

# Regelung von Robotersystemen

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann

Dr.-Ing. Sven R. Schmidt-Rohr

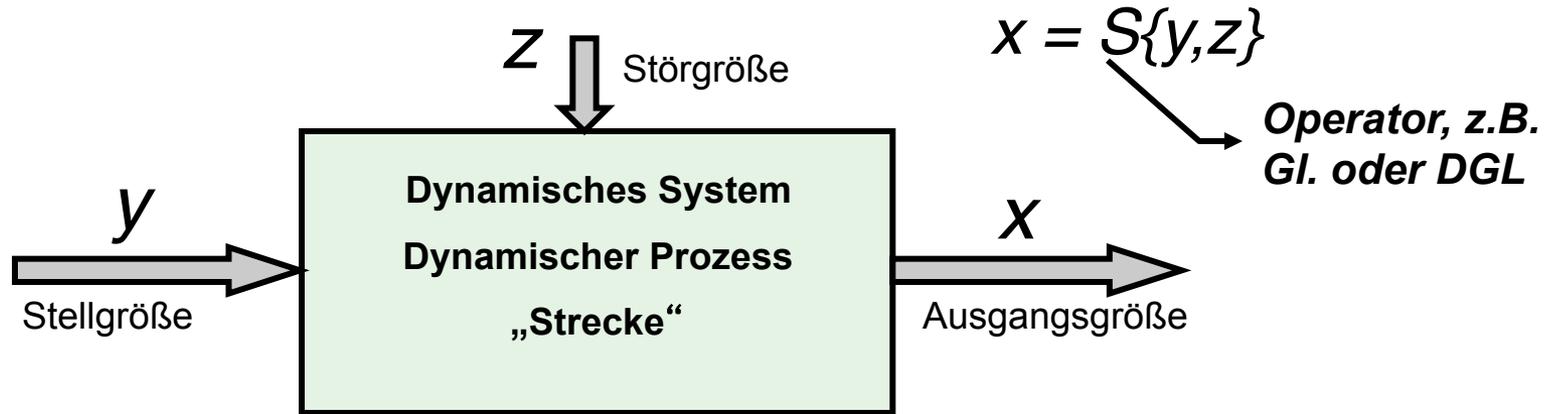
Dr.-Ing. Rainer Jäkel



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

- **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:

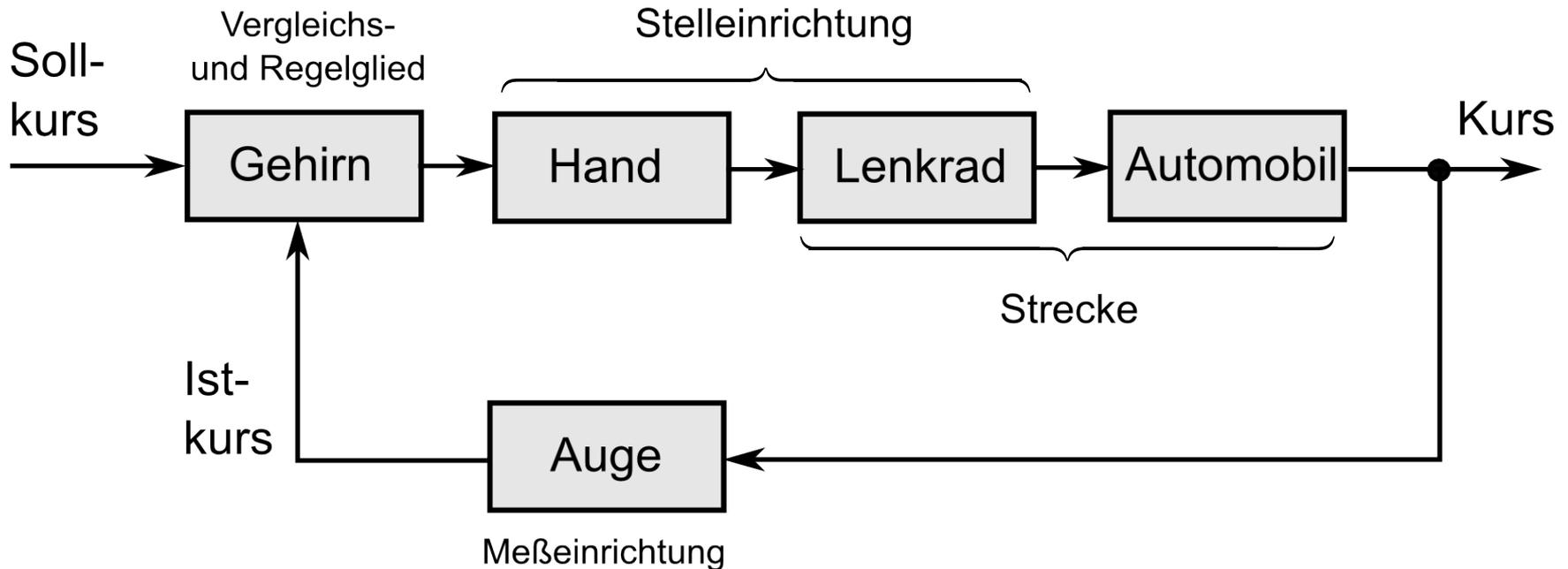
- Der Ausgangsgröße eines dynamischen Systems soll mittels der Stellgröße ein Sollverhalten, d.h. ein gewünschtes Verhalten aufgeprägt werden, und zwar gegen den Einfluss einer Störgröße, die nur unvollständig bekannt ist

## Aufbau und Wirkungsweise einer Regelung (2)

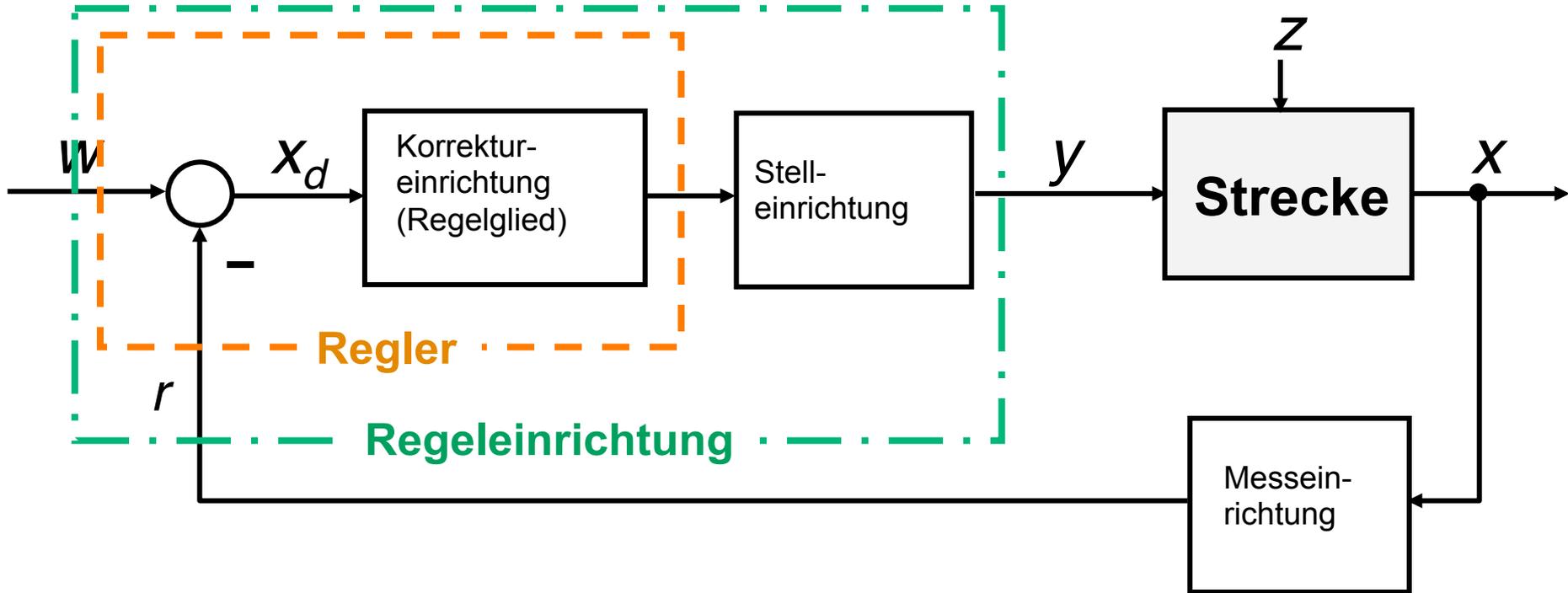
- **Prinzip der Lösung:**

- 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**

## Beispiel eines Regelkreises: Lenkung eines Automobils



## Struktur eines Regelkreises



$w$  Führungsgröße

$y$  Stellgröße

$r$  Rückführgröße

$x_d$  Regeldifferenz

$x$  Regelgröße

$z$  Störgröße

## Wirkungsweise eines Regelkreises

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 wieder anzunehmen.	$\Rightarrow$	$x$ wird angehoben mit der Tendenz den Sollwert $x_s$	

