

# **Vorlesung: Einführung in die Robotik**

**Prof. J. Zhang**

zhang@informatik.uni-hamburg.de

**Universität Hamburg**

Fachbereich Informatik

AB Technische Aspekte Multimodaler Systeme

6. Januar 2005

# Inhaltsverzeichnis

7. Roboterregelung . . . . .	370
Klassifikation der Regelung von Roboterarmen . . . . .	.370
Gelenkregler des PUMA-Roboters . . . . .	.372
Interne Sensorik von Robotern . . . . .	.374
Regelungssystem eines Roboters . . . . .	.378
Lineare Regelung für Trajektorienverfolgung . . . . .	.382
Modellbasierte Regelung für Trajektorienverfolgung . . . . .	.384
Regelung im Kartesischen Raum . . . . .	.386
Hybride Regelung der Kraft und Position . . . . .	.389

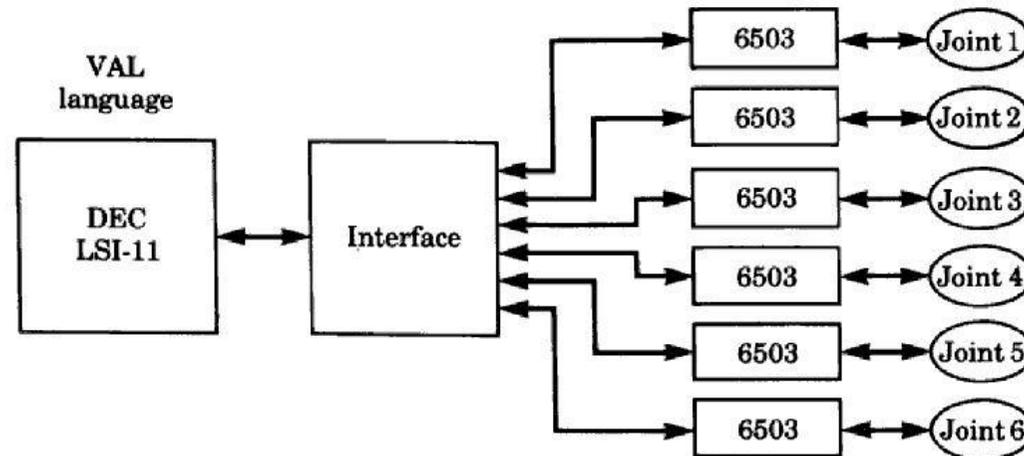
# Klassifikation der Regelung von Roboterarmen

Als reines Problem der Trajektorie-Verfolgung:

- Regelung im Gelenkraum:  
PID,  
plus modellbasierte.
- Regelung im Kartesischen Raum:  
Gelenk-basierend,  
über Kinematik-Berechnung  
oder über inverse Jacobi-Berechnung.
- Adaptive Regelung:  
modell-bezogene adaptive Regelung,  
selbst-tunend.

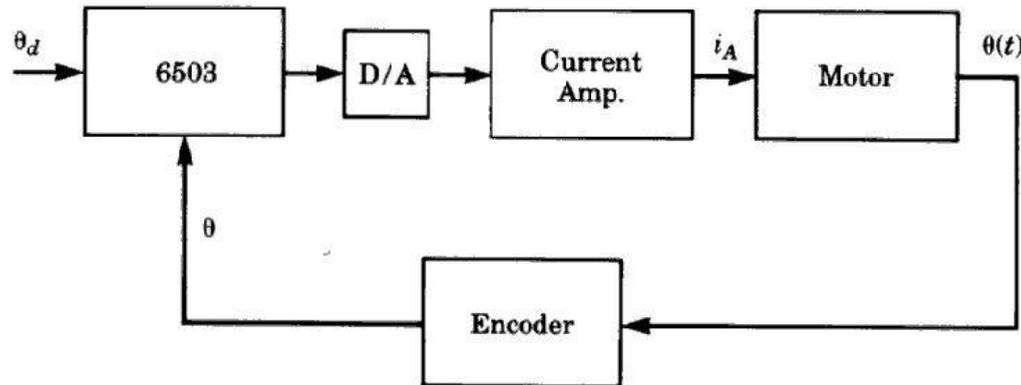
Hybride Regelung von Kraft und Position: (aktuelles Forschungsthema)

