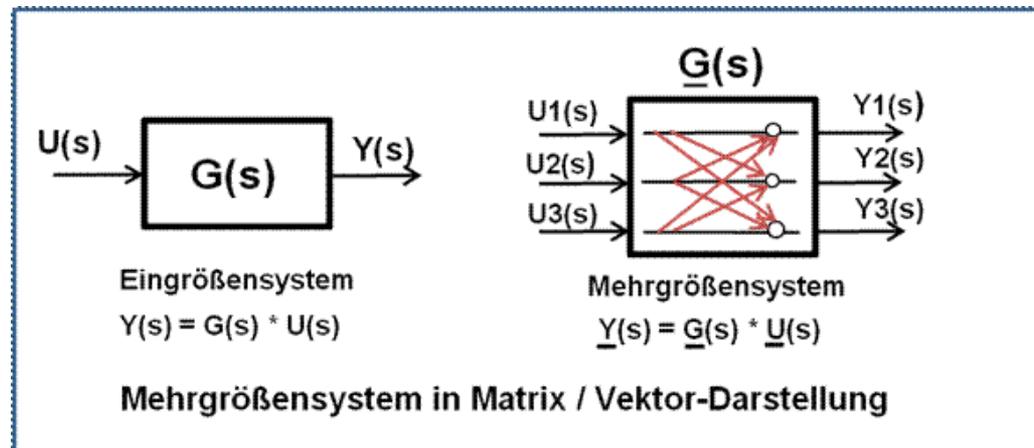
■ Verbessertes Regelverhalten

- Regelabweichung und idealerweise alle **Zustandsgrößen** der Regelstrecke stehen zu Verfügung

$$u(t) = r(t) - k_1 x_1(t) - k_2 x_2(t) - \dots - k_n x_n(t)$$

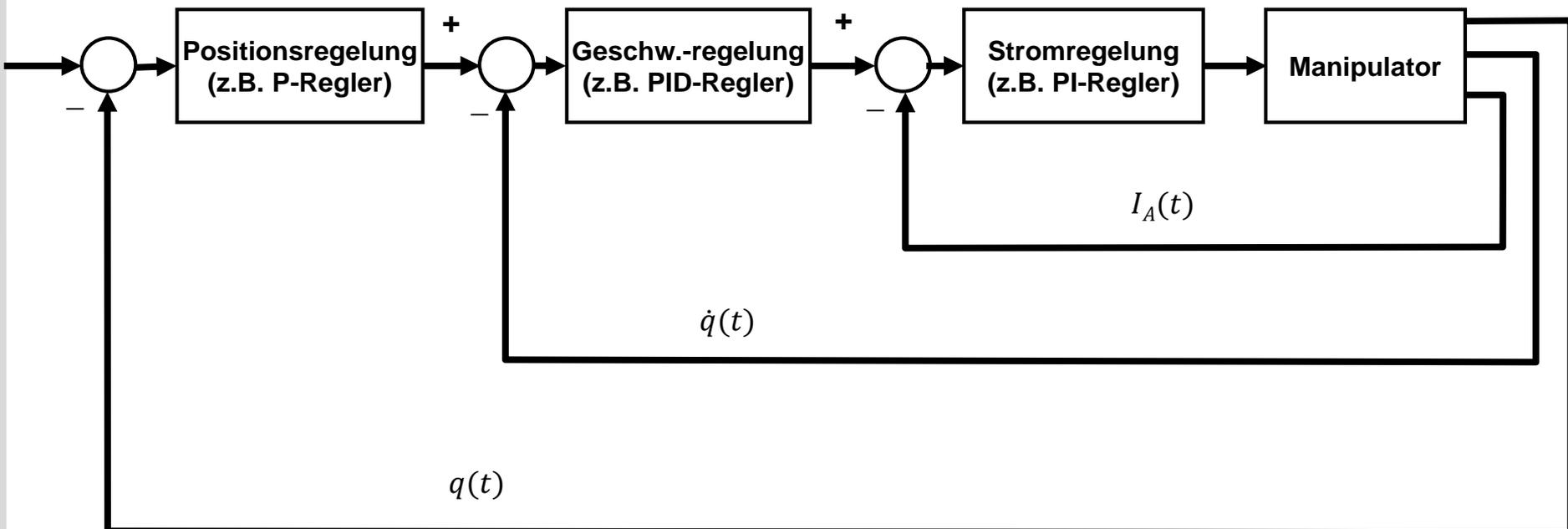
■ Regelungstechnische Behandlung

- Mehrgrößensysteme
- Nichtlineare und zeitvariable Übertragungssysteme



Kaskadenregelung

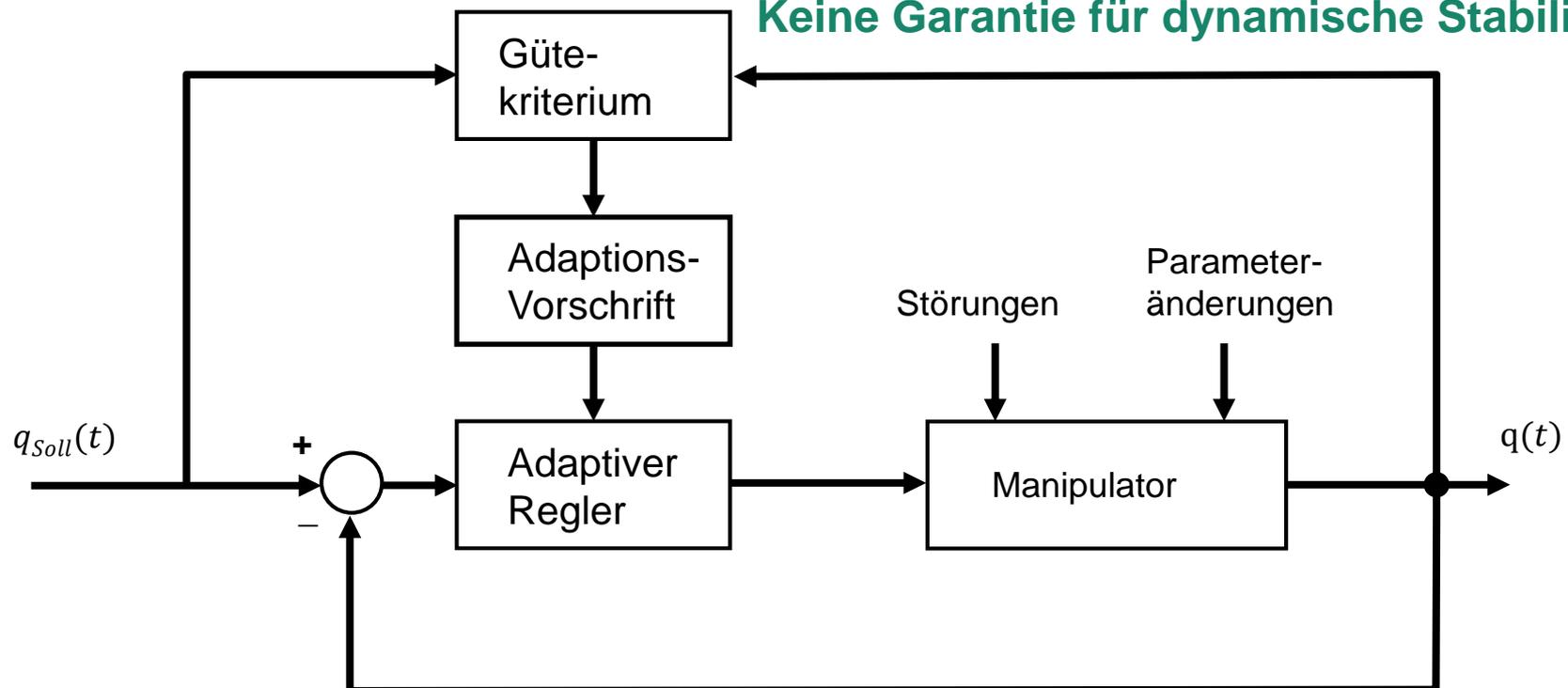
- Manipulator = **Mehrgrößensystem**
 - Unabhängige lineare Einzelregelkreis der einzelnen Gelenke



Adaptive Regelung

- Lageabhängige und somit **zeitveränderliche Systemteile** werden als Parameterschwankungen aufgefasst
 - Beispiel: Überschallflugzeuge mit Reglern je nach aktueller Mach-Zahl

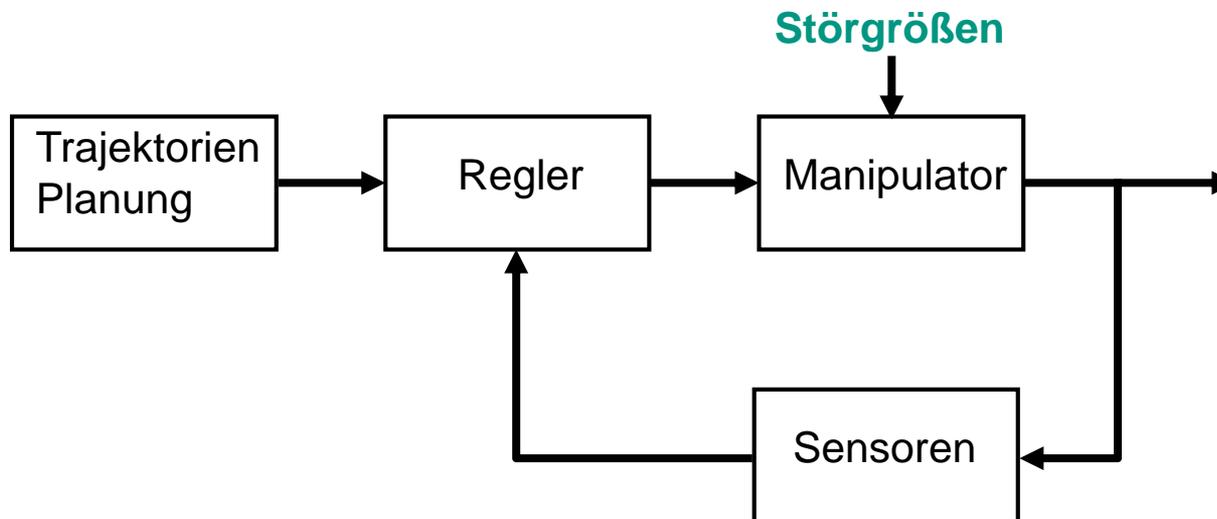
Keine Garantie für dynamische Stabilität