Kurz: **Die Störgröße wird ausgeregelt.**

## Regelkreis

- 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**

## Regelkreis (2)

- 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
- **Grundlagen der Regelung**
- Reglertypen
- Regelungskonzepte für Manipulatoren

## Übersicht

- Mathematische Hilfsmittel:
  - Laplace-Transformation
  - Übertragungsglieder
- Testfunktionen

## Laplace-Transformation

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

- Rechenvereinfachung:
  - Differential- und Integralausdrücke werden zu algebraischen Ausdrücken
- Gleichungslösung im Frequenzbereich statt im Zeitbereich
- Integral muss konvergieren - erfüllt für lineare  $f(t)$

## Laplace-Transformation

Linearitätssatz:  $L \{ \alpha f_1(t) + \beta f_2(t) \} = \alpha f_1(s) + \beta f_2(s)$

Faltungssatz:  $L \{ f_1(t) * f_2(t) \} = f_1(s) \cdot f_2(s)$

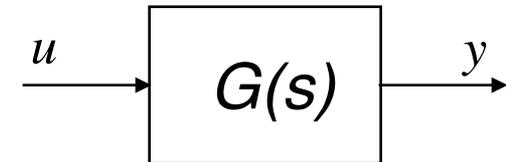
Grenzwertsatz:  $f_1(t = 0) = \lim_{s \rightarrow \infty} s \cdot f(s)$

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

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

## Übertragungsglieder

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



Im komplexen s-Bereich:

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

↑  
Faltungsregel der Laplace-  
Transformation

Im Zeitbereich:

$$y(t) = g(t) * u(t)$$

$$= \int_0^t g(t - \tau) \cdot u(\tau) \cdot d\tau$$

## Elementare Übertragungsglieder (1)

Benennung

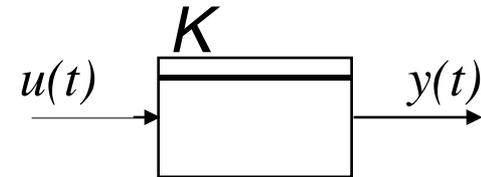
Funktionalbeziehung

Symbol

P-Glied

Proportionalglied

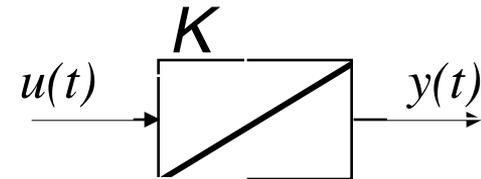
$$y(t) = K \cdot u(t)$$



I-Glied

Integrierglied

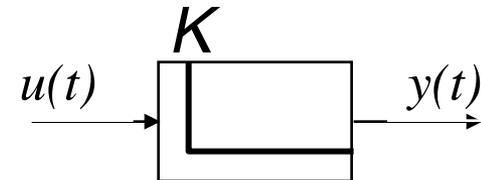
$$y(t) = K \cdot \int_0^t u(\tau) d\tau$$



D-Glied

Differenzierglied

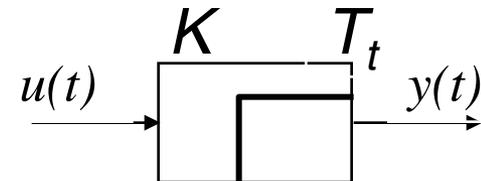
$$y(t) = K \cdot \dot{u}(t)$$



T<sub>t</sub>-Glied

Totzeit-Glied

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



## Elementare Übertragungsglieder (2)

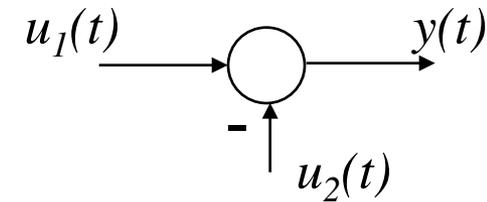
Benennung

Funktionalbeziehung

Symbol

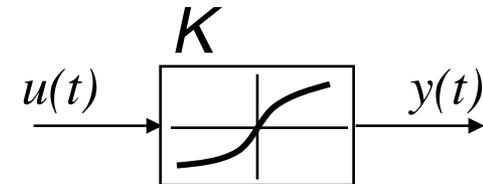
S-Glied  
Summierglied

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



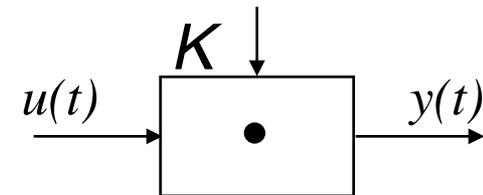
KL-Glied  
Kennlinienglied

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

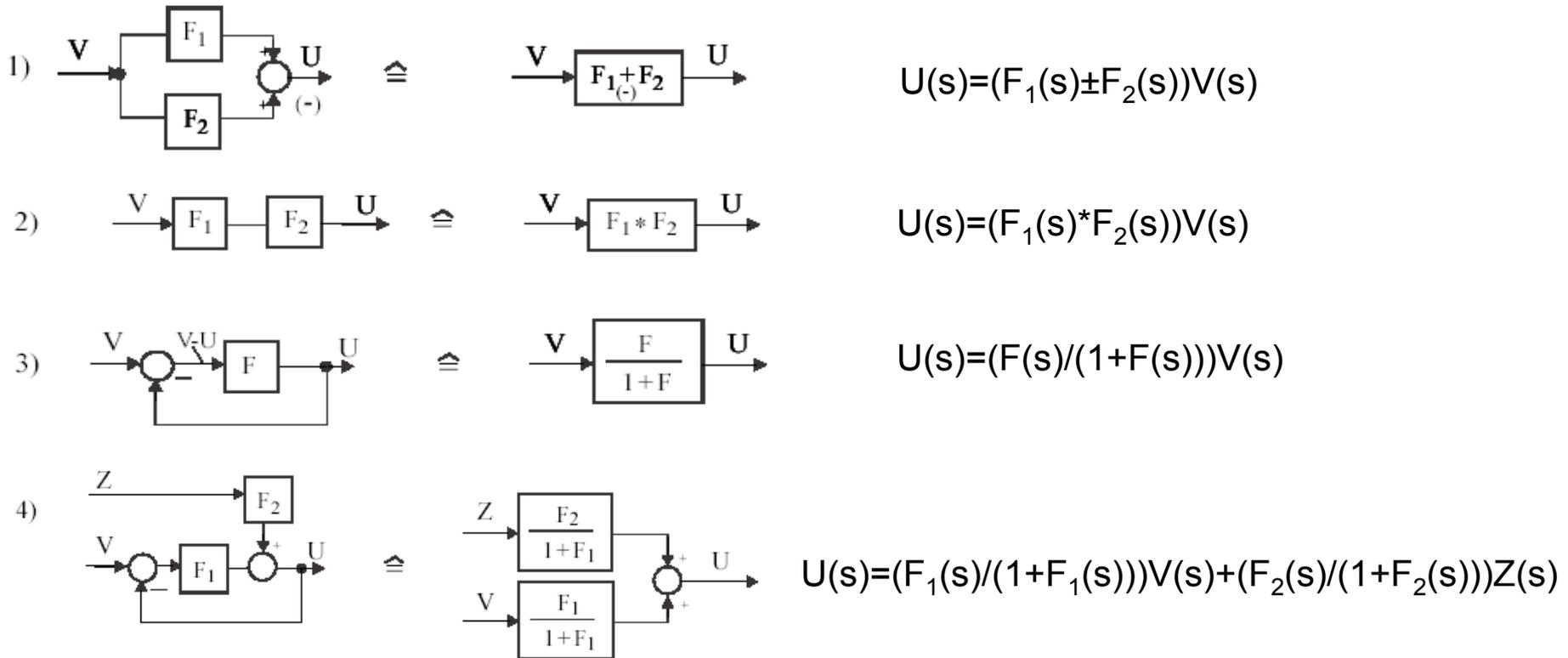


M-Glied  
Multiplizierglied

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



## Umformregeln für Wirkungspläne



## Übersicht

- Mathematische Hilfsmittel:
  - Laplace-Transformation
  - Übertragungsglieder
- Testfunktionen

## Testfunktionen

- Gängige Testfunktionen:
  - Impulsfunktion
  - Sprungfunktion
  - Anstiegsfunktion
  - Harmonische Funktion