# Architektur des Regelungssystems von PUMA-Robotern



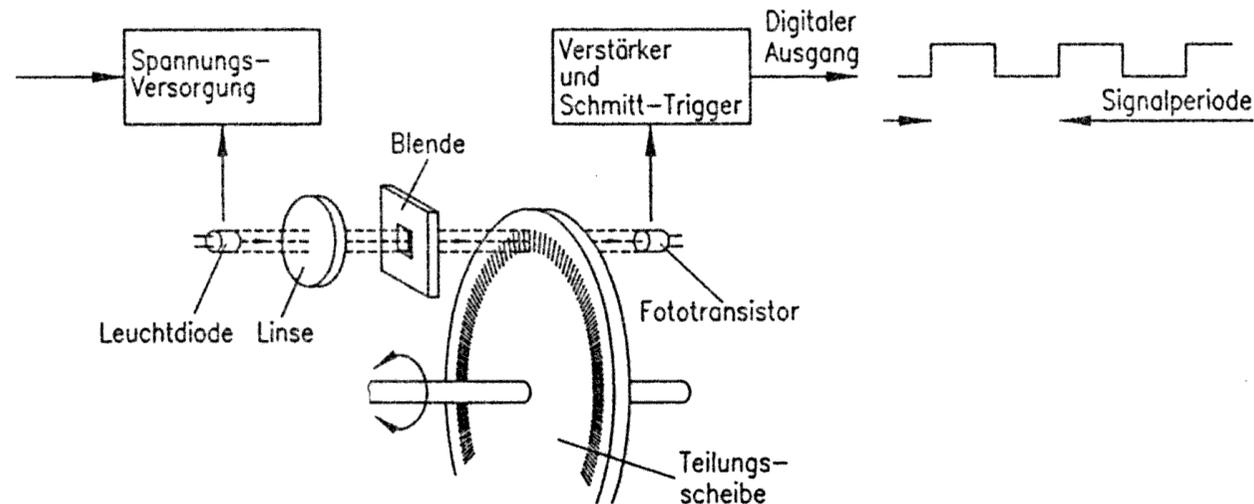
- Das gesamte System ist eine Hierarchie mit zwei Ebenen.
- Der DEC LSI-11 Rechner schickt alle 28ms neue Gelenk-Werte zur Regler-Interface.
- Die zu überwindende Distanz wird in 32 (möglich auch in  $2^3 = 8, 2^4 = 16, 2^6 = 64, \dots$ ) Inkremente gleichmässig zerlegt und sie werden zum Gelenkregler weiter geschickt.

# Gelenkregler des PUMA-Roboters



- Die Gelenkregelung arbeitet dann in 0.875 ms Takt.
- Encoder werden als Positionssensor eingesetzt.
- Potentiometer werden für grobe Positionsschätzung benutzt (nur PUMA-560).
- Kein Tachometer vorhanden. Gelenkgeschwindigkeit wird über die Differenzierung der Gelenkpositionen geschätzt.

# Optische Encoder in einem Roboter



- Ein optischer Leser liest die Linien.
- Die Scheibe dreht sich wenn der Gelenkmotor sich bewegt (mit einem Verhältnis 1:1 am Beispiel des PUMA-Roboters. Über Getriebe ist die Genauigkeit ca. 0.0001 Rad/Bit).
- Eine spezielle Linie wird als “Null-Anzeige” markiert.

# Interne Sensorik von Robotern

Die Sensoren befinden sich im Roboter und erfassen den internen Zustand des Roboters, u.a. die aktuelle Position und Geschwindigkeit jedes Gelenkes.

## **Positionsmesssysteme:**

Potentiometer,

Drehimpulsgeber (Encoder),

Winkelcodier,

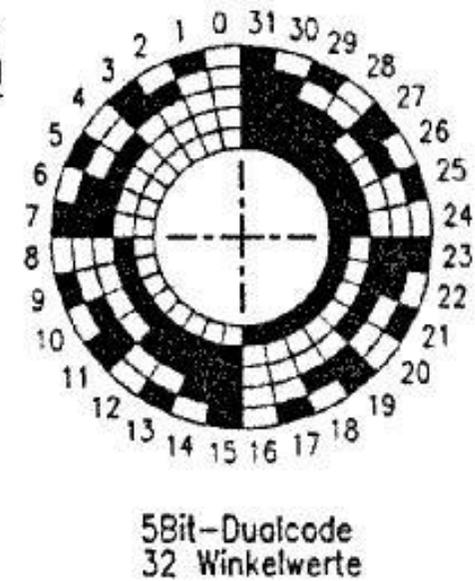
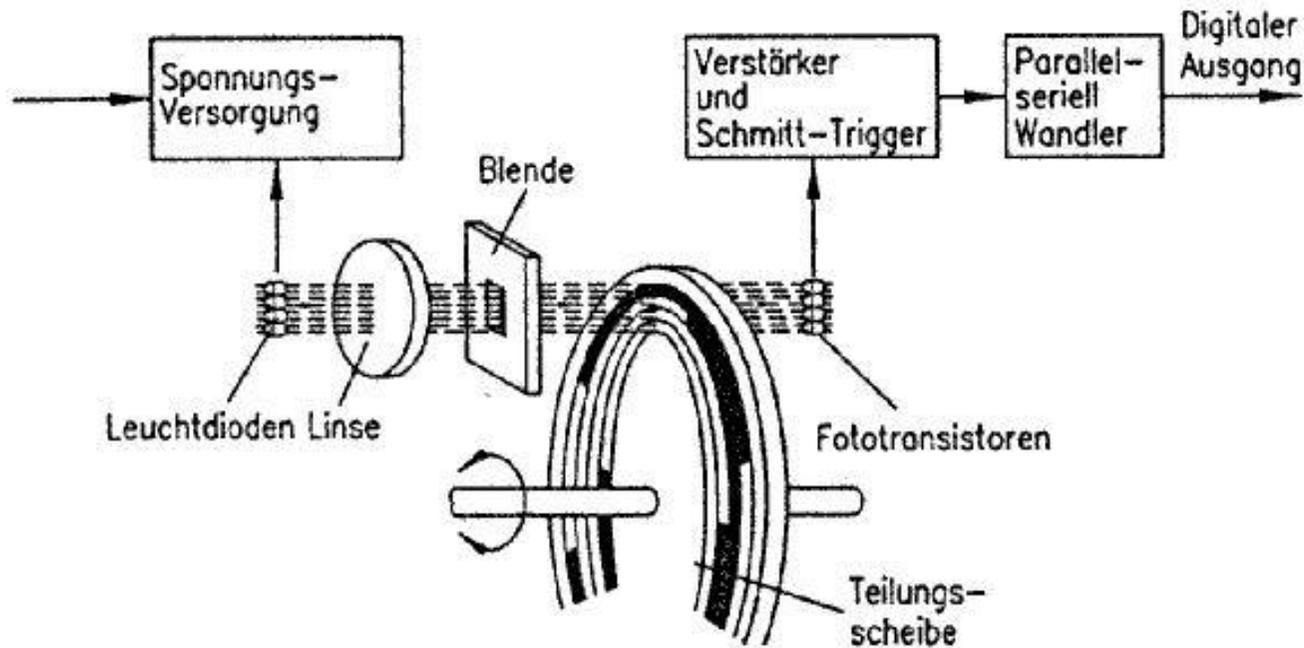
Resolver, ...