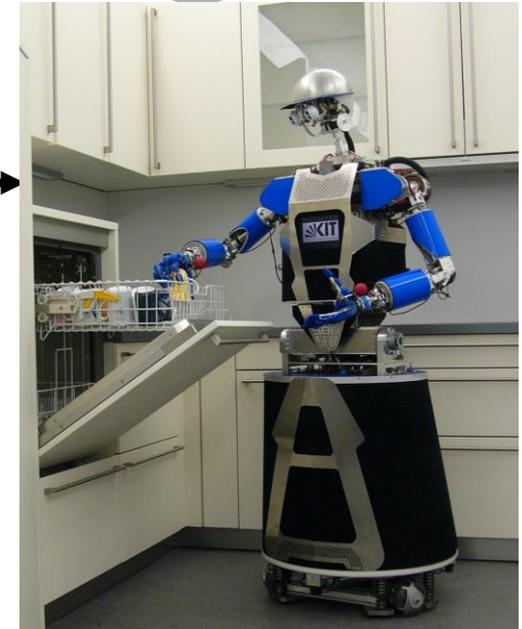
- Einführung
- Grundlagen der Regelung
- Regler
- **Regelungskonzepte für Manipulatoren**

Regelung von Manipulatoren

Blockbild einer Manipulator-Regelung



Umwelt



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 von Manipulatoren

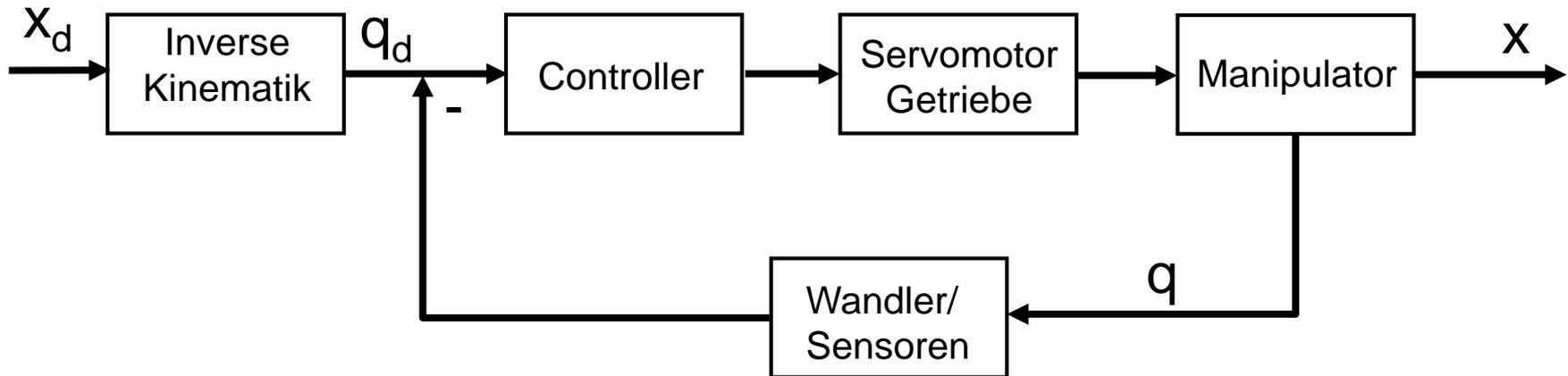
Ausgangspunkt: Dynamikmodell

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

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

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

Regelung im Gelenkwinkelraum



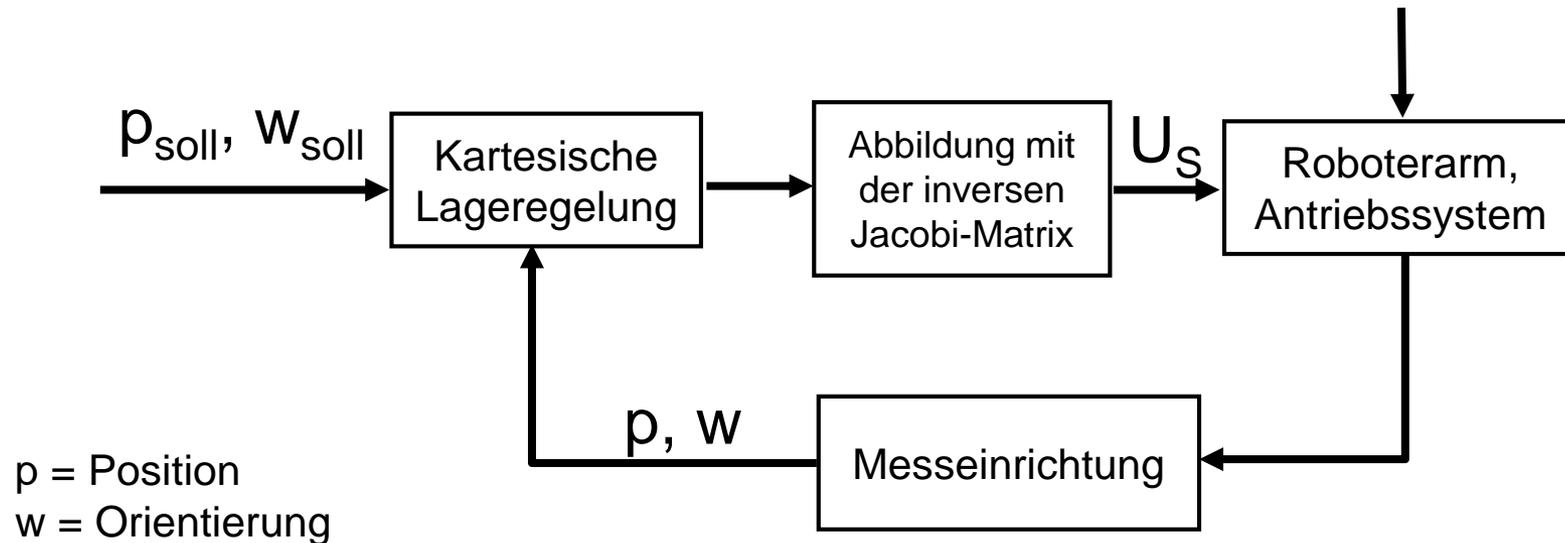
■ Koordinatentransformation

→ Soll-Trajektorien im Gelenkwinkelraum

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

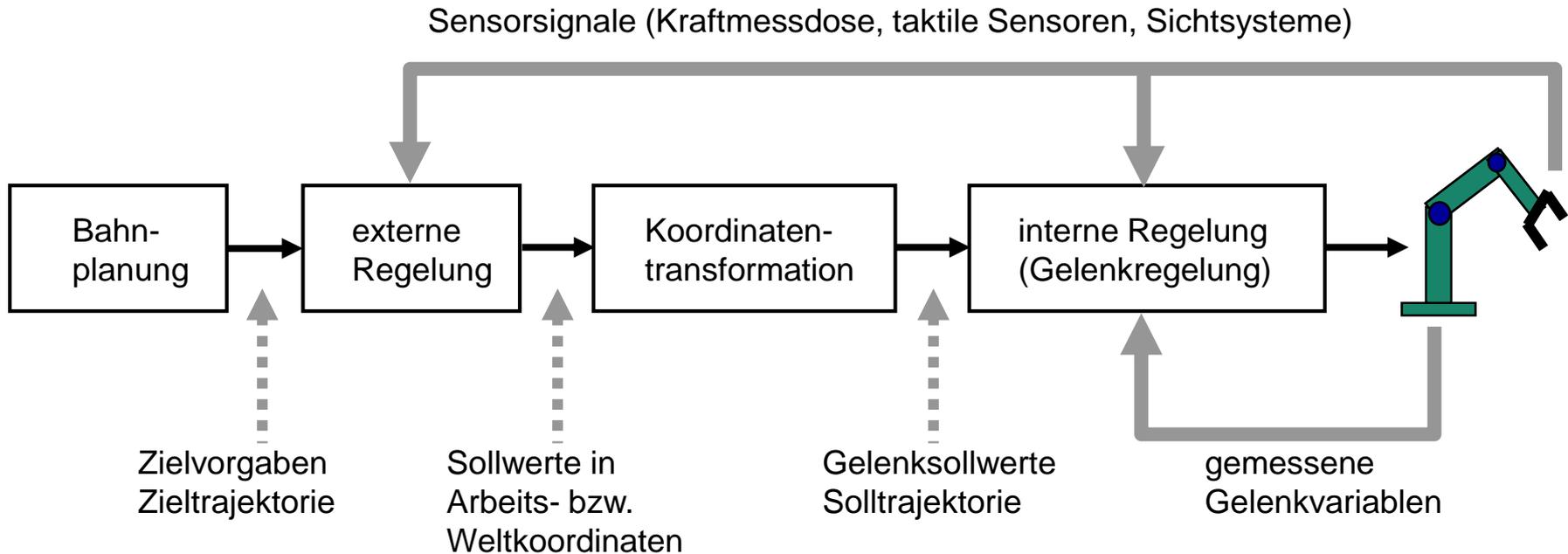
Regelung im kartesischen Raum

Lasten: Kräfte, Momente



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

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, die Interaktionskräfte berücksichtigen müssen
 - Hybride Kraft-/Positionsregelung
 - Impedanz Regelung

Kraft-Positionsregelung

■ Grundlegendes Problem:

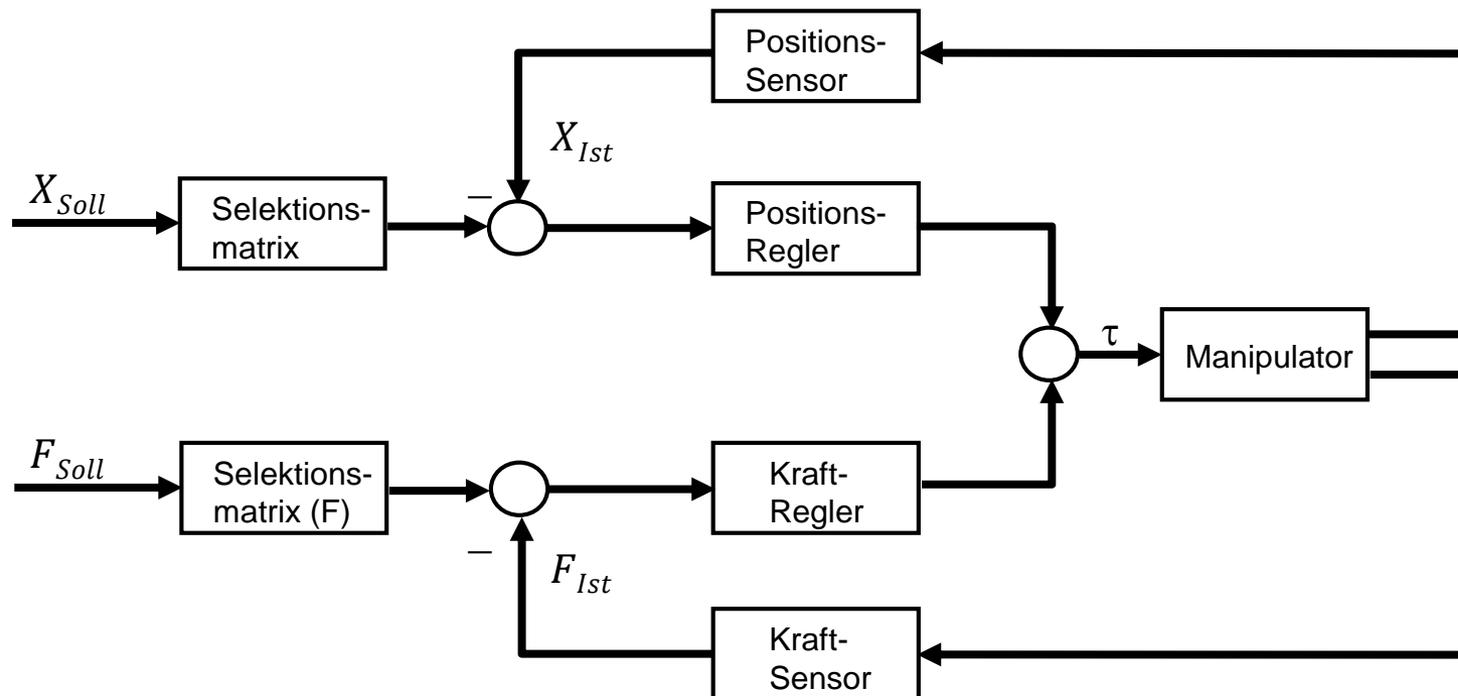
- Positionen und Kräfte sind eng miteinander verknüpft.
- Steht der Roboter in Kontakt zur Umgebung so bedeutet jede Positionsänderung auch eine Kraftänderung und umgekehrt.

■ 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



Hybride Kraft-/Positionsregelung (2)

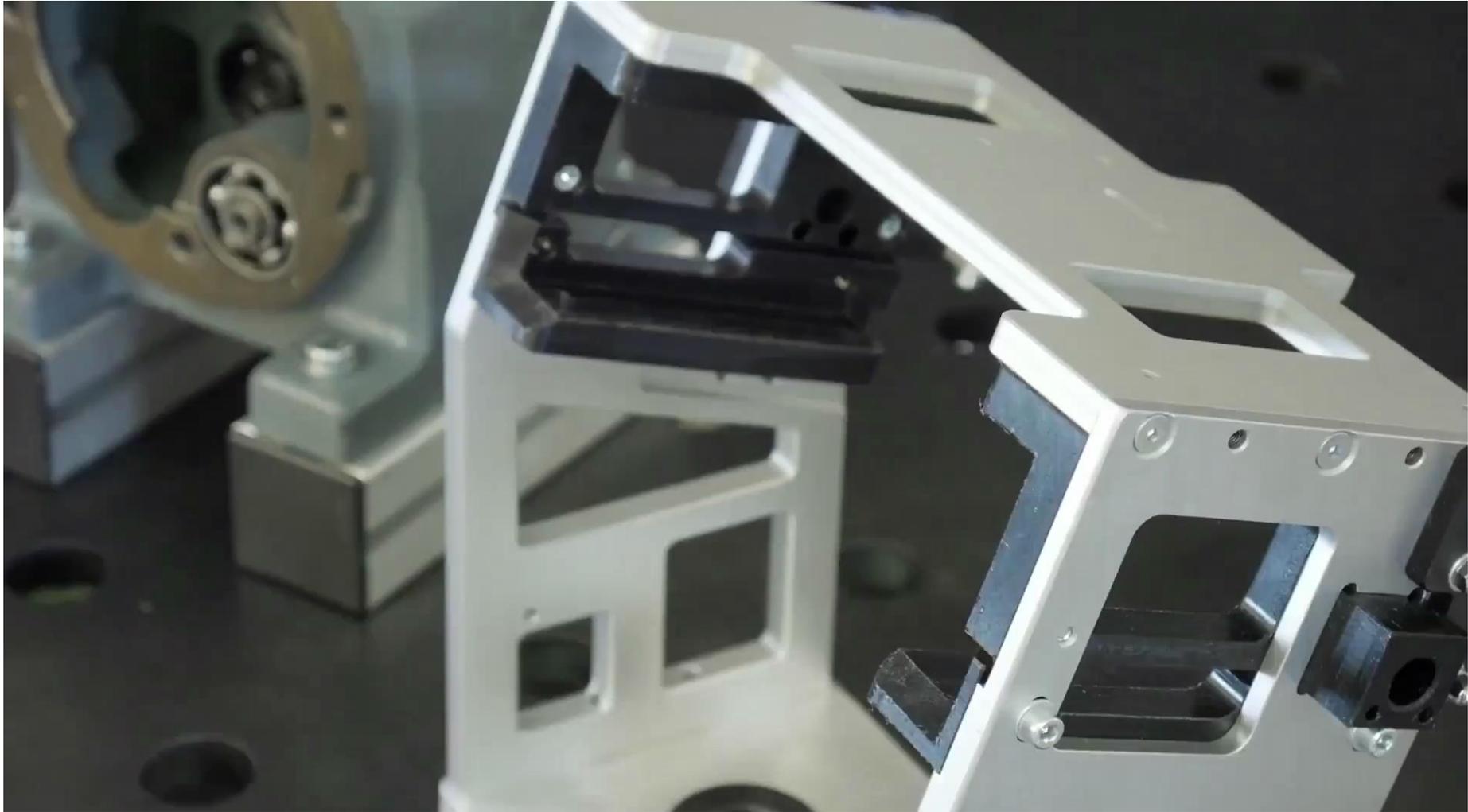
- Achsen Regelung: Einschieben einer Box
 - kartesische Achsen(relativ zu Kraft-Momenten-Sensor im TCP)
 - Achsen sind unabhängig geregelt

 - z : Positionsregelung auf Bahn/Pfad
 - f_x, f_y : Regelung Kraft auf 0
 - m_x, m_y, m_z : Regelung Moment auf 0

 - Jeder Achsen-Regler ist ein PID-Regler
 - Bei dieser Anwendung ist der I-Anteil (schleichender Fehler) besonders relevant
 - z.B. Achse des Schiebens \leftrightarrow Schacht nicht deckungsgleich, dann I-Anteil sehr relevant

- Probleme in der Praxis:
 - Reibung muss berücksichtigt werden, beim Regeln auf 0 kann bei hoher Reibung sein, dass sich keine Bewegung erfolgt

Regelung von Manipulatoren



Hybride Kraft-/Positionsregelung (3)

- Achsenüberlagerte Regelung: Spiralsuche
 - kartesische Achsen (relativ zu Kraft-Momenten-Sensor im TCP)
 - Hier reicht reiner Hybrider-Kraft-Positionsregler nicht mehr aus, da auf zwei Achsen, nämlich $X - Y$, sowohl Kraft- als auch Position geregelt werden müssen
 - x, f_x, f_y : überlagerte Kraft-Positionsregelung auf Bahn/Pfad
 - z : Regelung Kraft auf 0
 - m_x, m_y, m_z : Regelung Moment auf 0

Regelung von Manipulatoren



Hybride Kraft-/Positionsregelung (4)

- Offene Fragestellung:
 - Programmierung eines Reglers
 - Schnell
 - Intuitiv
 - Robust
 - Einfache Wartung
 - Wiederverwendbar

Impedanz-Regelung

- Regelt die **dynamische 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: $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$) können über die Feder-Dämpfer-Masse-Gleichung direkt in Zusammenhang gebracht werden:

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

Impedanz-Regelung (2)

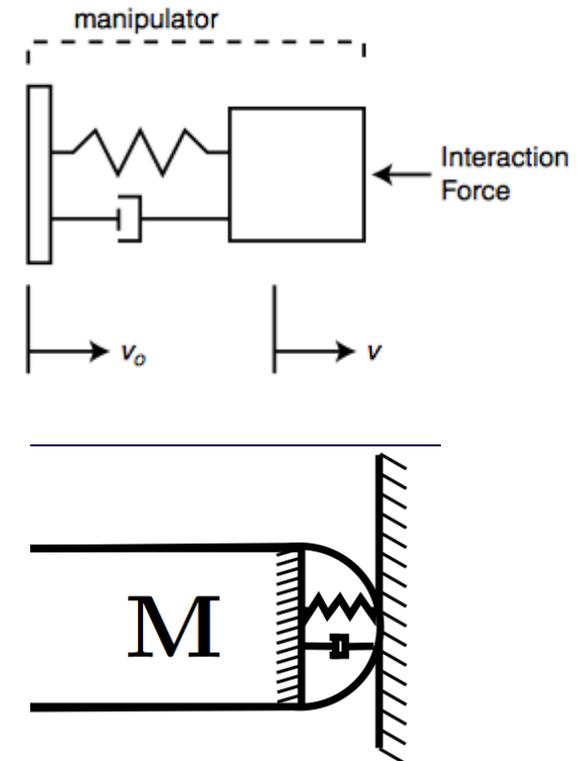
- Die Impedanz kann über Steifigkeit (d), Dämpfung (b) und Trägheit (m) beeinflusst werden

