

# Steuerung von Laufrobotern für Serviceoperationen

**Prof. Dr. Thomas Ihme**

**Hochschule Mannheim**

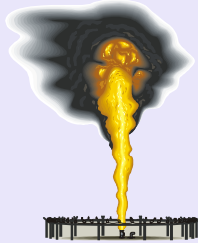
**Fakultät Informatik, Institut für Robotik**

# Inhalt

- **Technische Anwendungen**
- **Mechanische Aspekte**
- **Steuerhardware**
- **Sensoren**
- **Steuersoftware**
- **Beispiele**
- **Zusammenfassung**

# Technische Operationen mit Laufrobotern

Havarierte Umgebungen



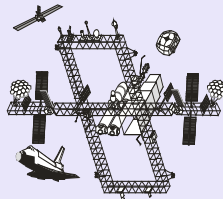
Inspektions- und  
Wartungsarbeiten



Gefahrenereinsätze,  
Antiterror, Minenräumung



Weltraumerkundung,  
planetare Missionen



Forst und  
Natur



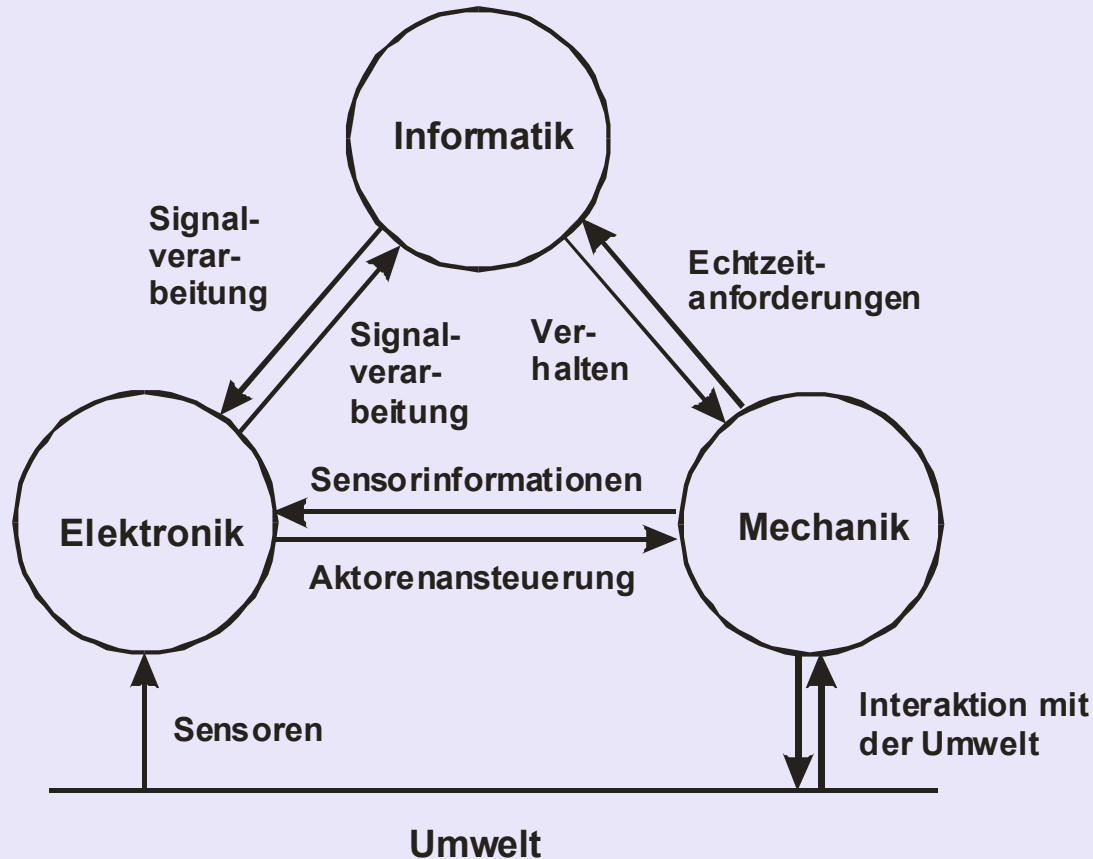
Bau, Wasserbau,  
Transport



➔ **Manipulationsfähigkeiten von großer Bedeutung**

- Führung und Positionierung von Instrumenten
- Kraftgeführte Interaktion mit externen Objekten
- Echtzeitsteuerung mittels onboard-Steuerung