- Beispiel:
  - Sprungfunktion

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

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

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

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

- **Übersicht**
  - **P-, I-, D-Regler**
  - **PID-Regler**
  
  - **Kennlinienregler**
  - **Zustandsregler**
  
  - **Kaskadenregler**
  - **Adaptive Regler**

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

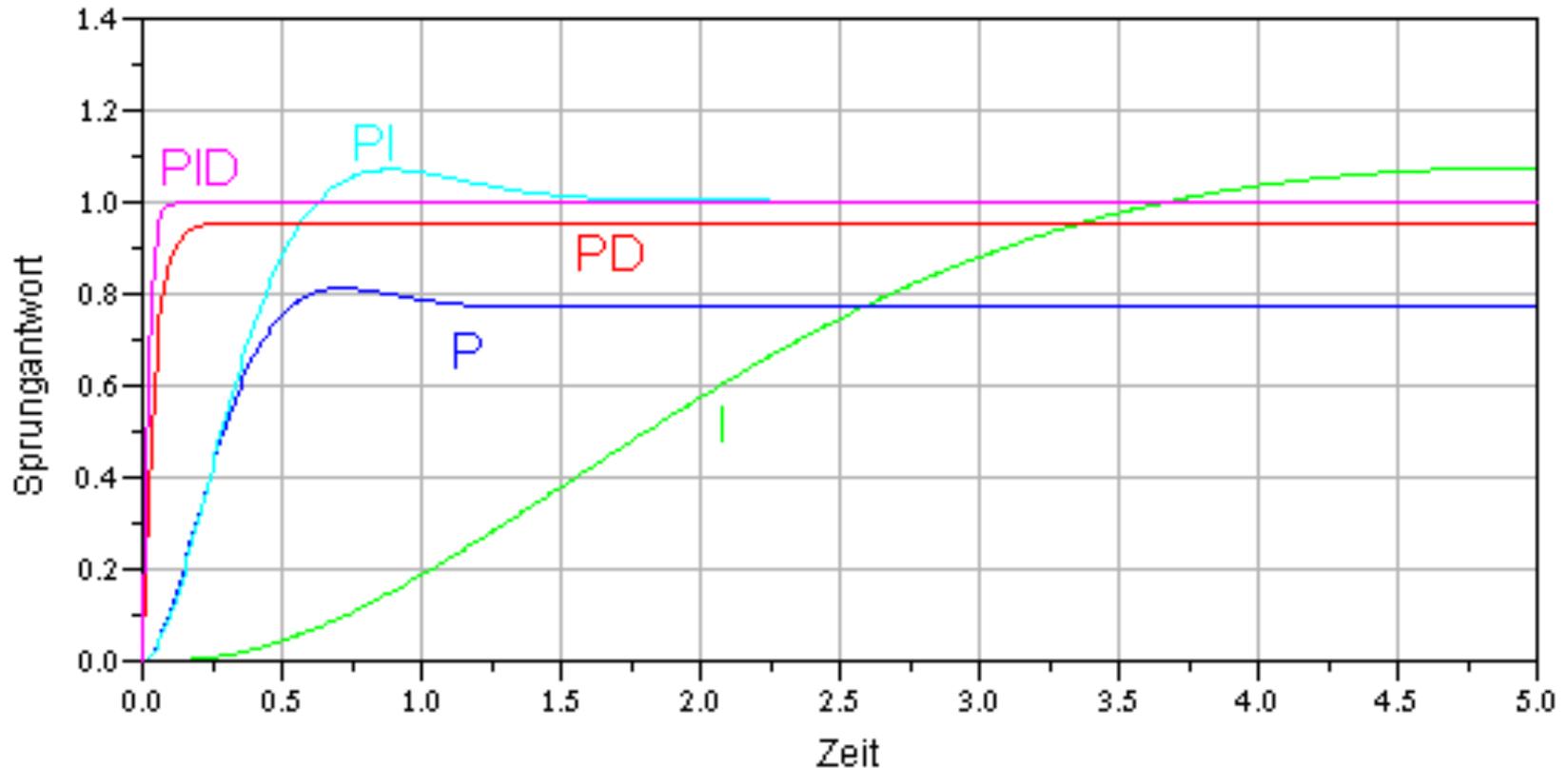
$$u(t) = K_P \left( e(t) + \frac{1}{T_N} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_V \frac{d}{dt} e(t) \right)$$

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

mit  $T_N$  = Nachstellzeit,  $T_V$  = Vorhaltzeit

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

### Vergleich der Reglertypen in einem Regelkreis



## Laplace-Transformation eines PID-Reglers:

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



$$u(s) = K_P e(s) + K_I \frac{1}{s} e(s) + K_D s e(s)$$

$$\Leftrightarrow \frac{u(s)}{e(s)} = G(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s$$

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

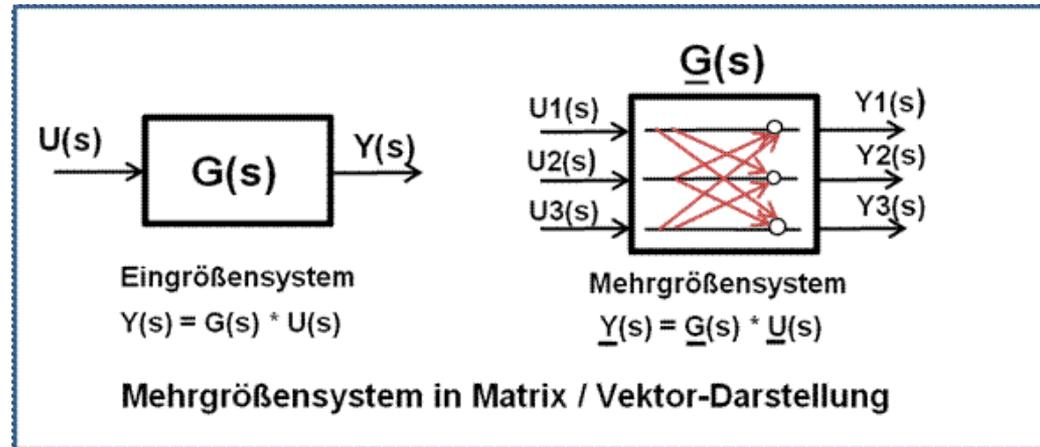
- **Kennlinien- bzw. Kennlinienfeldregler**
  - nichtlineare Übertragungsglieder  $u(t) = F(e(t))$ 
    - Beispiel: Zweipunktregler (Temperatur-Regelung)
    - WENN Solltemperatur noch nicht erreicht, DANN Heizen mit voller Kraft.  
WENN Solltemperatur erreicht, DANN Heizung aus.

- **Zustandsregler**

- verbessertes Regelverhalten, da nicht nur die Regelabweichung, sondern im Idealfall alle Zustandsgrößen der Regelstrecke zur Verfügung gestellt

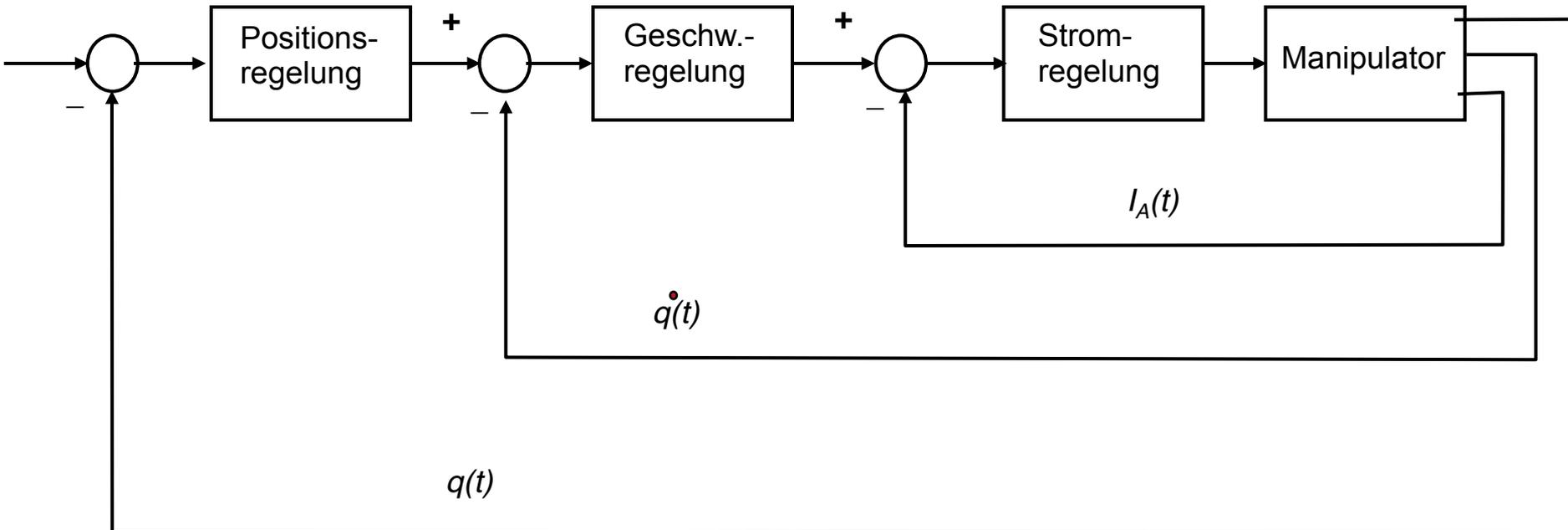
$$u(t) = r(t) - k_1 x_1(t) - k_2 x_2(t) - \dots - k_n x_n(t)$$