## **Geschwindigkeitsmessung:**

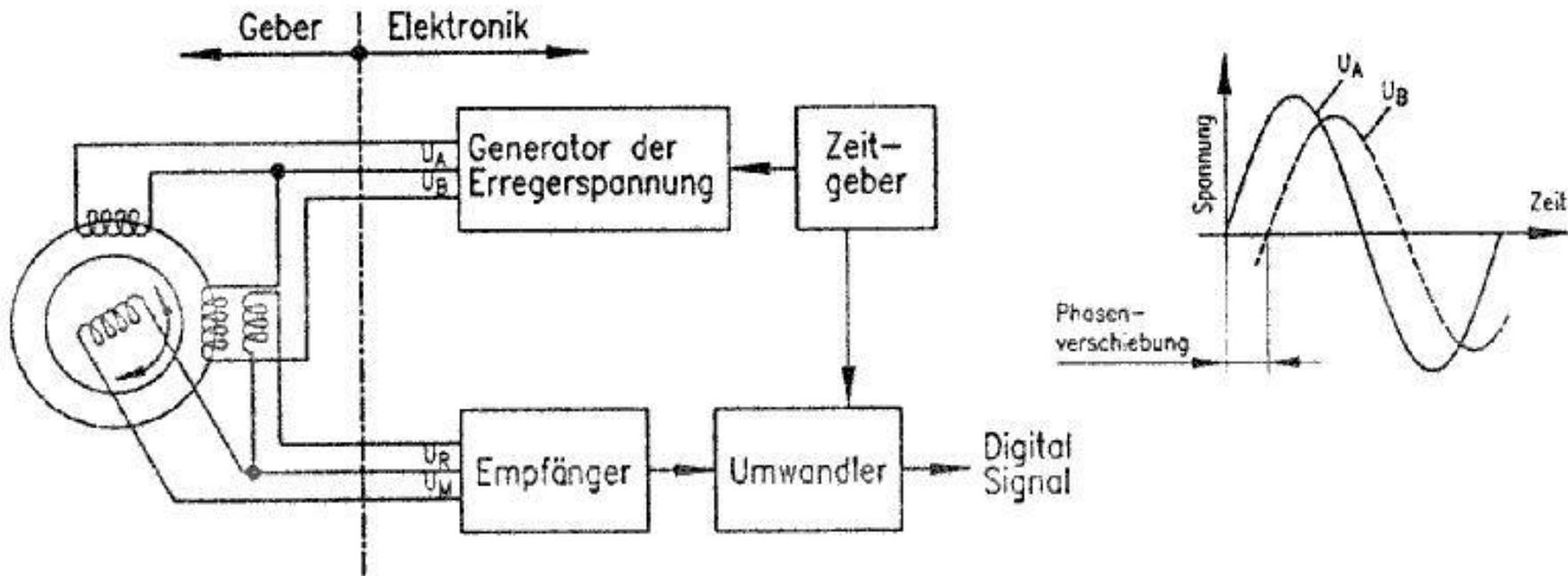
Für die direkte Geschwindigkeitsmessung an rotatorischen Gelenken werden häufig sogenannte Tachometer eingesetzt.

Indirekt lassen sich Geschwindigkeiten auch mit Positionsinformationen bestimmen.