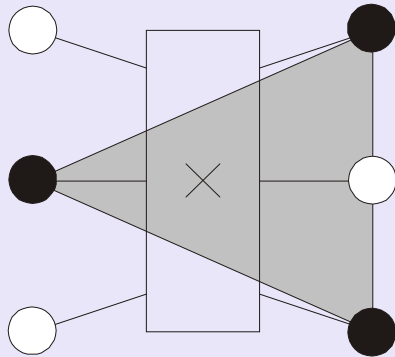
# Laufroboter als mechatronisches System



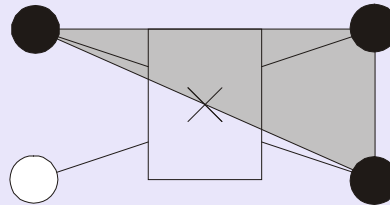
**Beispiele für die Interaktion zwischen den einzelnen Bereichen eines mechatronischen Systems**

# Mechanische Aspekte

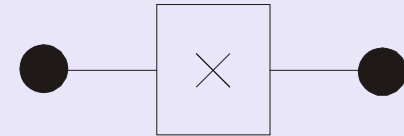
## Anzahl der Stützfüße – ein Stabilitätsproblem



3 Füße können abwechselnd  
Ein Stützpolygon für den  
Massenschwerpunkt  
aufspannen



Der Massenschwerpunkt  
Kann das Stützpolygon  
verlassen

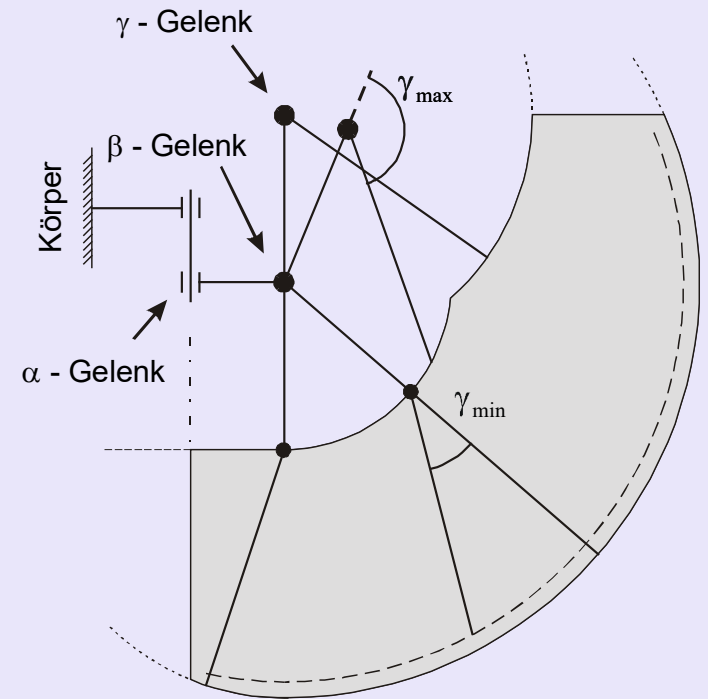


Kein Stützpolygon  
Vorhanden,  
Dynamische Stabilität  