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

L-Transformation

$$F(s) = (d + b \cdot s + m \cdot s^2) \cdot X(s)$$

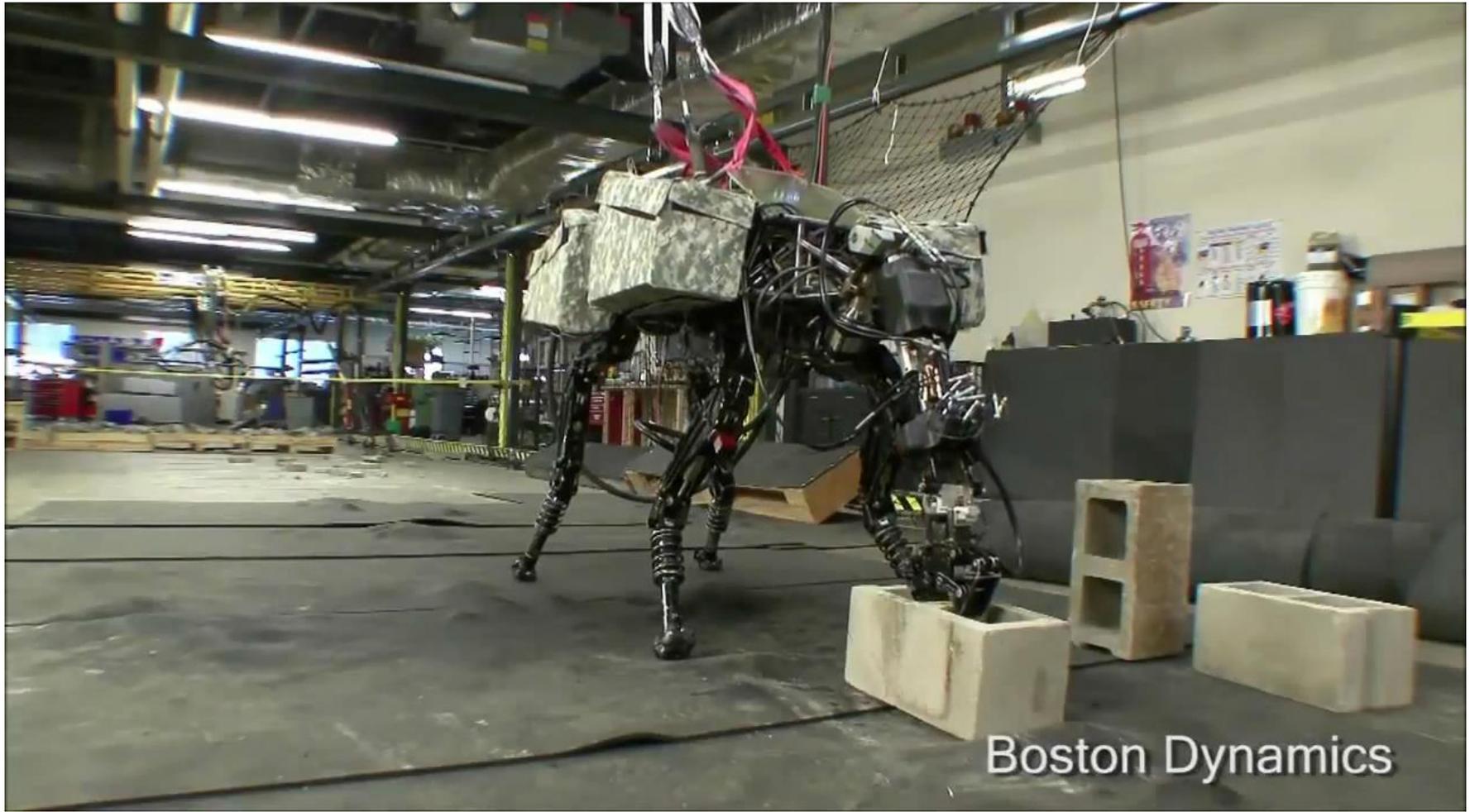
Impedanz des Feder-Dämpfer-Masse-System



Beispiel: Roboterbeine



Beispiel: Hohe Dynamik



Regelung bei ARMAR

- Gelenkwinkelregelung
- Regelung im Kartesischen Raum
- Hybrid Position/Kraft-Regelung
- Impedanz-Regelung: Kühlschranks/Geschirrspülmaschine aufmachen
- Bildbasierte Regelung (visual servoing)
- Bild- und Kraftbasierte Regelung
- Haptik-basierte Regelung (haptic servoing)

Regelung bei ARMAR-III



Sensoren

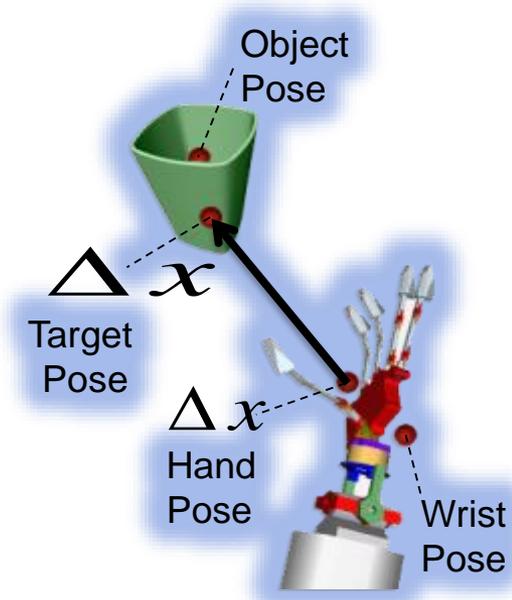
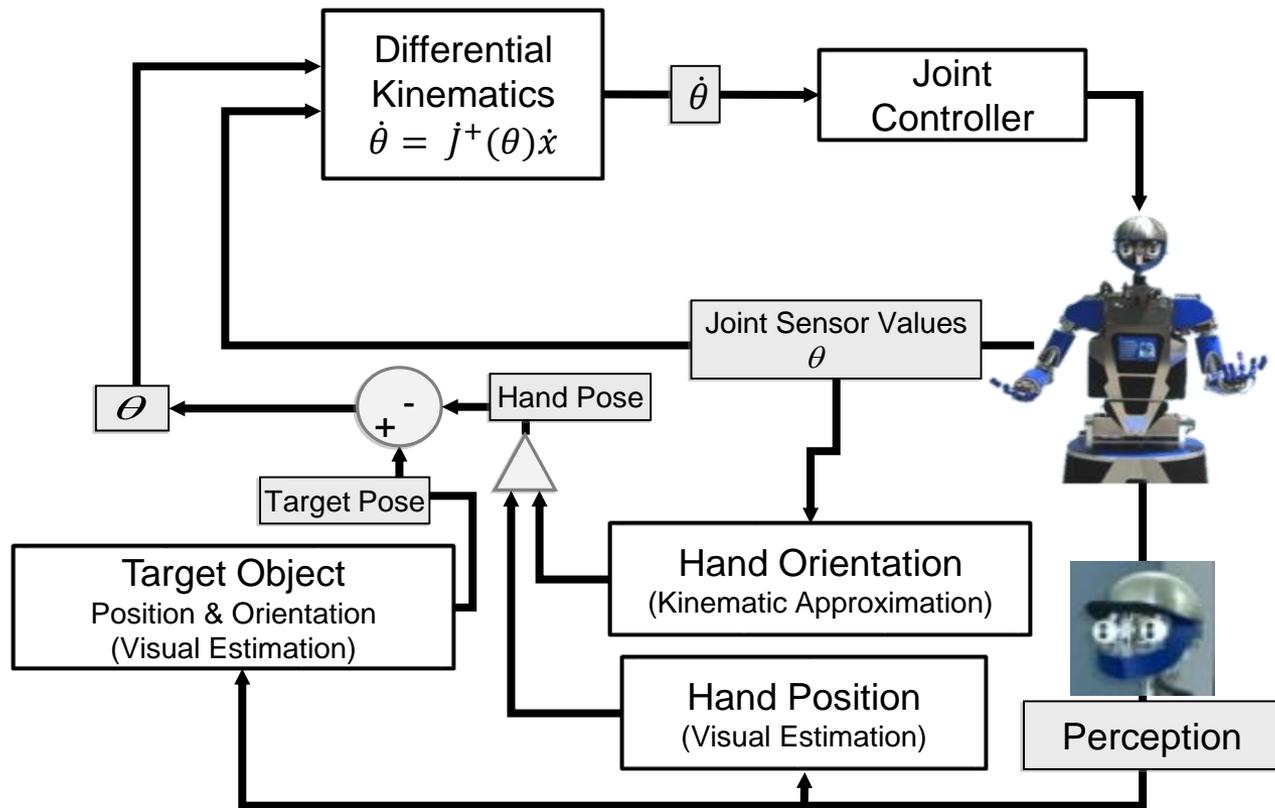
- Kraft-Mess-Sensor an beiden Handgelenken



- Taktile Haut (Ober- und Unter- Arm, Schulter)



Positionsbasiertes Visual Servoing

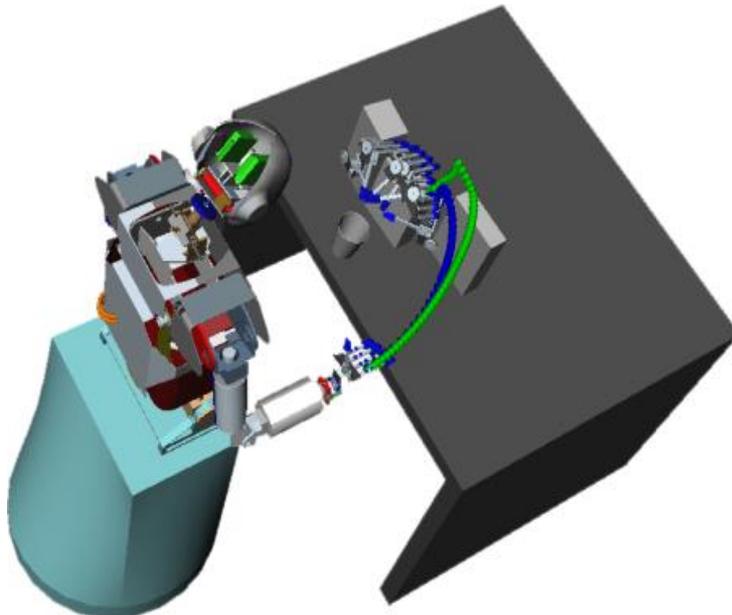
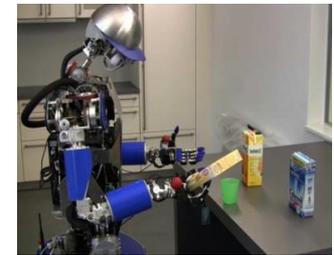
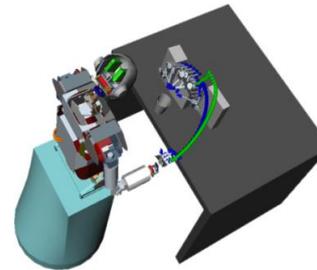
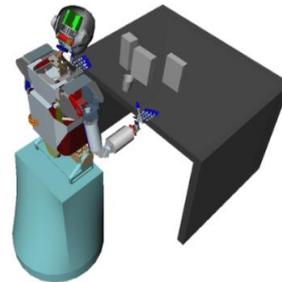
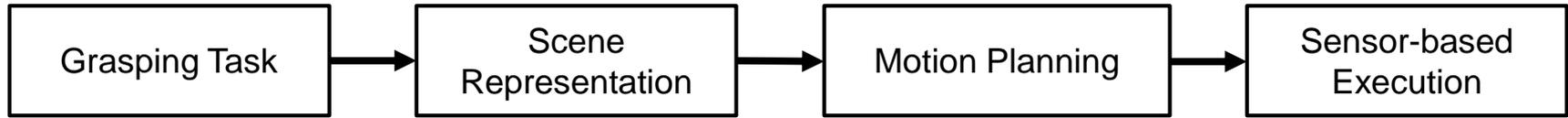