# Arbeitsprinzip eines Winkelgebers

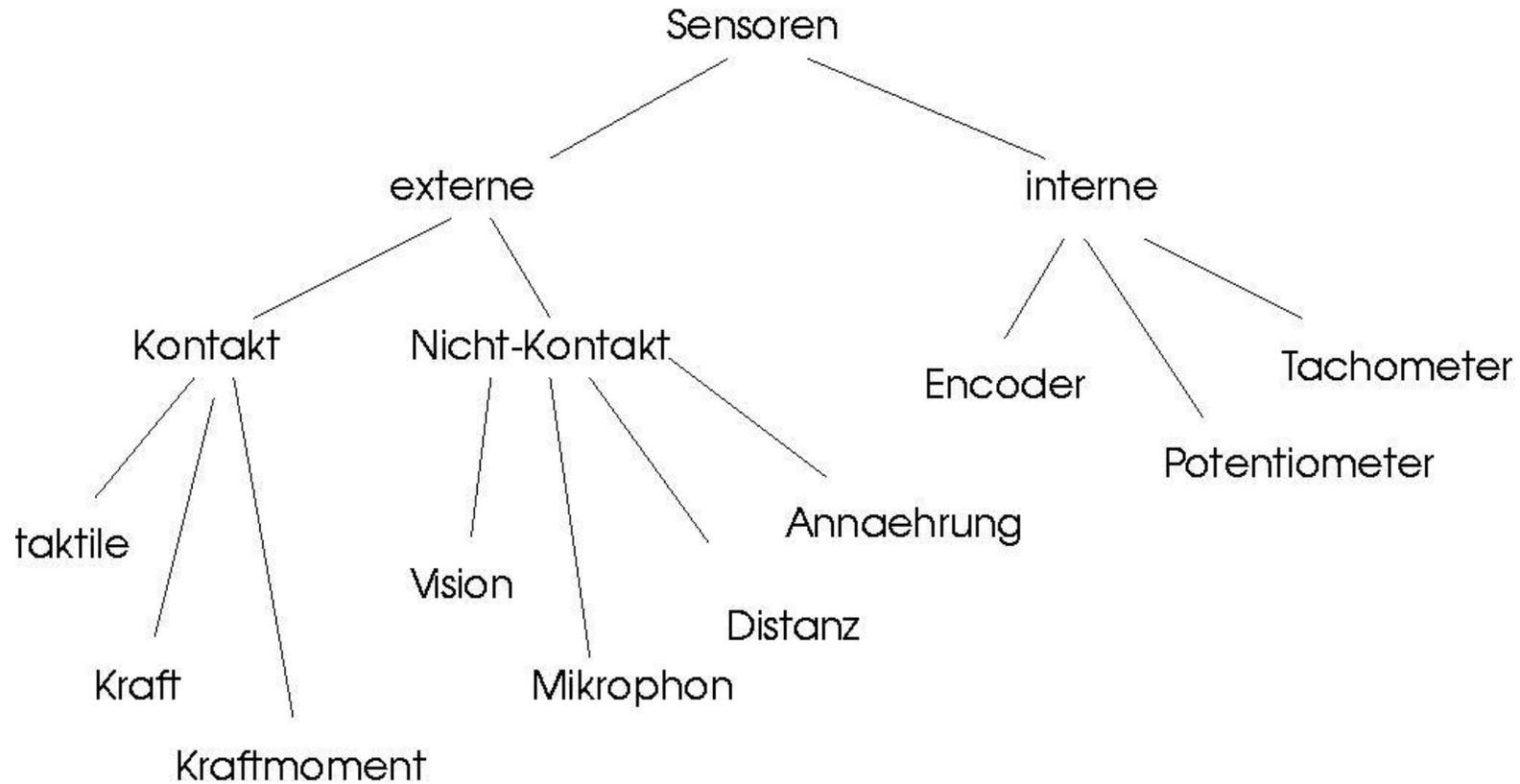


# Arbeitsprinzip eines Resolvers (Drehmelders)

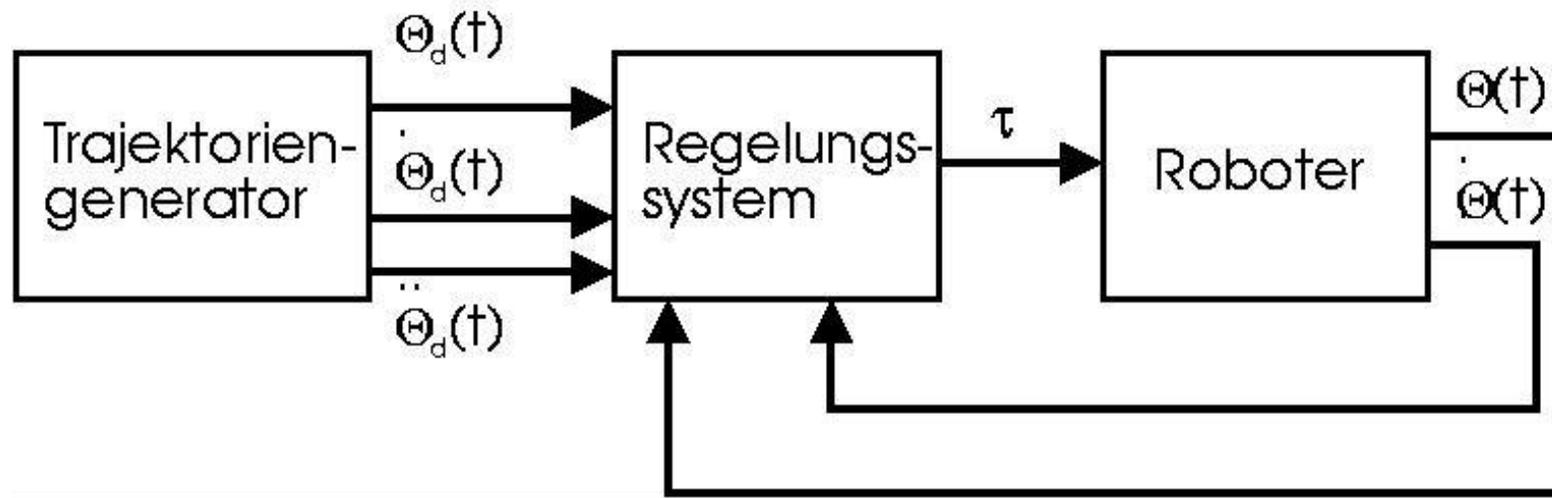


ASM Robotik

# Sensoren: Klassifikationshierarchie



# Regelungssystem eines Roboters



*Führungsgröße:*

$$\Theta_d(t),$$

$$\dot{\Theta}_d(t),$$

$$\ddot{\Theta}_d(t).$$

*Fehlergröße:*

$$E = \Theta_d - \Theta, \dot{E} = \dot{\Theta}_d - \dot{\Theta}$$