erforderlich

# Mechanische Aspekte

## Roboterkinematik

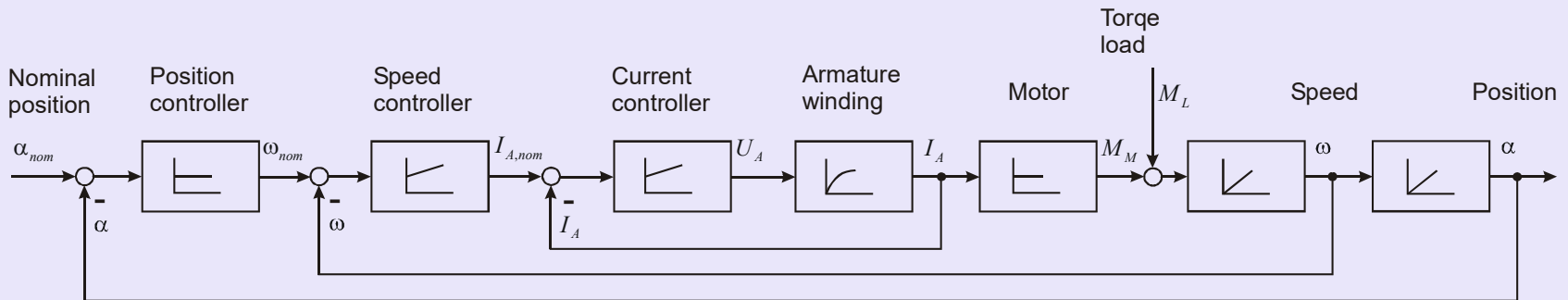
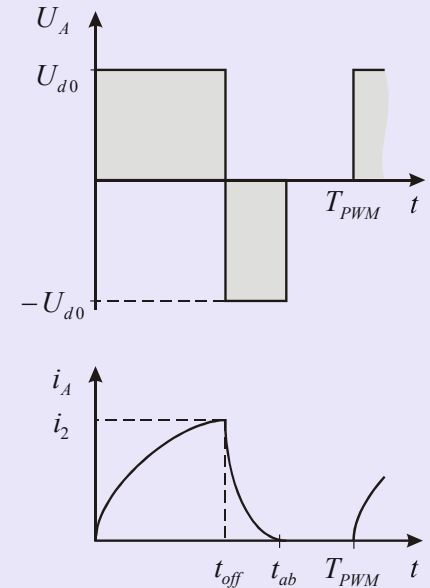
- Kinematischer Aufbau des Roboters
- Beine sind eigenständige sub-Systeme
- Drehmomente und Drehzahl der Gelenke
- Rotationsgelenke  $\rightarrow$  komplizierte Form des Arbeitsraumes
- Form und Größe der Trajektorie der Fußbewegung?
- Berechnung der Gelenkpositionen und -geschwindigkeiten ausgehend von kartesischen Koordinaten  $\rightarrow$  inverses kinematisches Problem
- Kontrolle von Gelenkposition und -geschwindigkeit