$$\dot{\theta} = j^+(\theta)\dot{x}$$

$$\delta^t = x_{vision}^t - x_{kinematic}^t$$

$$x_{tcp}^{t+1} = x_{kinematic}^{t+1} + \delta_{tcp}^t$$

Ausführung von Manipulationsaufgaben



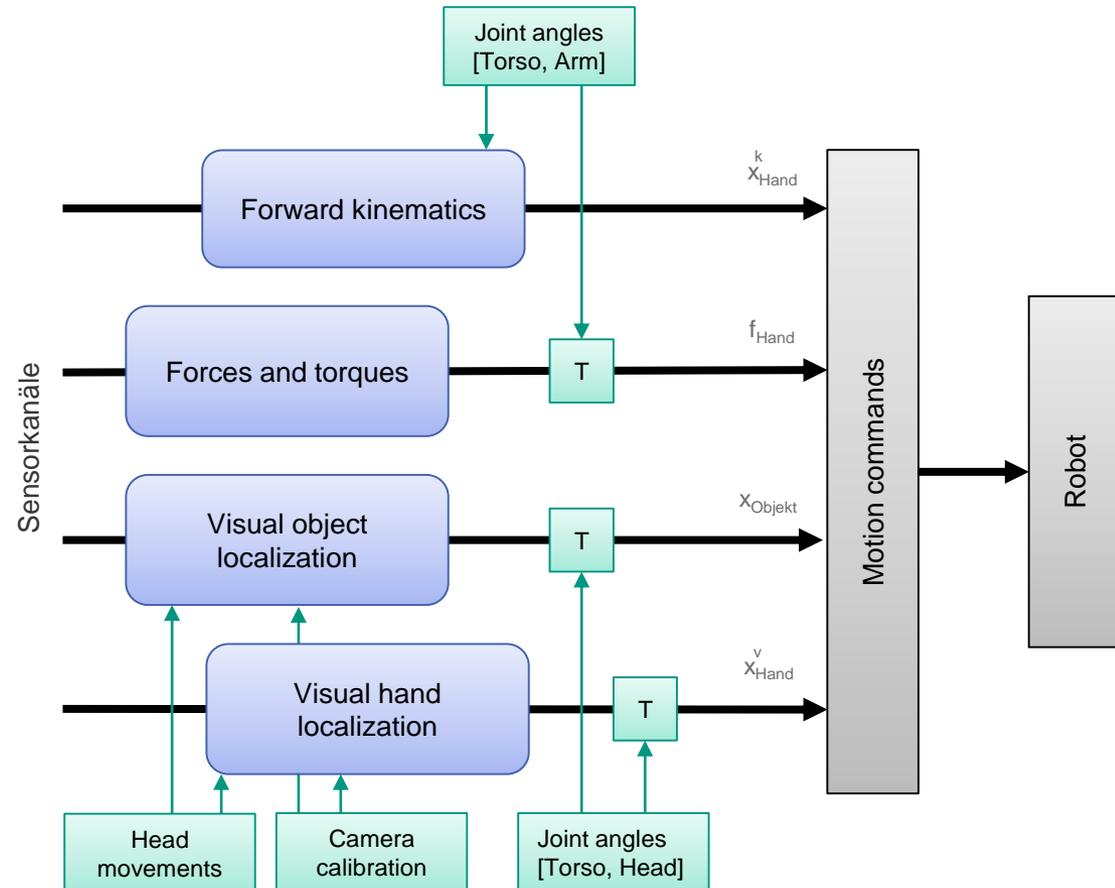
Sensorbasierte Ausführung von Manipulationsaufgaben

■ Bild-basierte Ausführung

- Modellwissen

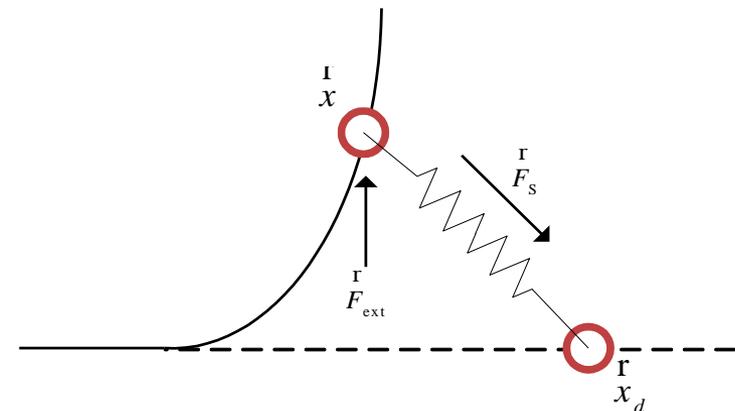
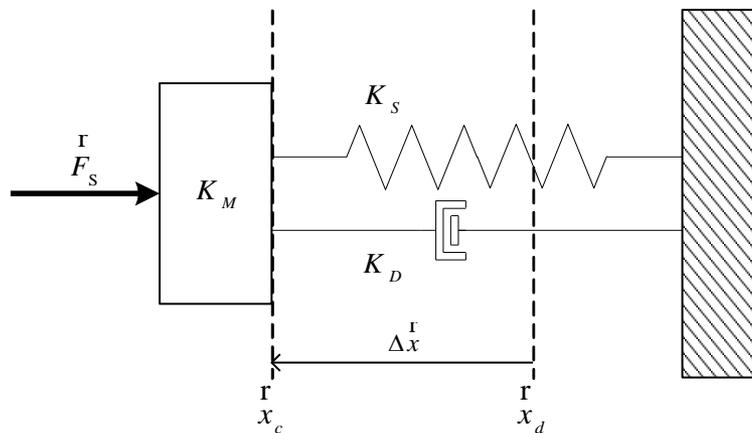
■ Sensoren

- Kraft/Kontakt
- Kameras
- Interne Sensoren

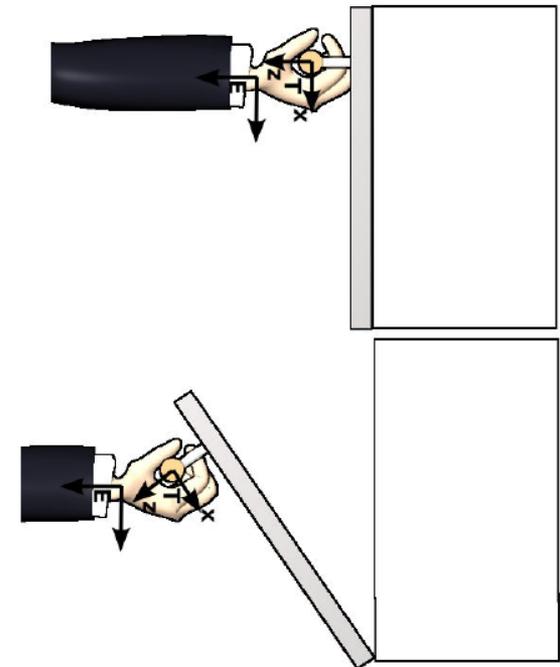
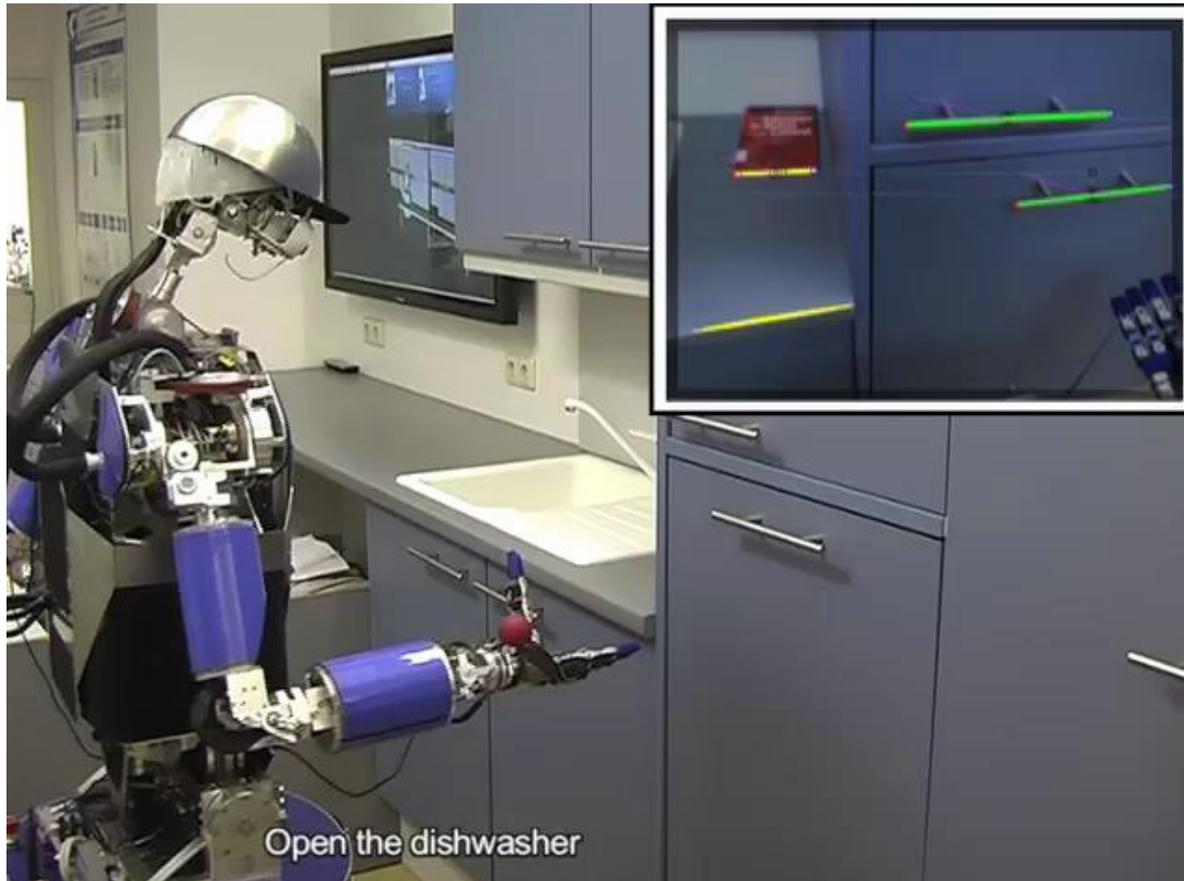


Kraftregelung

- Impedanz-Regelung
- Bewegungsabweichung generiert Kraft
- Geschwindigkeitsbasierte Vereinfachungen:
Steifigkeits- & Dämpfungsregelung