*Ausgangsgröße:*

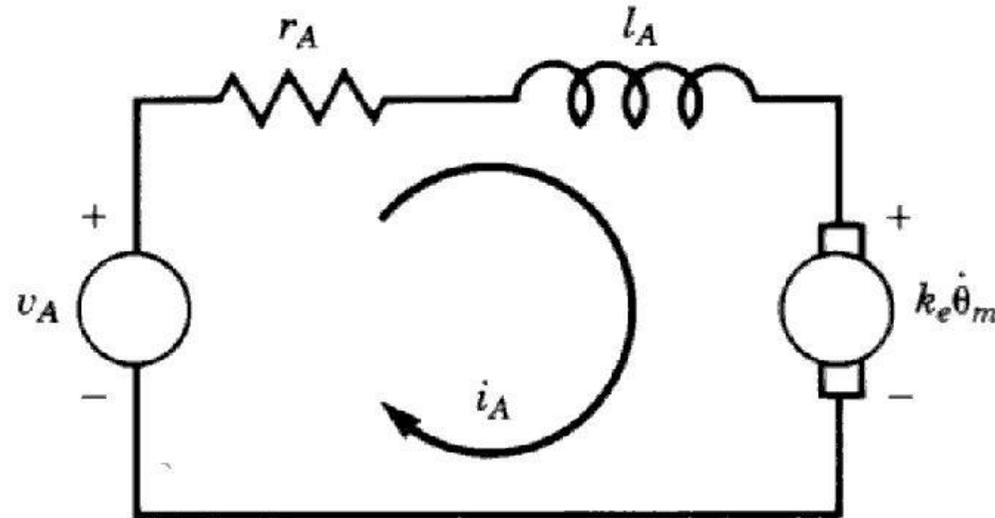
$$\Theta(t),$$

$$\dot{\Theta}(t).$$

*Stellgröße:*

$$\tau.$$

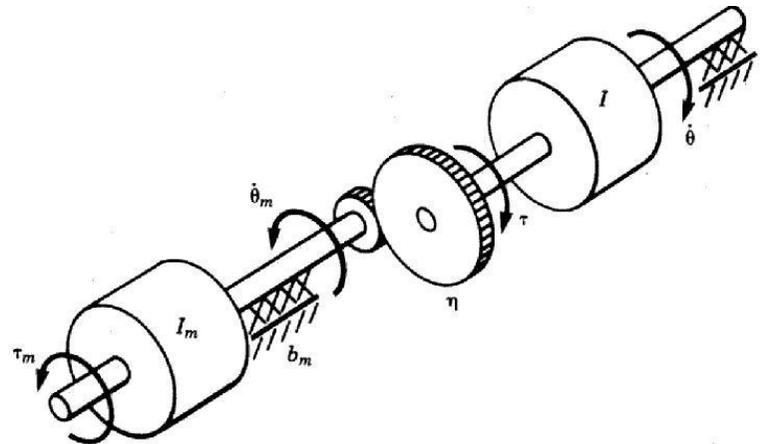
## Schaltung eines DC-Motors



Die Schaltung läßt sich mit einer differentiellen Gleichung erster Ordnung beschreiben:

$$l_a \dot{i}_a + r_a i_a = v_a - k_e \dot{\theta}_m$$

## Verbindung eines Motors mit einem Gelenk



Sei das Übersetzungsverhältnis  $\eta$ , dann gilt:

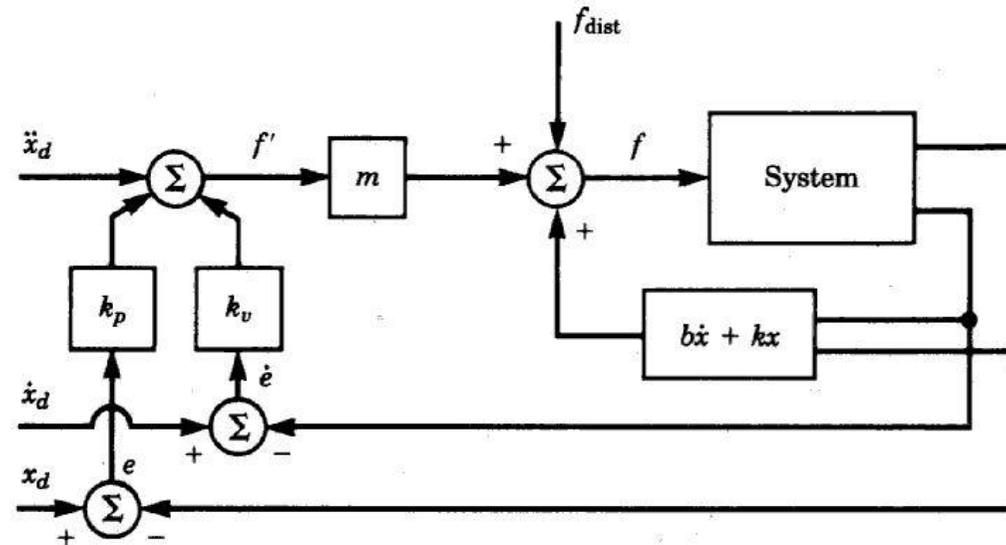
$$\tau_m = (I_m + I/\eta^2)\ddot{\theta}_m + (b_m + b/\eta^2)\dot{\theta}_m$$

wobei  $\tau_m = k_m i_a$ ,  $I_m$  und  $I$  jeweils die Massenträgheit des Motor-Drehzylinders und der Last ist, und  $b_m$  und  $b$  die Reibungsfaktoren sind.

Darstellung mit Gelenkvariablen:

$$\tau = (I_m + \eta^2 I)\ddot{\theta} + (b_m + \eta^2 b)\dot{\theta}$$

# Lineare Regelung für Trajektorienverfolgung



$$f' = \ddot{x}_d + k_v \dot{e} + k_p e + k_i \int e dt \quad (1)$$

(1) ist als das Gesetz der PID-Regelung bezeichnet.

## P-, I- und D-Regler

**P-Regler** (Proportionalregler):

$\tau(t) = k_p \cdot e(t)$ . Der Verstärkungsfaktor  $k_p$  bestimmt die Empfindlichkeit.

**I-Regler** (Integrator):

$\tau(t) = k_i \cdot \int_{t_0}^t e(t') dt'$ . Langanhaltende Fehler werden dadurch aufsummiert.

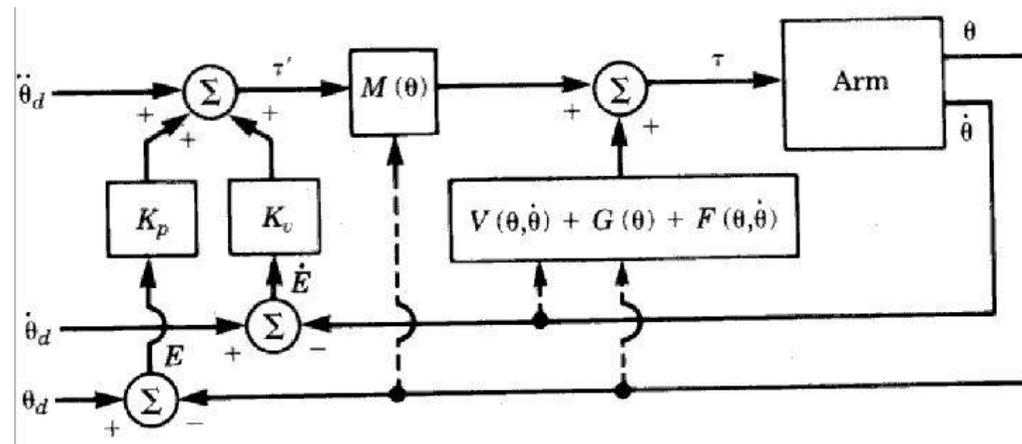
**D-Regler** (Differentialtor):

$\tau(t) = k_v \cdot \dot{e}(t)$ . Dieser Regler zeigt eine empfindliche Reaktion auf zeitliche Änderungen der Regelabweichung.

Kombination  $\Rightarrow$  PID-Regler:

$$\tau(t) = k_p \cdot e(t) + k_v \cdot \dot{e}(t) + k_i \int_{t_0}^t e(t') dt'$$

# Modellbasierte Regelung für Trajektorienverfolgung



Die dynamische Gleichung:

$$\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta)$$

wobei  $M(\Theta)$  die lageabhängige  $n \times n$ -Massenmatrix eines Manipulators ist,  $V(\Theta, \dot{\Theta})$  ein  $n \times 1$ -Vektor der Zentripetal- und Coriolis-Terme ist, und  $G(\Theta)$  eine komplizierte Funktion von  $\Theta$ , die Position aller Gelenke des Manipulators, ist.