- regelungstechnische Behandlung von Mehrgrößensystemen, nichtlinearen und zeitvariablen Übertragungssystemen



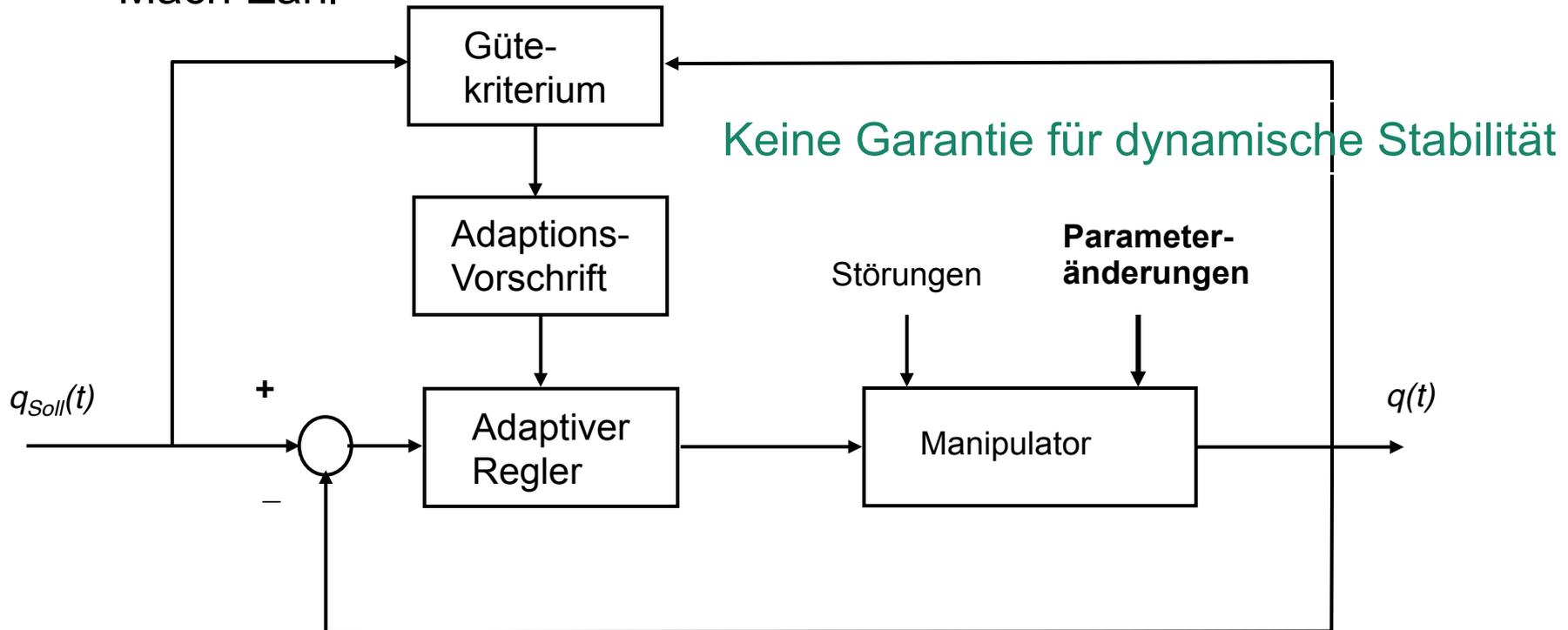
- **Kaskadenregelung**

- Manipulator = Mehrgrößensystem
- Unabhängige lineare Einzelregelkreis der einzelnen Gelenke



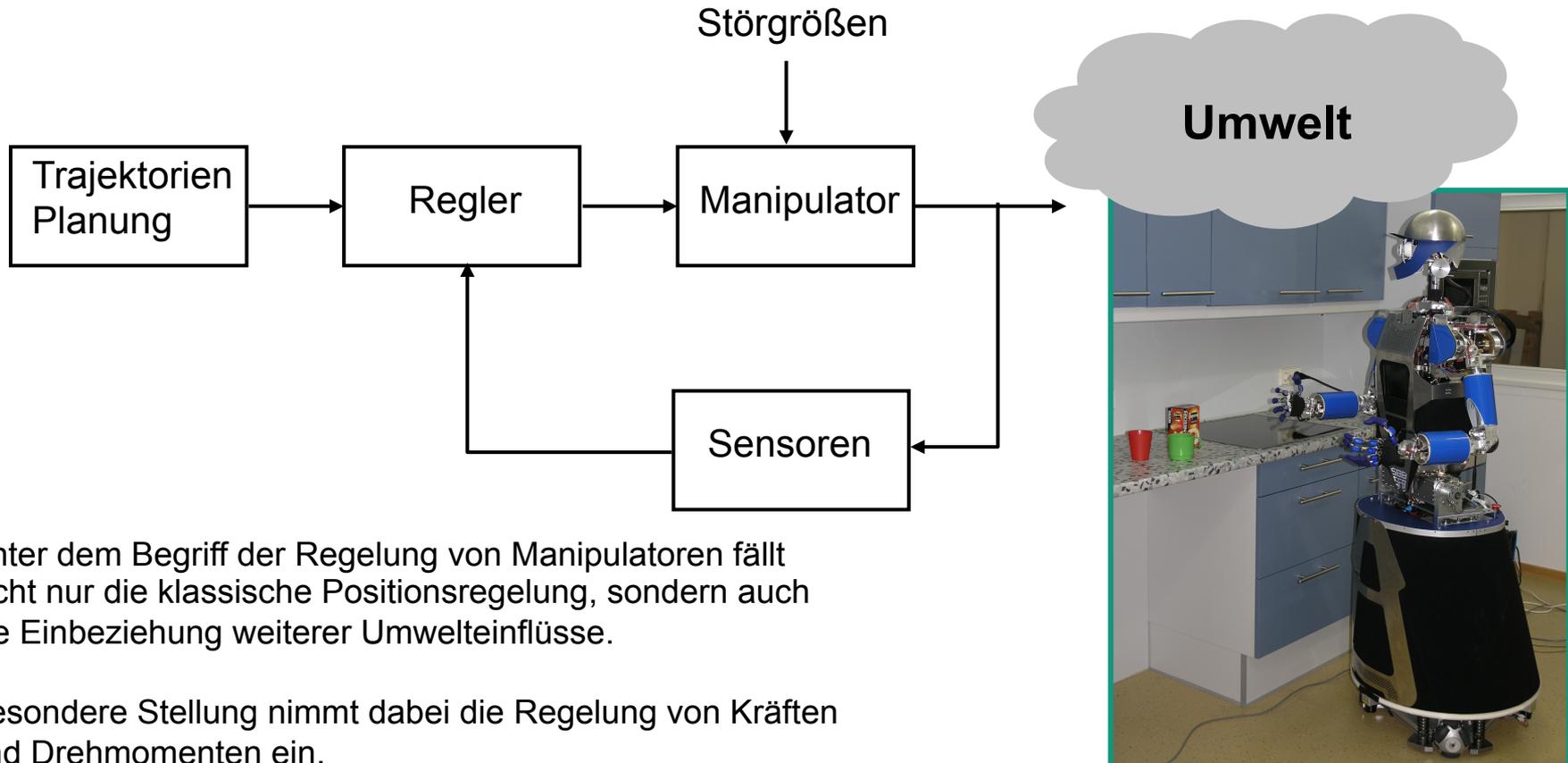
- **Adaptive Regelung**

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



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

## Blockbild einer Manipulator-Regelung



## Ausgangspunkt: Dynamikmodell

- Bei Bewegungen wirken aufgrund der Massenträgheit des Manipulators Gravitations-, Zentrifugal, Coriolis und Reibungs-kräfte/momente auf die Gelenke.