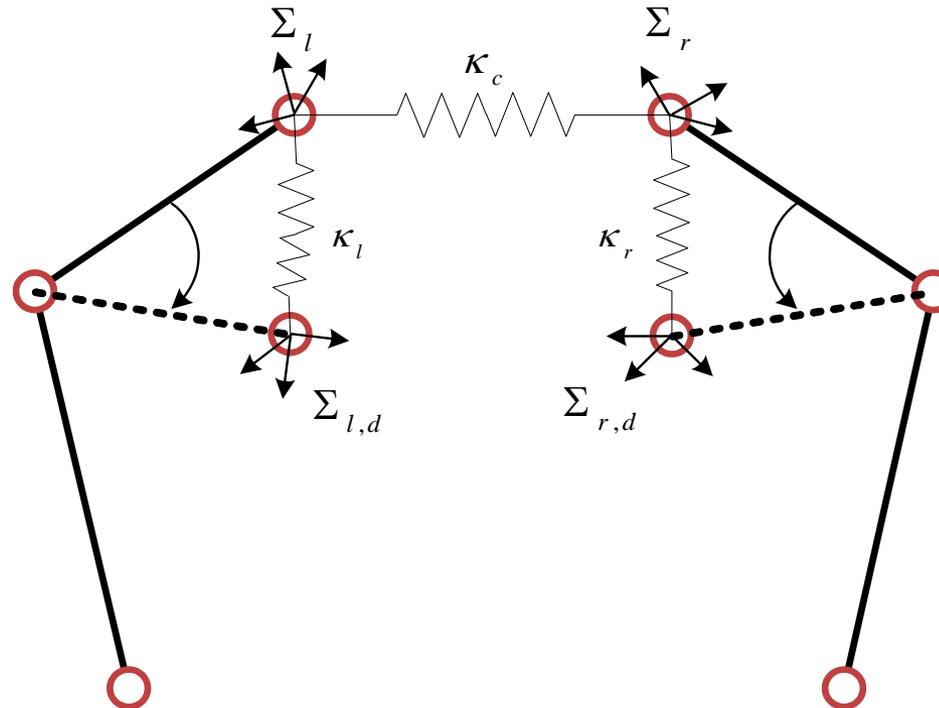


Impedanz-Regelung (Tür aufmachen)



Zweiarmige Impedanzregelung

- Zusätzliche Koppelsteifigkeit zwischen den Endeffektoren
- Steifigkeiten müssen kompatibel sein