# Wie Regelt man Roboter besser?

*Forschung:*

Modell-basierte Regelung,  
adaptive Regelung

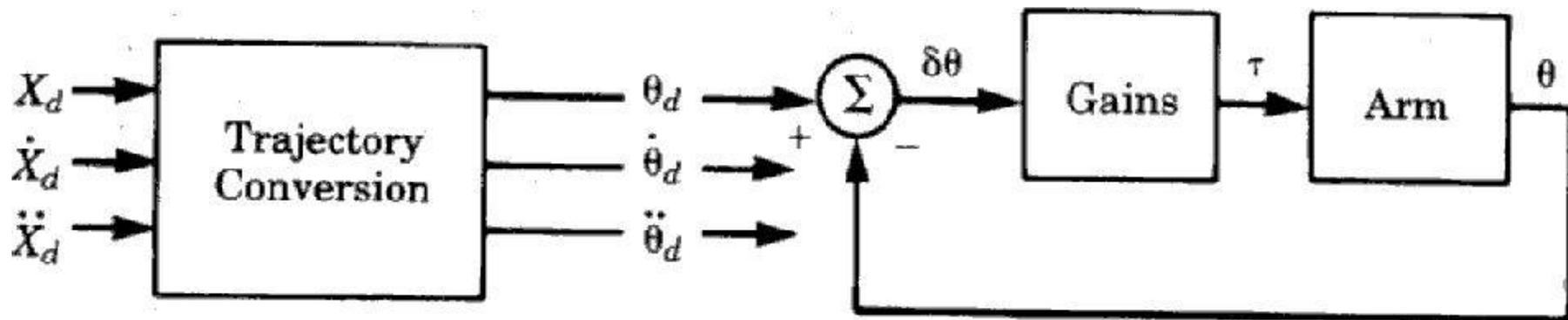
*Regelungssysteme der Industrieroboter:*

PID-Regelung + Schwerkraft-Kompensation:

$$\tau = \dot{\Theta}_d + K_v \dot{E} + K_p E + K_i \int E dt + \hat{G}(\Theta)$$

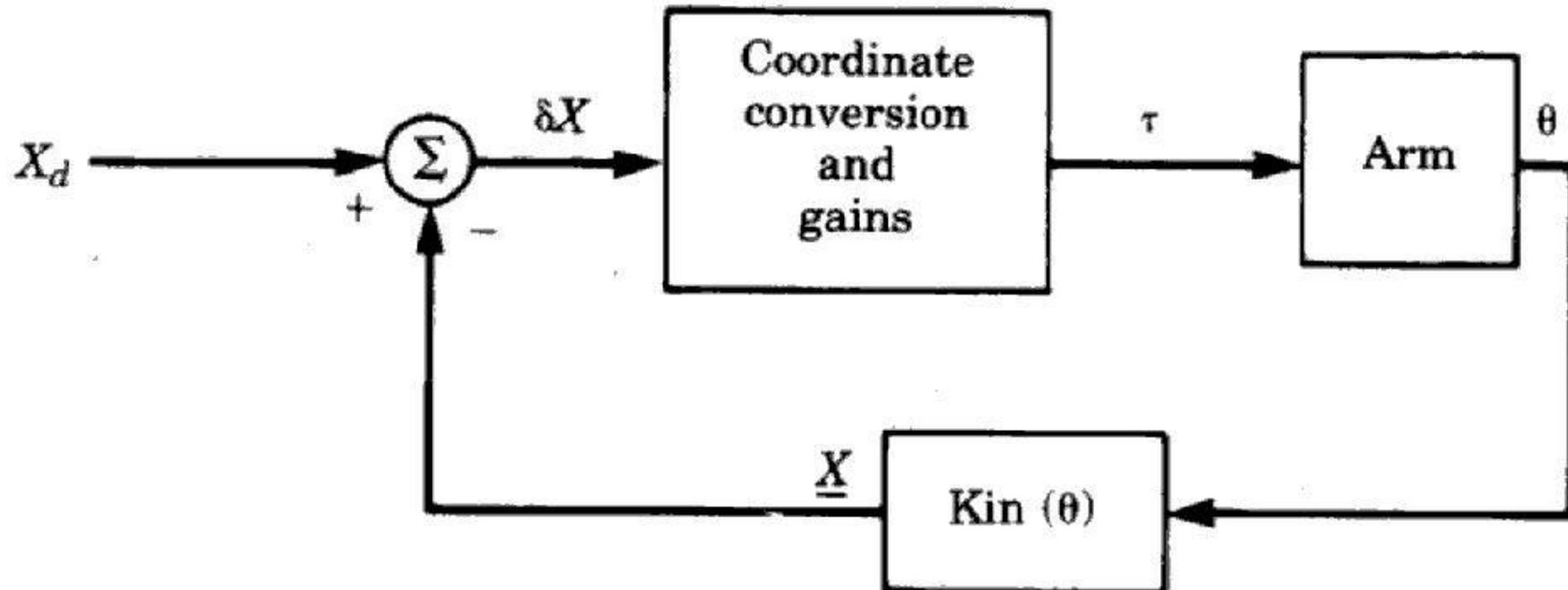
# Regelung im Kartesischen Raum - Verfahren 1

Gelenk-basierte Regelung mit Kartesischen Bahneingängen:



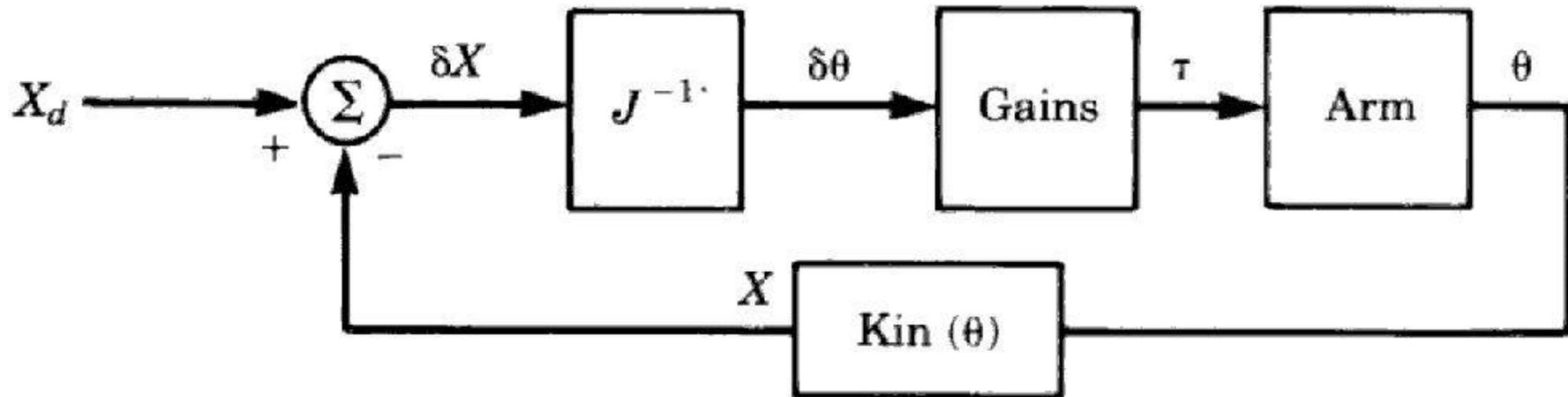
# Regelung im Kartesischen Raum - Verfahren 2

Kartesische Regelung über Kinematik-Berechnung:



# Regelung im Kartesischen Raum - Verfahren 3

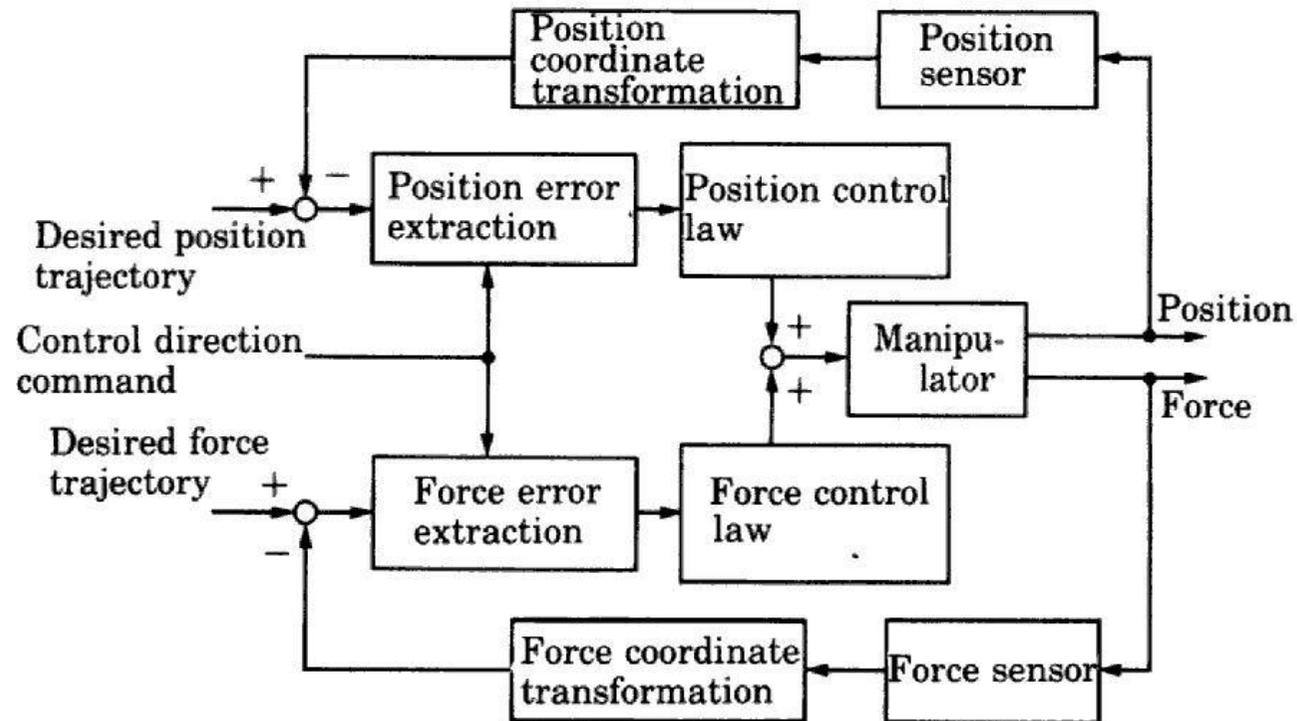
Kartesische Regelung über inverse Jacobi-Berechnung:



# Hybride Regelung der Kraft und Position

Bei manchen Aufgaben müssen sowohl Position als auch Kraft auf dem Endeffektor geregelt werden: *Montage, Abschleifen, Tür-Öffnen und Schließen, Kurbel-Drehung ...*

Ein Verfahren zur Kraftregelung:



Zwei Rückkopplungsschleife für separate Regelung von Position und Kraft.