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

- Q** : n x 1 Vektor der allgemeinen Stellkräfte und -momente  
**M(q)** : n x n Trägheitsmatrix  
**n** : n x 1 Vektor mit Zentrifugal- und Corioliskomponenten  
**g(q)** : n x 1 Vektor mit Gravitationskomponenten  
**R** : n x n Diagonalmatrix zur Beschreibung der Reibungskräfte  
**q** : n x 1 Winkellagen des Manipulators



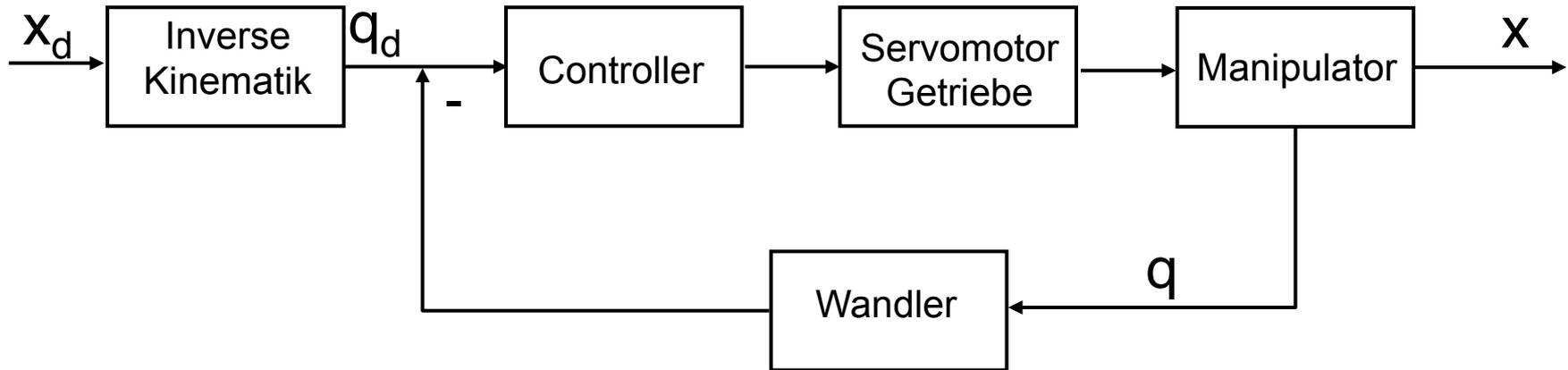
**Justin**

A humanoid upper body system for two-handed manipulation experiments.



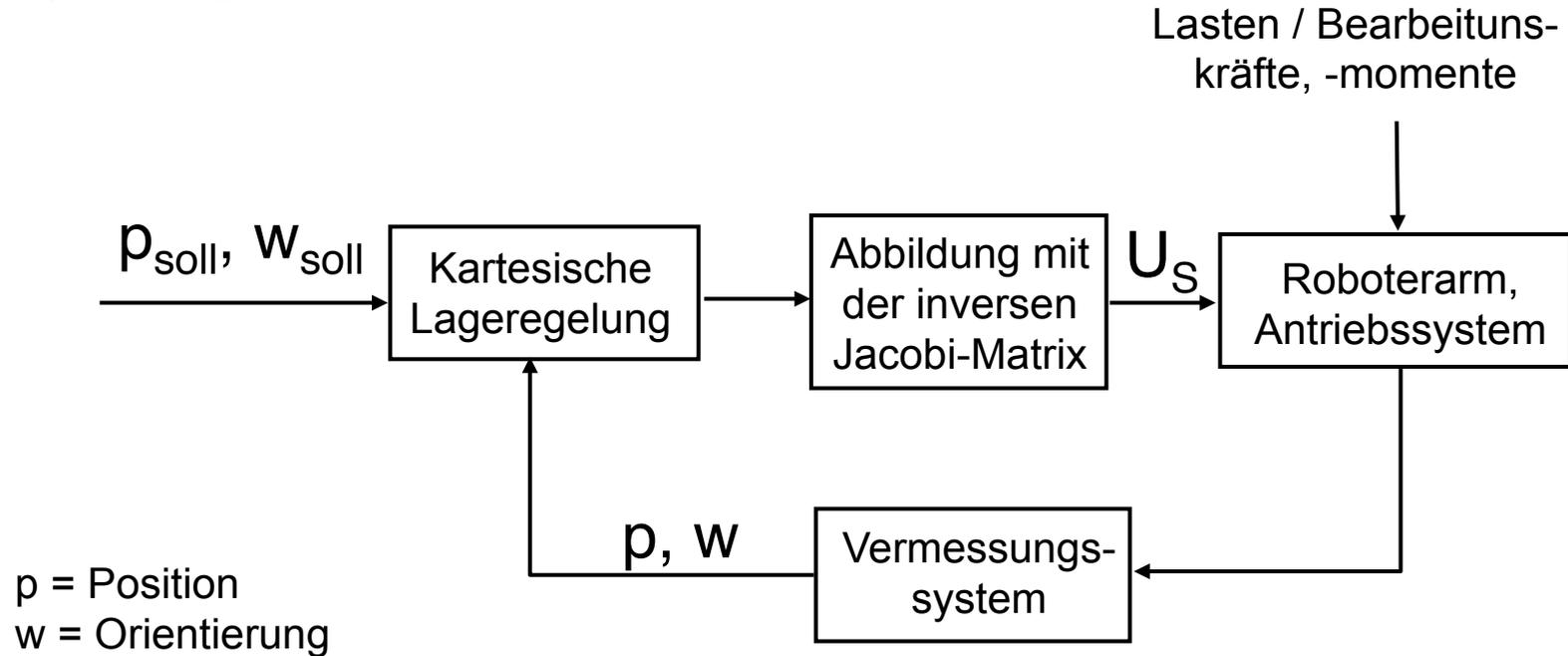
Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
an der RWTH Aachen University

## Regelung im Gelenkwinkelraum



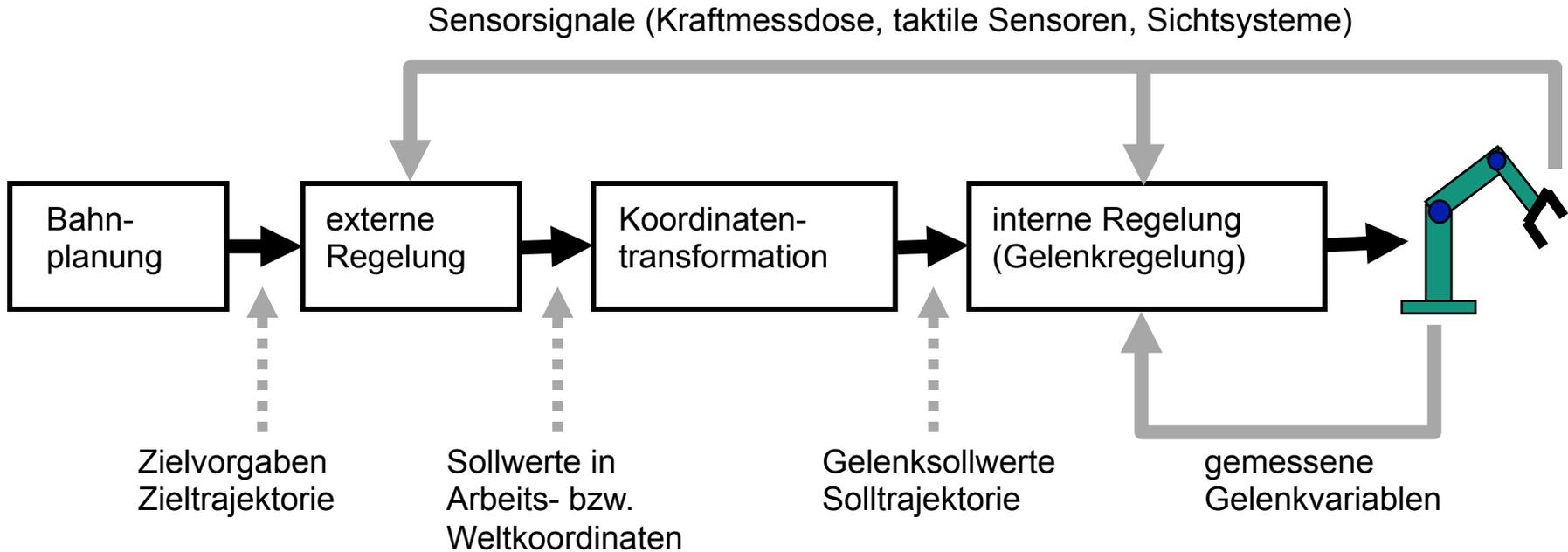
- Koordinatentransformation → Soll-Trajektorien im Gelenkwinkelraum
- Aus den Gelenkwinkel-Sollwerten und den gemessenen Gelenkwinkeln werden Stellgrößen für die Gelenkantriebe generiert