# Steuerungshardware

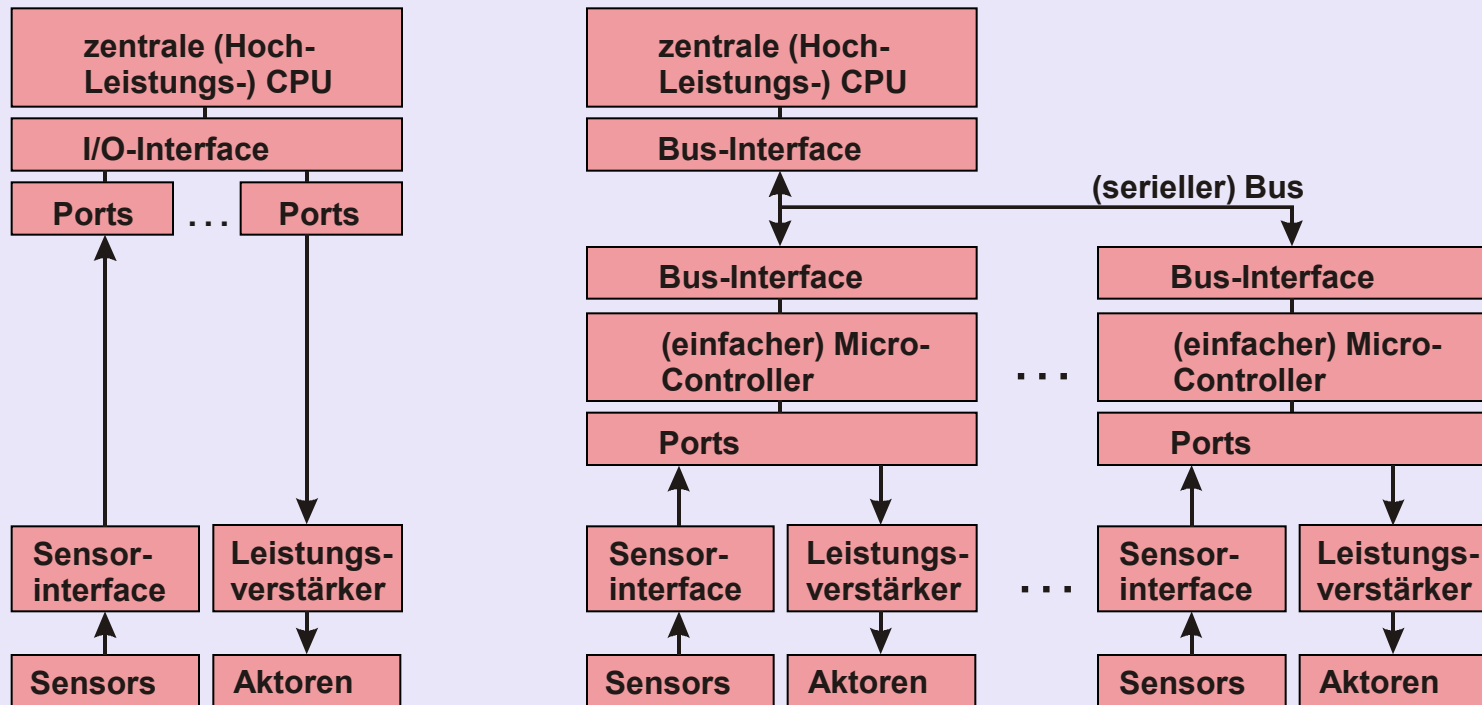
## Gelenkregelung am Bein

- PWM zur energieeffizienten Antriebssteuerung
- Elektromechanisches System wird bei der Positionsregelung mit PWM nichtlinear (kleine Motorinduktivitäten)
- Positionsfehler während Ausführung von Bewegungen bei Positionsregelung → kaskadierter Regler wird auch bei Kleinantrieben benötigt
- Probleme mit nichtstationärem in der Stromregelschleife