Zweiarmige Manipulation

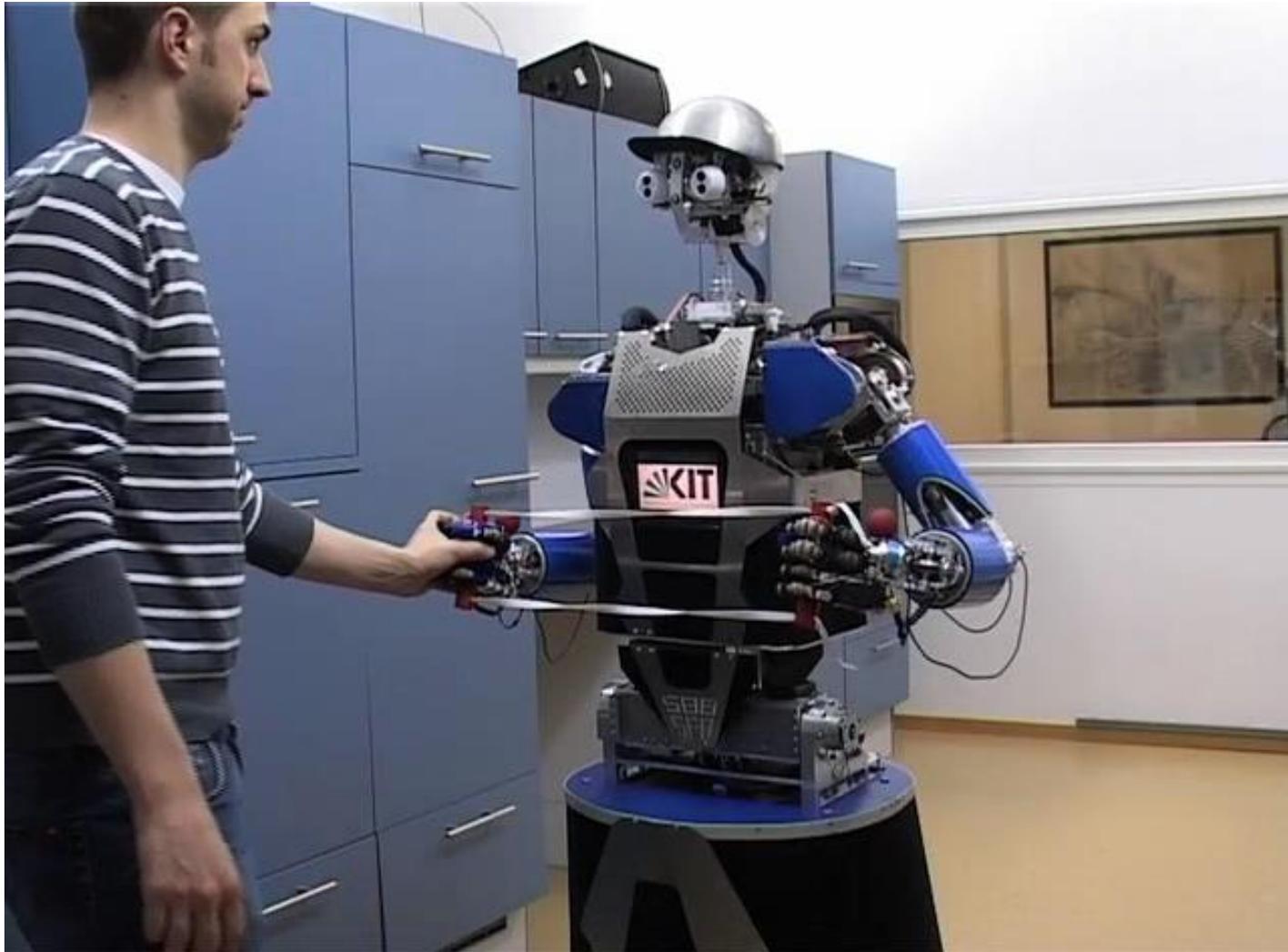
■ Entkoppelte Manipulation

- Keine direkte Kopplung der Arme
- Unabhängige Trajektorien

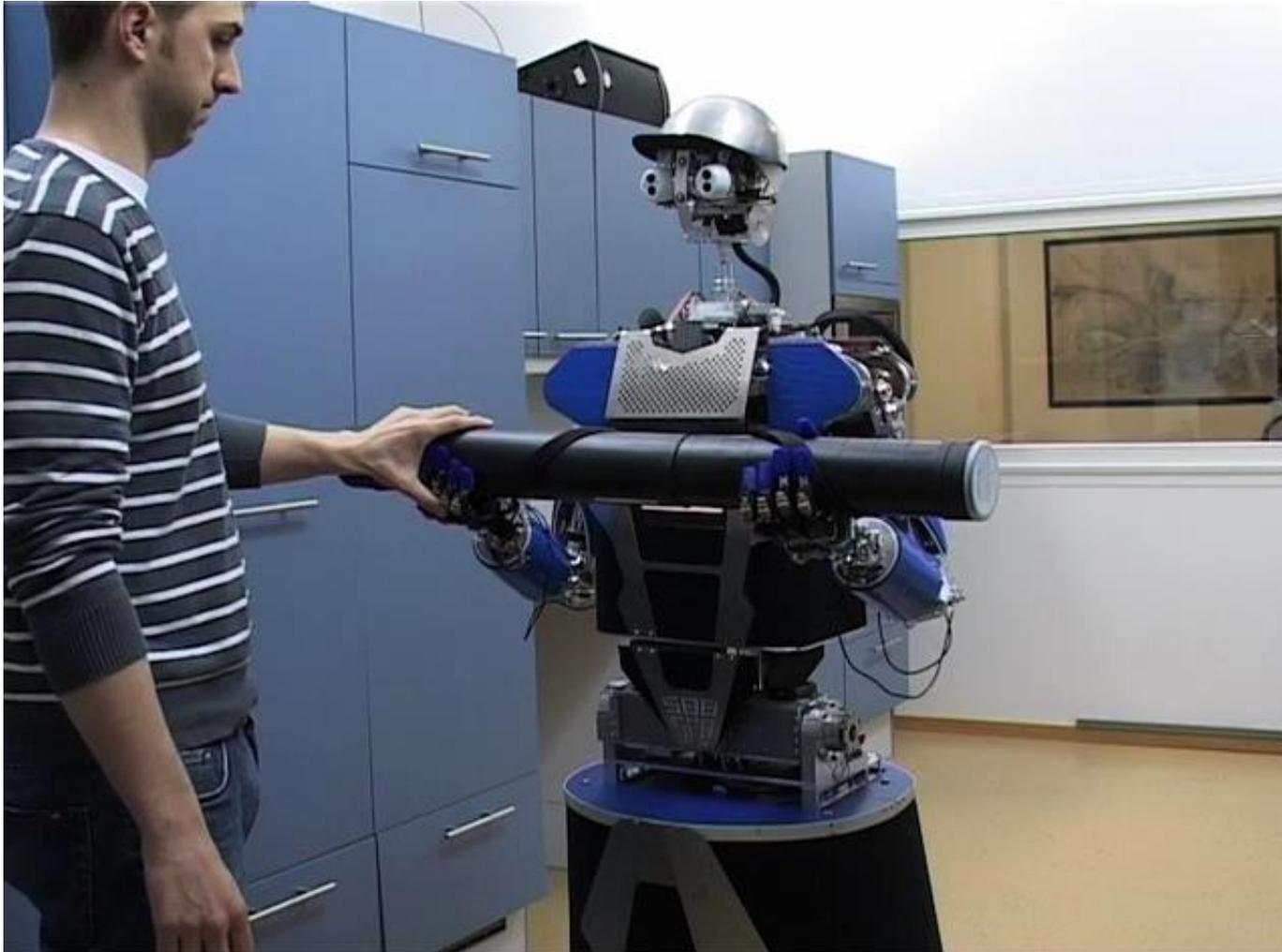
■ Gekoppelte Manipulation

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

Nachgiebig Gekoppelte Manipulation

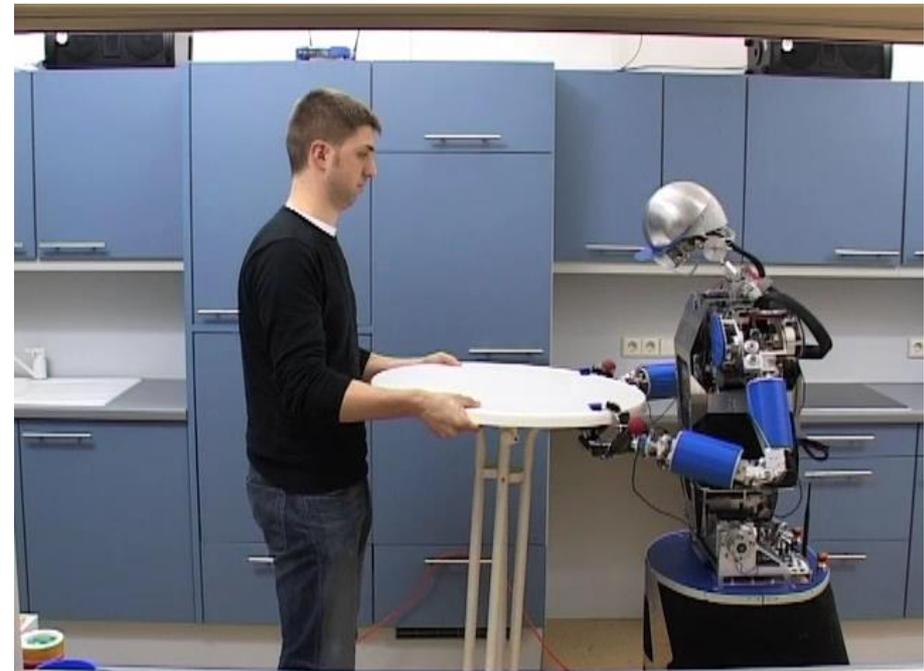


Starr Gekoppelte Manipulation

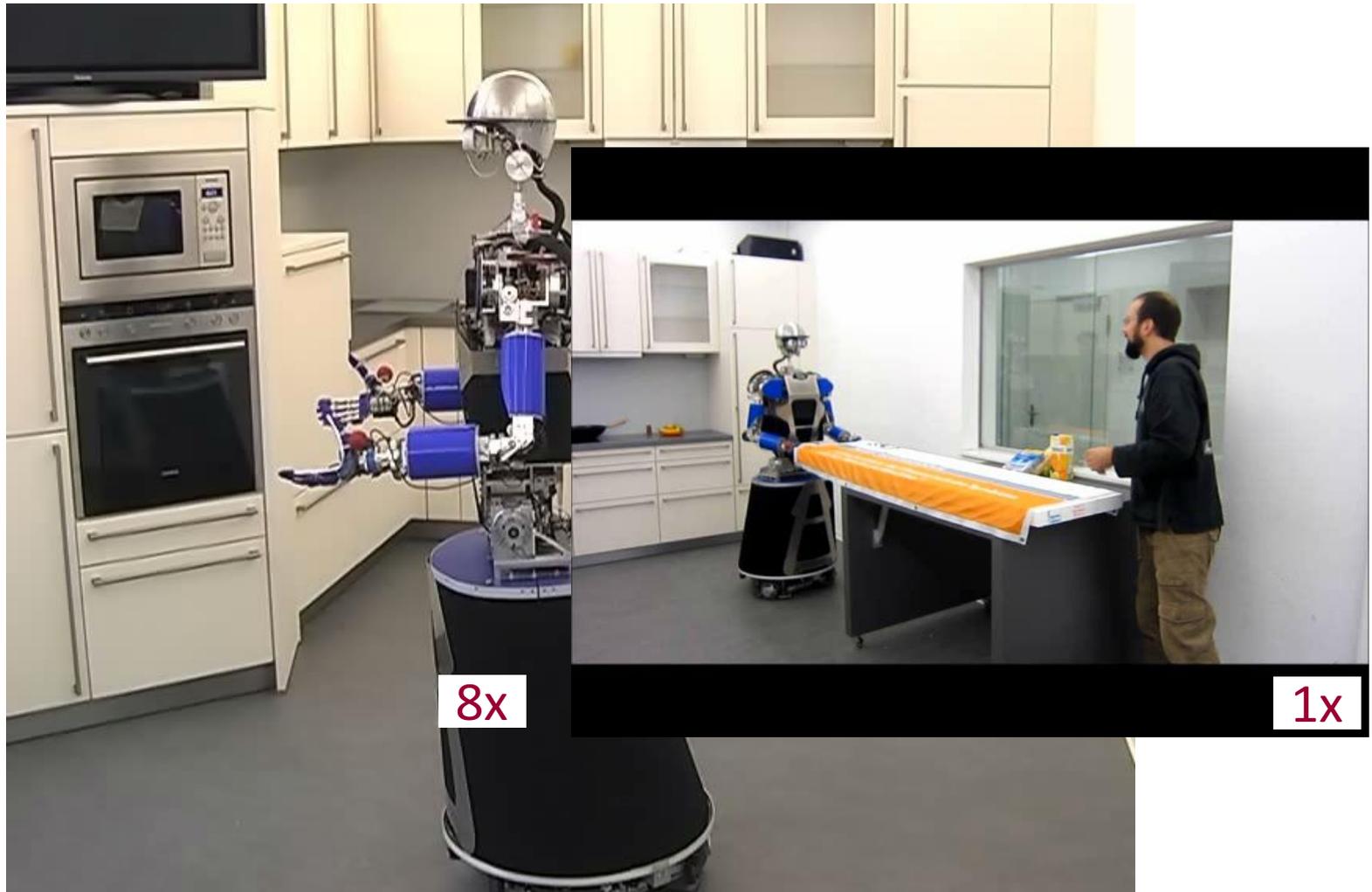


Mensch-Roboter-Kooperation

■ Kraft/Positionsreglung



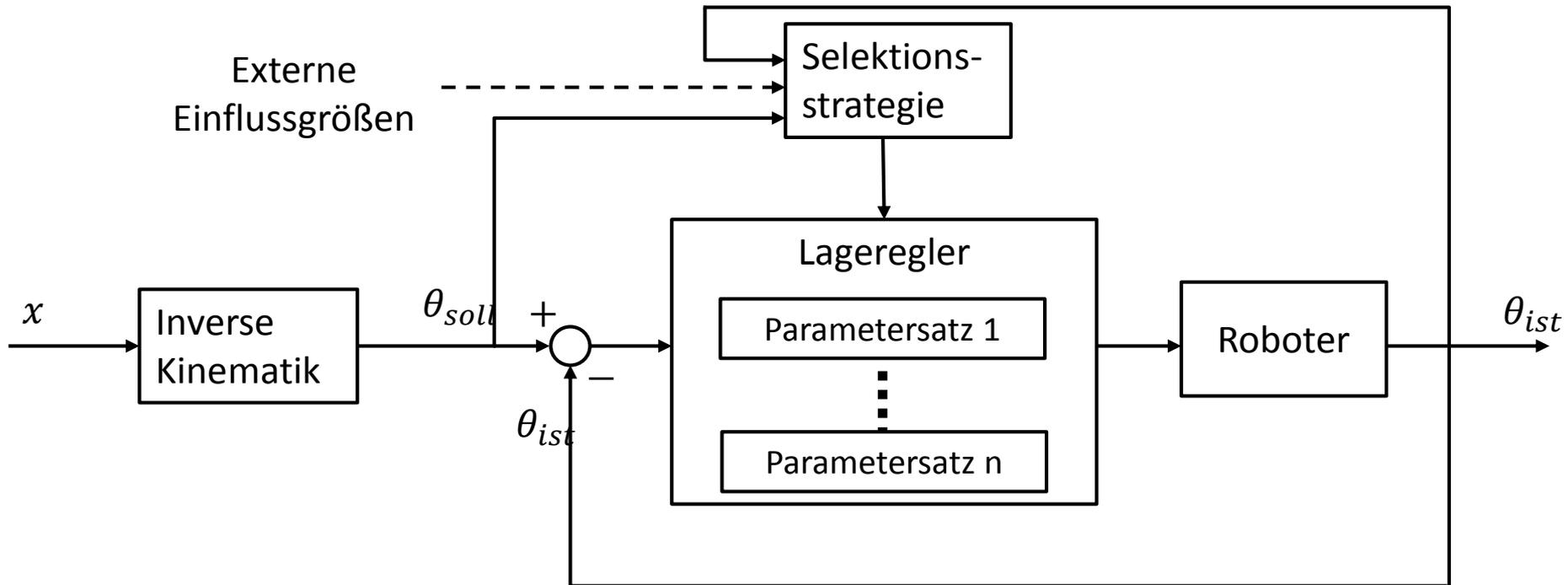
Physical human-robot interaction



Regelungskonzept bei ARMAR-I/II

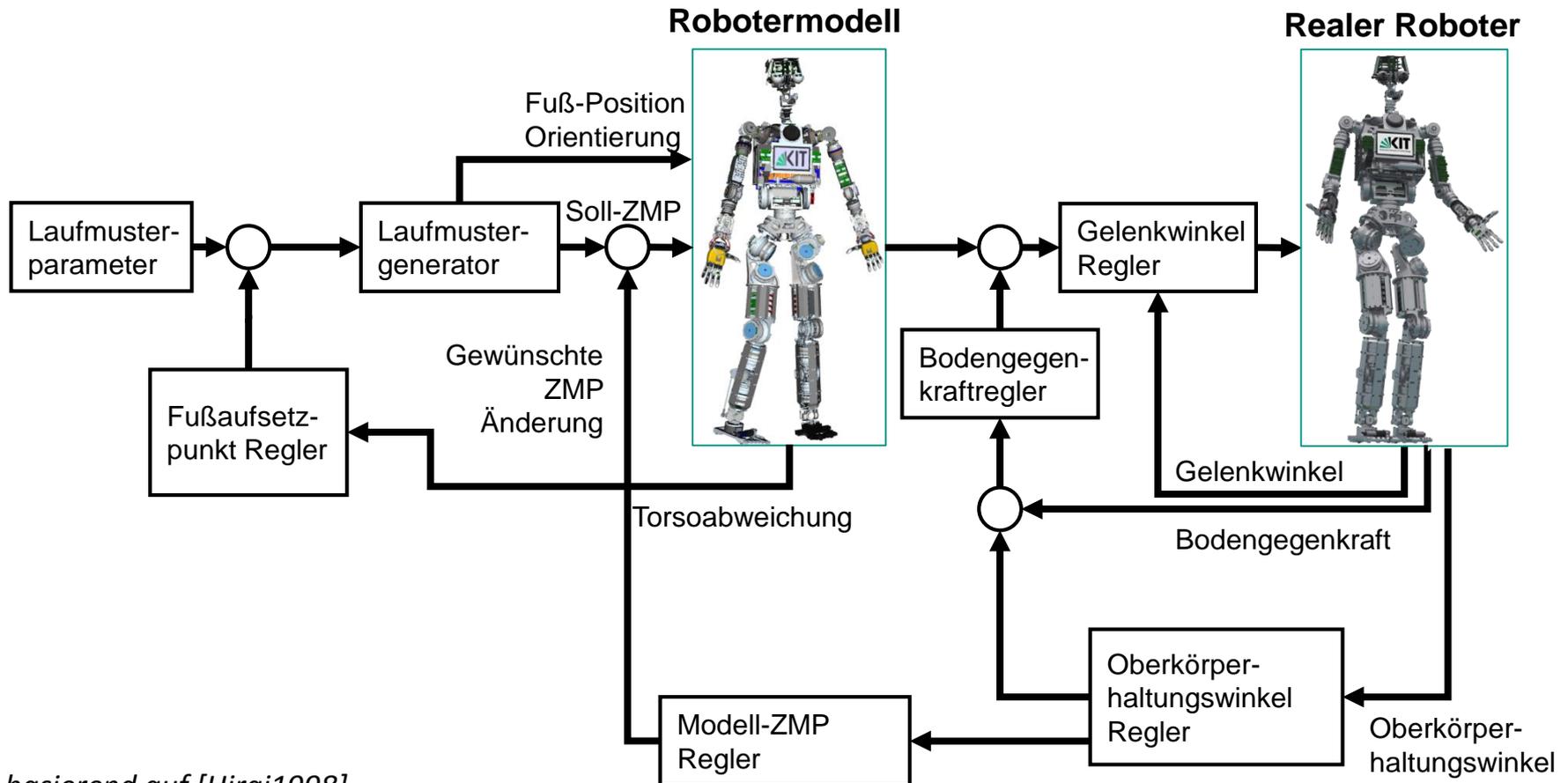
- Konzept zur Gelenkregelung, das die nichtlineare, gekoppelte Systembeschreibung und Echtzeitanforderungen berücksichtigt
 - **Gesteuerte Adaption der Reglerparameter**