## Regelung im kartesischen Raum



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

## Struktur einer Roboterregelung



## Regelungskonzepte für Manipulatoren

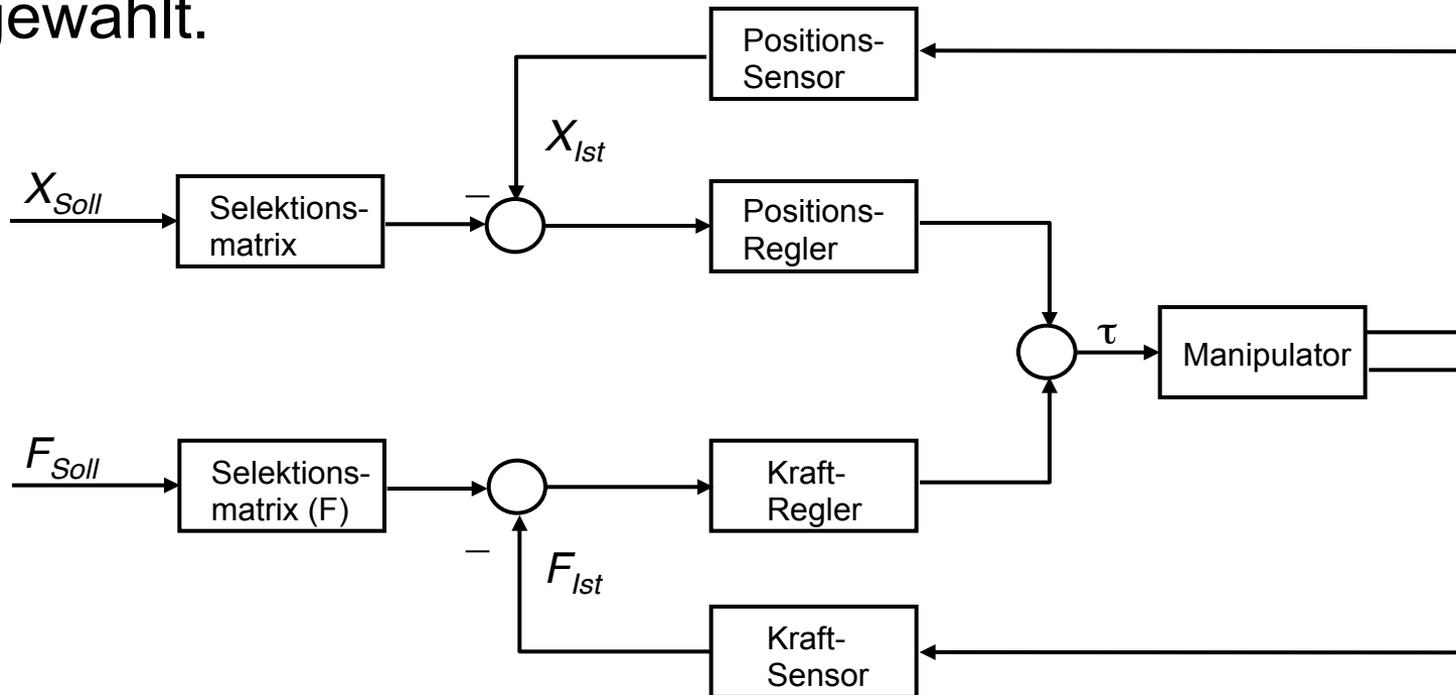
- **Exakte Systemmodellierung:**
  - setzt a priori die exakte Kenntnis des Dynamikmodells und der Umgebung des Roboters voraus
- **Kraft-/Positionsregelung:**
  - zur Ausführung von Aufgaben, die Interaktionskräfte berücksichtigen müssen
    - Hybride Kraft-/Positionsregelung
    - Impedanz Regelung

## Positions-Kraftregelung

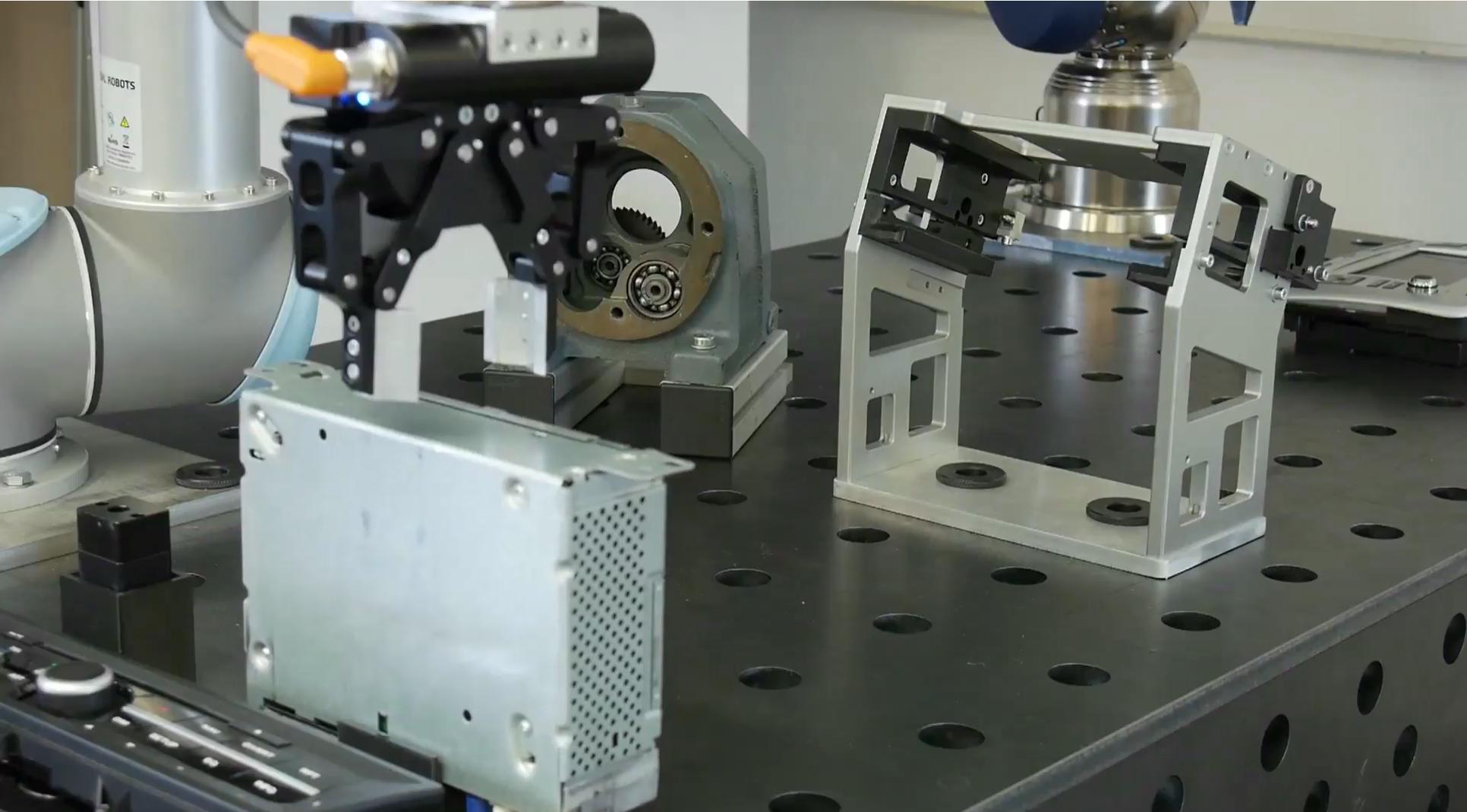
- **Grundlegendes Problem:**
  - Positionen und Kräfte sind eng miteinander verknüpft.
  - Steht der Roboter in Kontakt zur Umgebung so bedeutet jede Positionsänderung auch eine Kraftänderung und umgekehrt.
- **Allgemeine Methode zur Lösung des Problems:**
  - Aus der Beschreibung der auszuführenden Aufgabe resultieren natürliche Randbedingungen. Künstliche Randbedingungen werden zusätzlich eingeführt, um den Bewegungsablauf vollständig zu beschreiben.

## Hybride Kraft-/Positionsregelung

Es wird für jede kartesische Bewegungsrichtung des Arms wahlweise zwischen reiner Kraft- und reiner Positionsregelung gewählt.