# Steuerungshardware

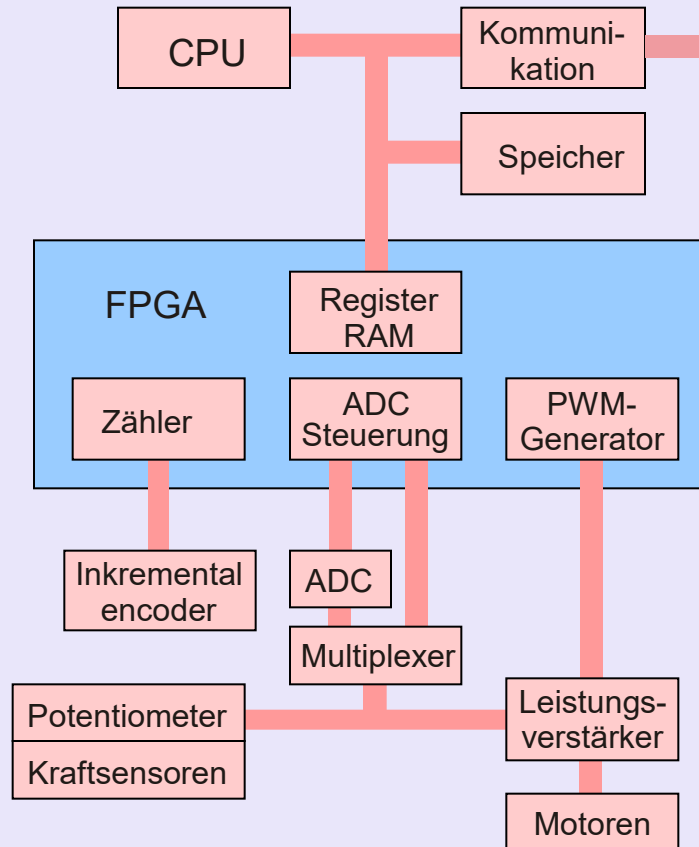
## Rechnerarchitektur





# Steuerungshardware

## Rechnerarchitektur



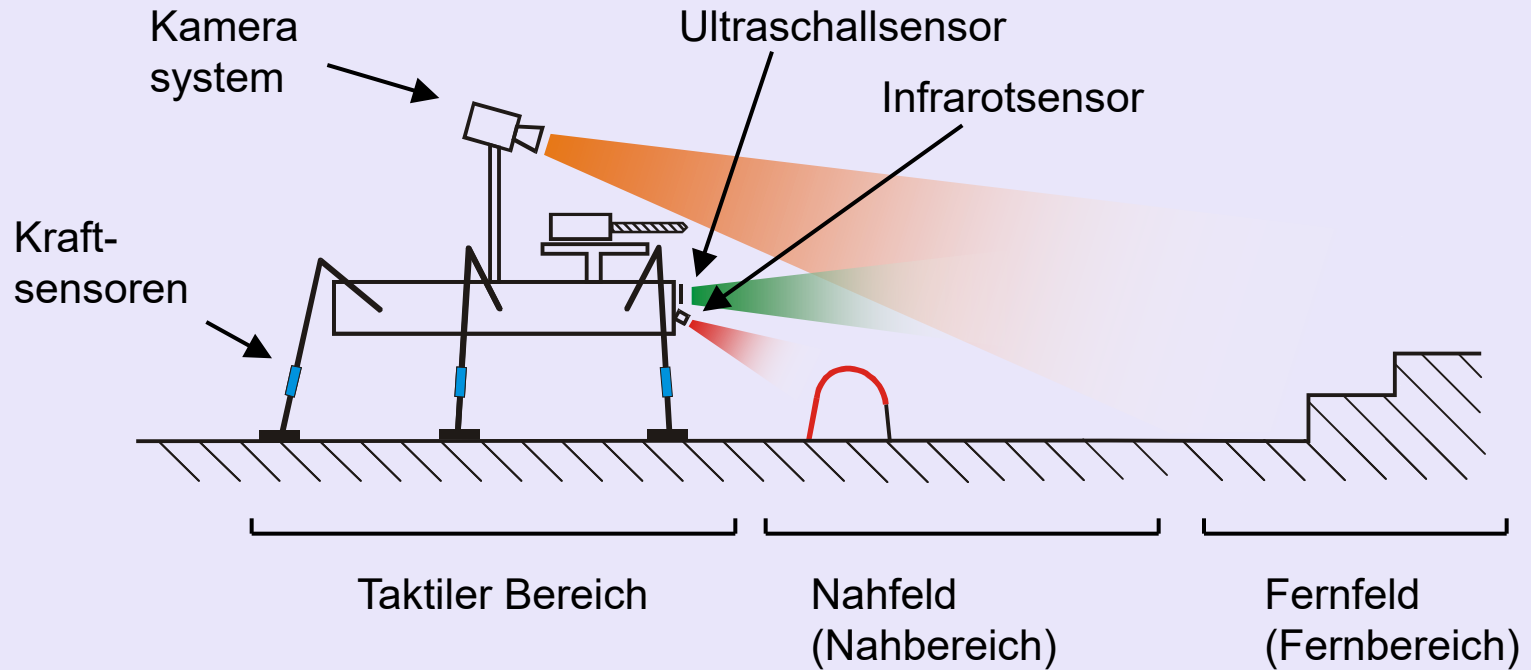
# Sensoren

## Klassifikation von Sensoren

	Klassifikation	Messgrößen	Sensoren	
Entfernung ↑ Erfassungszeitpunkt ↓	Externe Sensoren	fern	Kamera, Laser Radar	
		nah	Entfernung, Existenz von Objekten	Stereo-Kamera, Infrarot, Ultraschall, Kapazität
	Interne Sensoren	taktil	Externe Kräfte, Kollision Interne Kräfte + Momente	Dehnmessstreifen, Bumper Dehnmessstreifen
		Roboter	Gelenkwinkel, Gelenk- geschwindigkeit, Neigung	Potentiometer, Inkremental- sensoren, Neigungssensoren

# Sensoren

## Beispiele für Sensoren



# Steuerungssoftware

## Steuerungssoftware – Neuronale Netze

- ähnlich zu ihren biologischen Vorbildern
- Training durch Simulation
- Welche Trainingsdatensätze sollten genutzt werden?
- Welche Bewertungsfunktion sollte genutzt werden?
- Bekannte Kriterien wie Stabilitätsrand oder Laufstrecke
- Nutzung dieser Kriterien für Anpassung der Gewichte (Erhöhung, Verringerung)
- Nutzung für Reinforcement Learning
- Lösungen mit Neuronalen Netzen führen zu interessanten Lösungen
- Problem der Realisierung komplexer Neuronaler Netzwerke für Roboterapplikationen ist bisher nicht zufriedenstellend gelöst
- Vorhersagbarkeit und Stabilität sind wichtig für praktische Anwendungen, können bisher jedoch nicht hinreichend analytisch nachgewiesen werden