 - Stückweise lineare Systembeschreibung jedes Gelenks
 - Bewährte lineare Methoden der Regelungstechnik
 - Reglerentwurf für jeden linearen Teilbereiche
 - Stabilitätsanalyse der Regler möglich
 - Adaptionsvorschriften werden schon beim Reglerentwurf festgelegt
 - on-line-Adaption
 - Auswahl der Reglerparameter im laufenden Betrieb

Regelungskonzept bei ARMAR-I/II



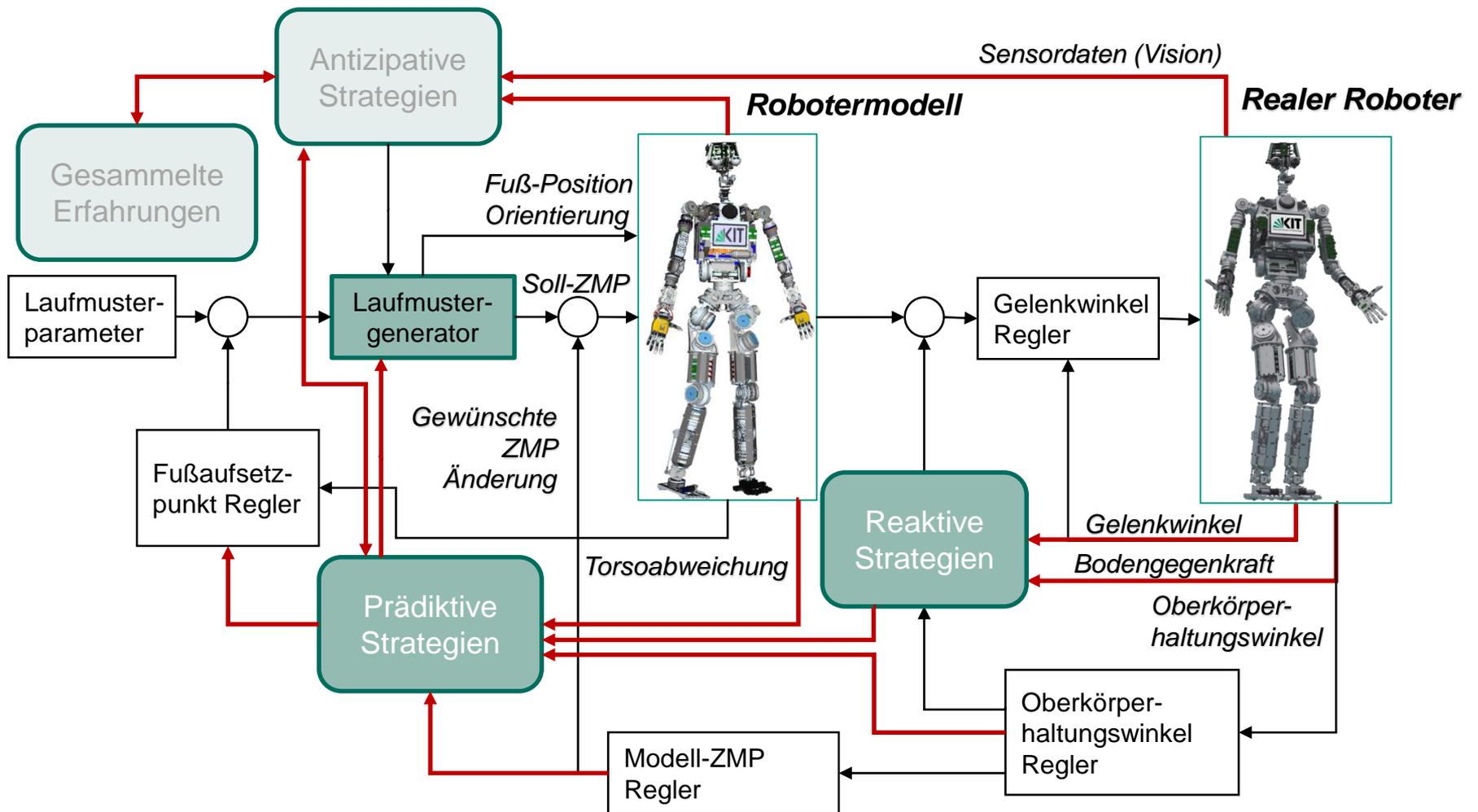
Auftretende konfigurationsabhängige Veränderungen der Dynamik werden durch Adaption der Reglerparameter kompensiert.

Regelung beim zweibeinigen Laufen (ARMAR-4)

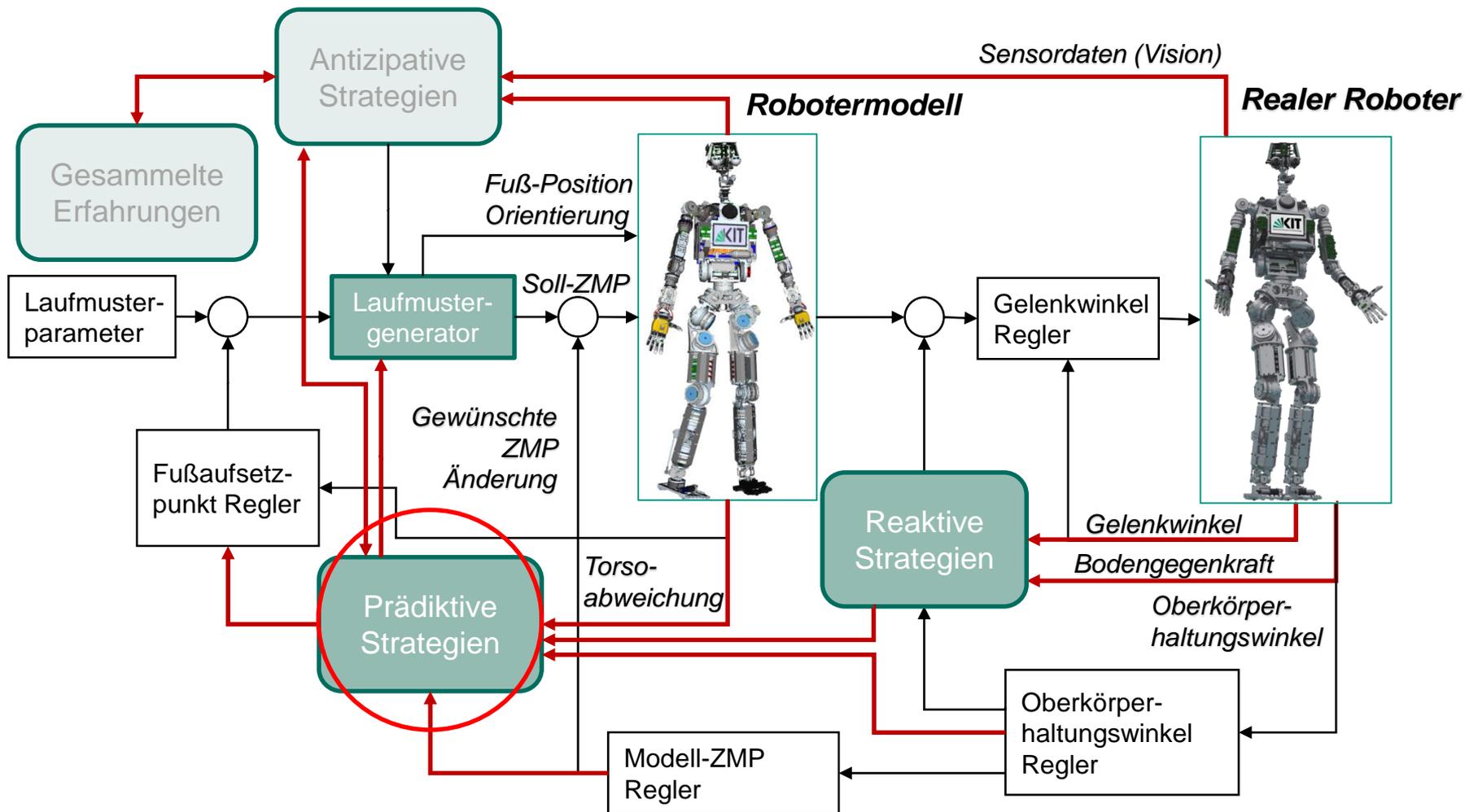


basierend auf [Hirai1998]

Regelung beim zweibeinigen Laufen (ARMAR-4)



Regelung beim zweibeinigen Laufen (ARMAR-4)



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