## Hybride Kraft-/Positionsregelung in der Praxis

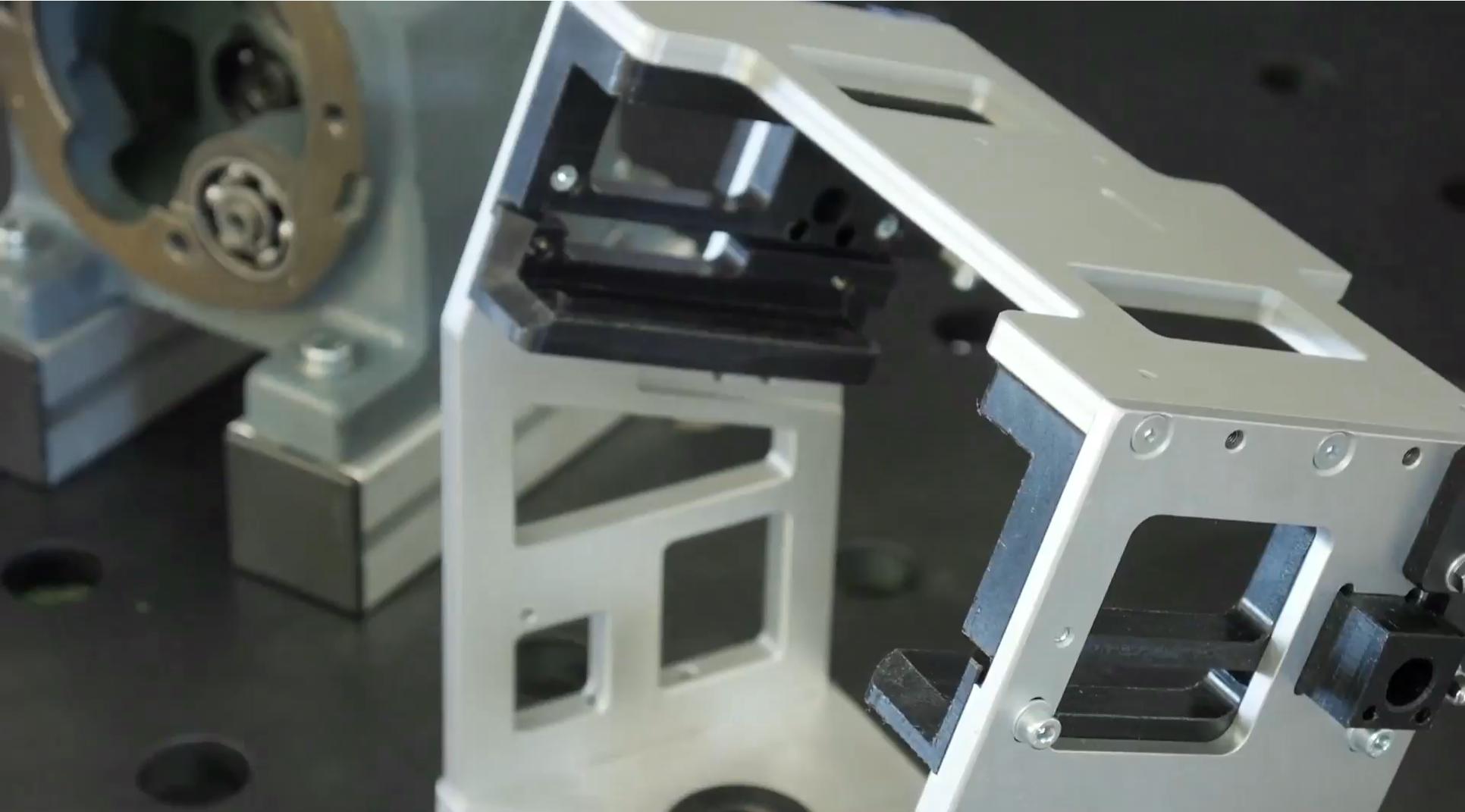


## Hybride Kraft-/Positionsregelung in der Praxis

- Axenexklusive Regelung: Einschieben einer Box
  - kartesische Axen (relativ zu KMS im TCP \*)
  - Axen sind unabhängig geregelt
  - z: Positionsregelung auf Bahn/Pfad
  - $f_x, f_y$ : Regelung Kraft auf 0
  - scale-axis:  $m_x, m_y, m_z$  Regelung Moment auf 0

(\*) KMS = Kraft-Momenten-Sensor, TCP = Tool-Center-Point

## Hybride Kraft-/Positionsregelung in der Praxis



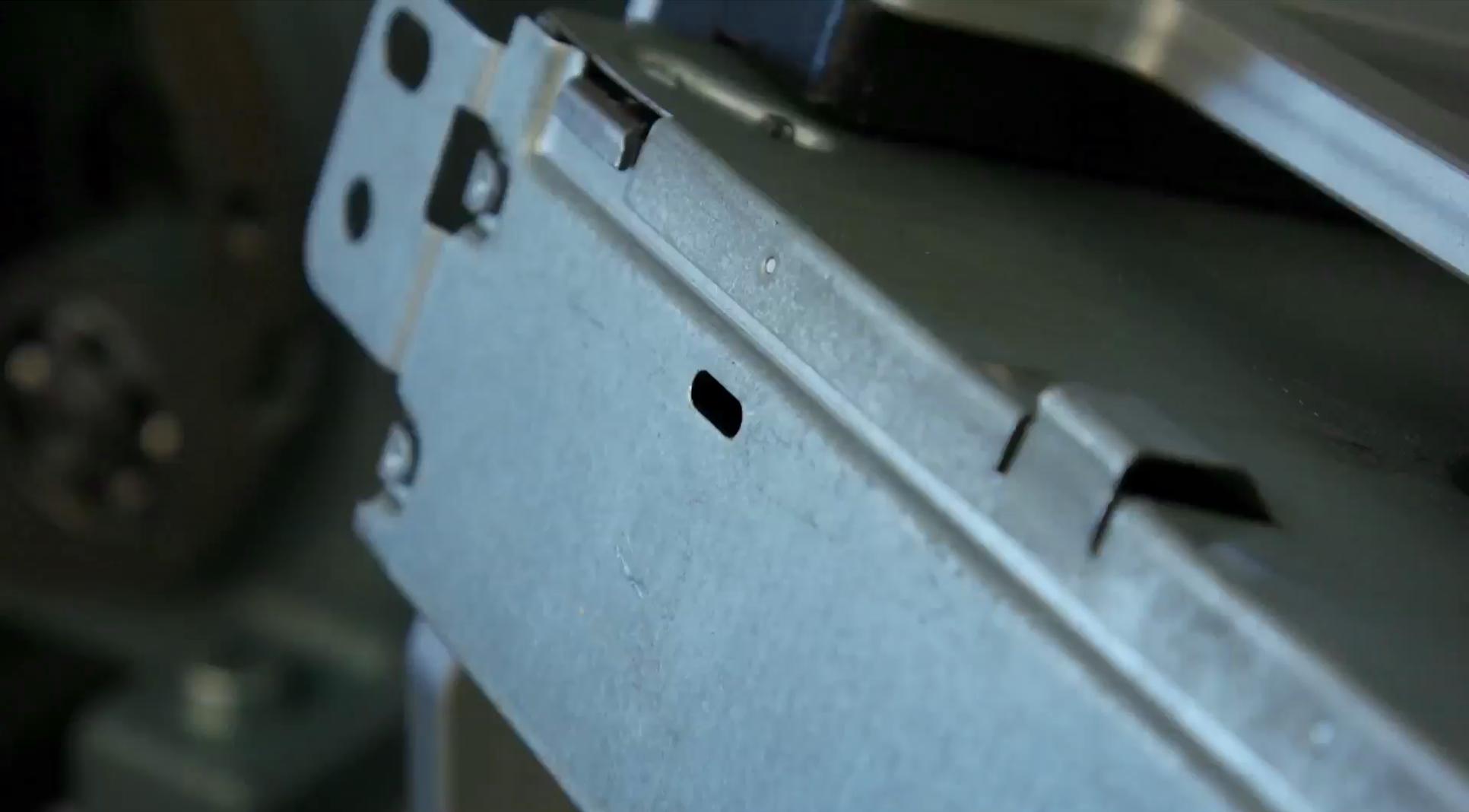
## Hybride Kraft-/Positionsregelung in der Praxis

- Axenexklusive Regelung: Einschieben einer Box
  - Jeder Axen-Regler ist ein PID-Regler
  - Bei dieser Anwendung ist 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 nicht bewegt wird