# Steuerungssoftware

## Steuerungssoftware – Mechatronik und Steuerungstheorie

- Regelung von Gelenkwinkel und -geschwindigkeiten
- Trajektorienplanung und -interpolation
- Explizite und regelbasierte Laufplanung
- Vorteil: Nutzung gut bekannter mechatronischer Prinzipien
- Einfach zu implementierende Steuerungsregeln (z.B. PID-Regler)
- Eigenschaften wie Stabilität sind gut bekannt (Regelungstheorie)
- Lernen einfacher Steuerungszusammenhänge im Gegensatz zu Neuronalen Netzen nicht notwendig
- Spezielle Lösungen können gut realisiert werden, komplexe Lösungen sind jedoch schwer zu handhaben
- Methode der Superposition hilft, Komplexität zu verringern und unterstützt modulares Design

# Steuerungssoftware

## Steuerungssoftware – Verhaltensbasierte Steuerungen

- Modellierung von Basisverhalten durch Aufbau von Sensor/Motor-Verbindungen
- Zerlegung von komplexem Verhalten zu einer Vielzahl von “einfachen” Ebenen mit zunehmend abstrakterem Verhalten (Subsumption architecture)
- Verhalten können durch ein überlagertes Verhalten beeinflusst werden
- Mehrere Basisverhalten können zusammen zu einem völlig neuartigem Verhalten führen (emergent behavior)
- Verhaltensbasierte Steuerungen führen zu überraschenden Resultaten, Ähnlichkeiten zu biologischen Systemen können beobachtet werden
- Wie können Verhalten zur Lösung bestimmter Aufgaben entworfen werden?
- Forschungsaktivitäten zur systematischen Modellierung und Spezifikation von Verhalten, z.B. Dual Dynamics
- Keine Vorplanung
- Schwierigkeiten bei der Realisierung komplexer Verhalten