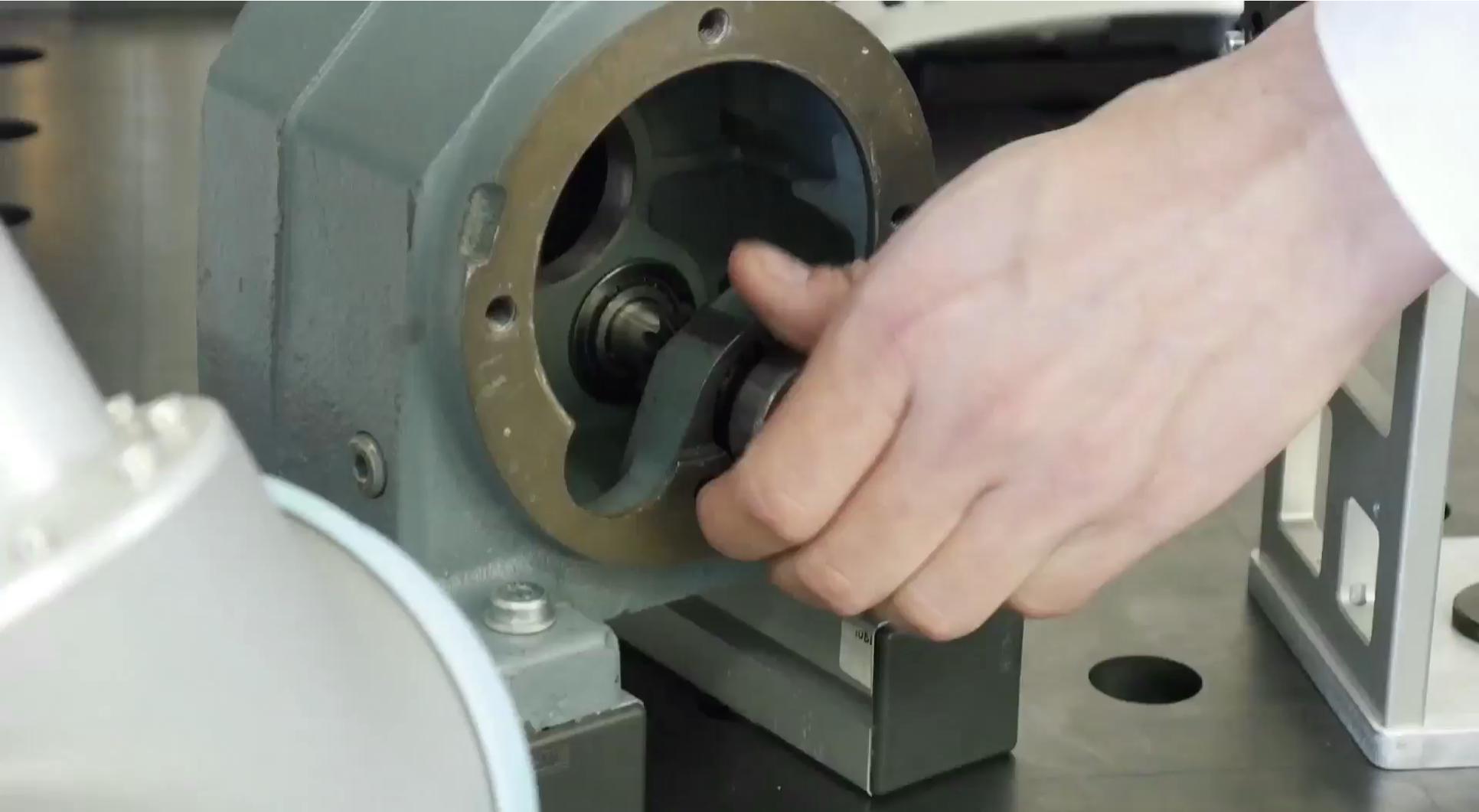
## Kraft-/Positionsregelung in der Praxis

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

## Kraft-/Positionsregelung in der Praxis



## Kraft-/Positionsregelung in der Praxis



## Hybride Kraft-/Positionsregelung in der Praxis

- Offene Fragestellung:
  - Programmierung Reglerprogramm
    - Schnell
    - Intuitiv
    - Robust
    - Einfache Wartung
    - Wiederverwendbar
  
- Siehe spätere Vorlesung

## 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:

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

## Impedanz-Regelung

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

L-Transformation

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

*Impedanz des Feder-Dämpfer-Masse-System:*

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

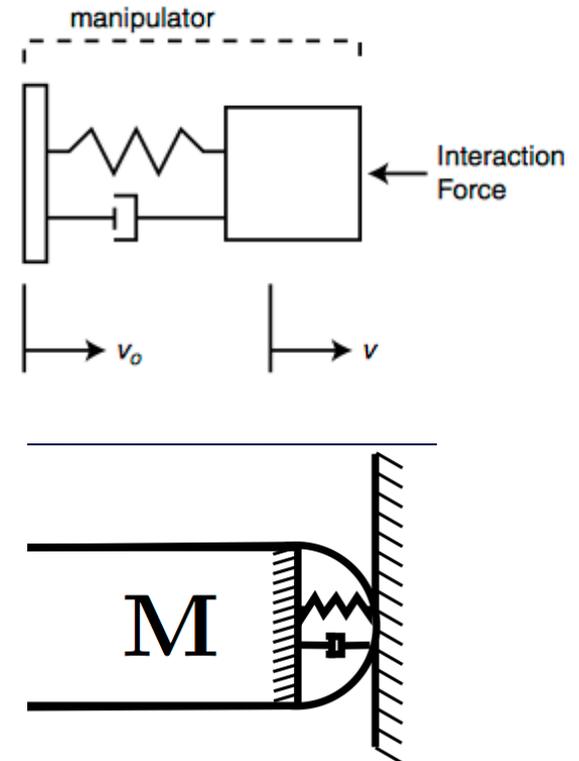
## Impedanz-Regelung

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

L-Transformation

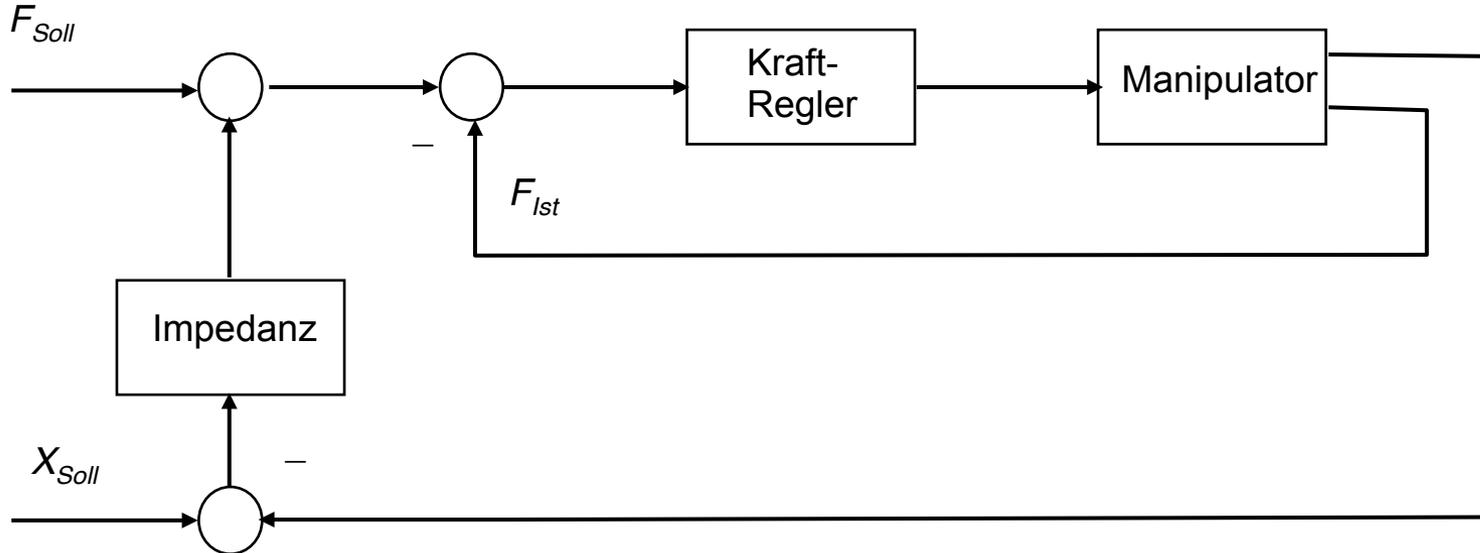
$$F(s) = \underbrace{(d + b \cdot s + m \cdot s^2)} \cdot X(s)$$

Impedanz des Feder-Dämpfer-Masse-System:



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

## Kraftbasierter Impedanzregler



Impedanz: Komponenten  $d$ ,  $b$ ,  $m$

Dual dazu: Positionsbasierter Impedanzregler  
( $X$  und  $F$  vertauschen)

Details: <http://www.robotic.dlr.de/fileadmin/robotic/ott/papers/door.pdf>  
[http://summerschool.stiff-project.org/fileadmin/pdf/1804\\_C19.pdf](http://summerschool.stiff-project.org/fileadmin/pdf/1804_C19.pdf)



Boston Dynamics