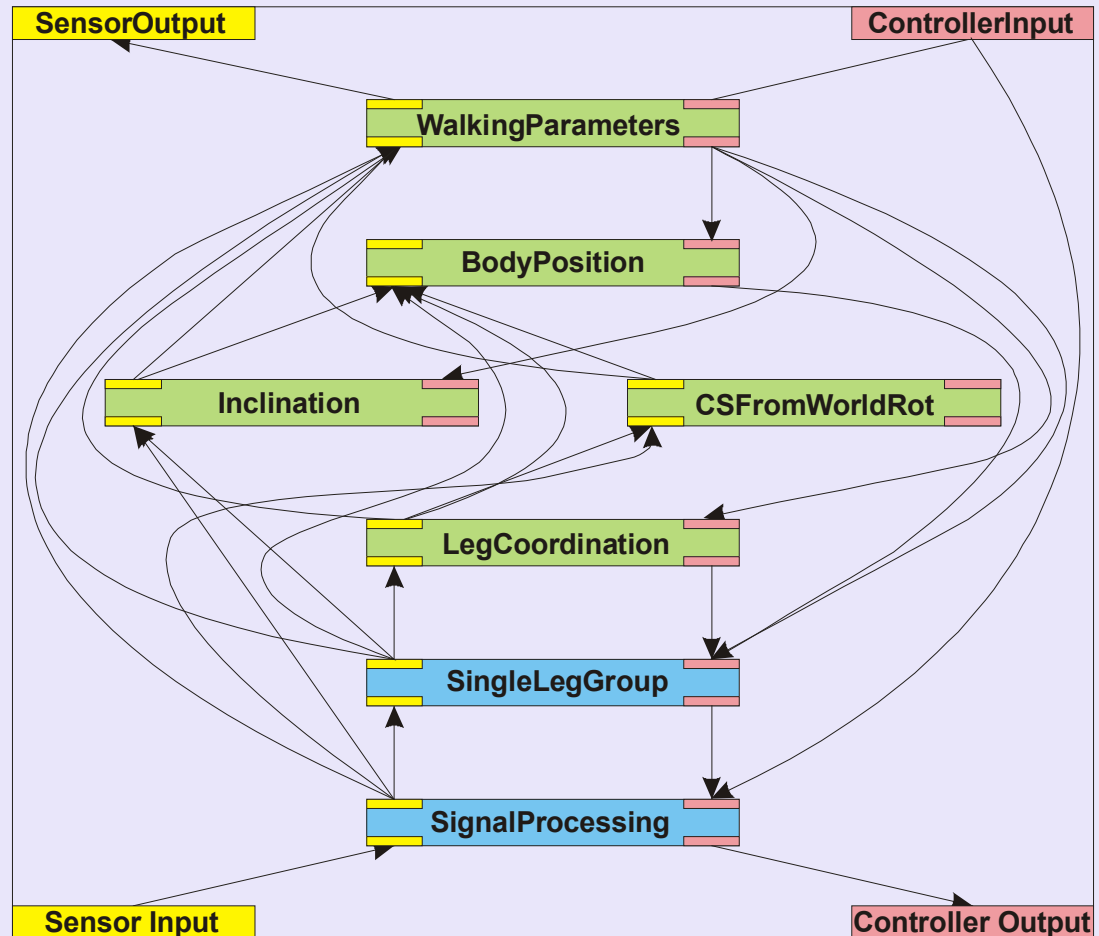
# Steuerungssoftware

## Steuerungssoftware – gemischter modularer Steuerungsansatz

- Jede der vorgestellten Methoden haben spezielle Vorteile
- Jede der vorgestellten Methoden haben andere Probleme
- Verhalten können auch als Module betrachtet werden, die bestimmte Aktionen basierend auf Sensorinformationen und Steuerungskommandos bieten
- Module können Steuerungsgleichungen, Neuronale Netze oder einfache verhaltensbasierte Steuerungsregeln enthalten, beispielsweise kaskadierte Regler, Hierarchien
- Verschiedene Basisverhalten können überlagert werden
- Module einer höheren Ebene können Steuerungskommandos an eine niedrigere Ebene geben
- Aktivierung / Unterdrückung von Aktivitäten von Modulen einer niederen Ebene

# Steuerungssoftware

Beispiel für ein modulares Design



by B. Gassmann, FZI

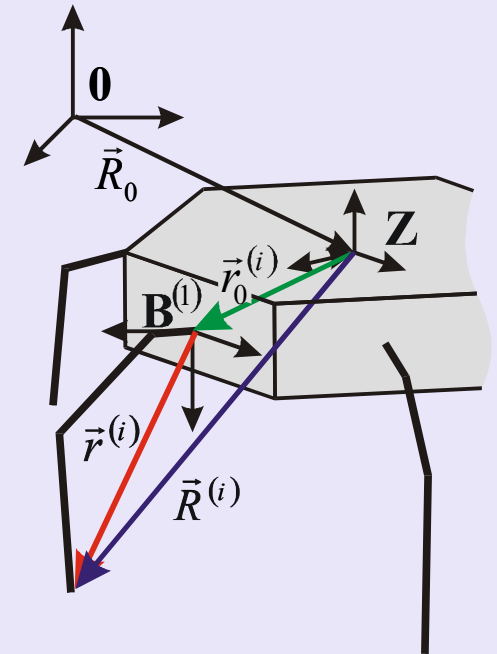


# Bewegungssteuerung

## Beispiel: Überlagerung von Lauf- und Körperbewegungen

- Zentralkoordinatensystem zur Ortsbestimmung des Roboters innerhalb des Weltkoordinatensystems
- Bein- und Körperbewegungen werden innerhalb des Zentralkoordinatensystems beschrieben
- Trajektorien für Bein- und Körperbewegungen werden unabhängig voneinander erzeugt
- Mittels einer einfachen Vektorgleichung kann die gesuchte Beinstellung ermittelt werden

$$\vec{R}^{(i)} = \vec{r}_0^{(i)} + \vec{r}^{(i)}$$



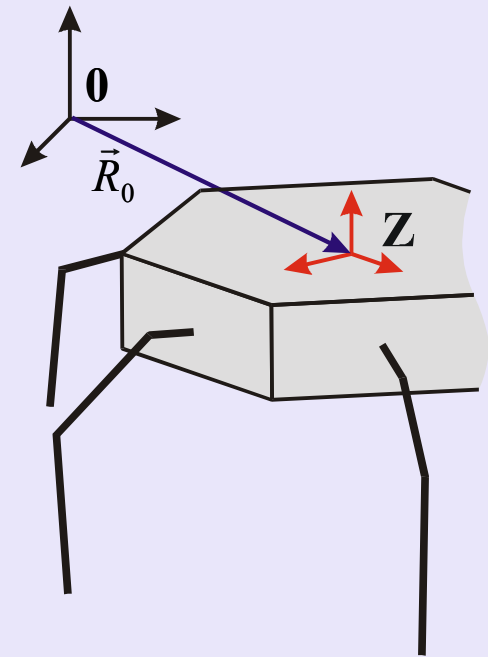
# Bewegungssteuerung

## Bewegungssteuerung durch Superposition:

- Körper mit 6 Freiheitsgraden bewegbar
- Körperbewegung für unmittelbare Umgebung
- Überlagerung mit Laufbewegungen

## Prinzip:

- Zentralkoordinatensystem ersetzt fehlendes ortsfestes Bezugssystem (virtueller Fixpunkt)
  - ▣ Lokalisierung des Roboters
  - ▣ Bezugspunkt aller Bewegungen



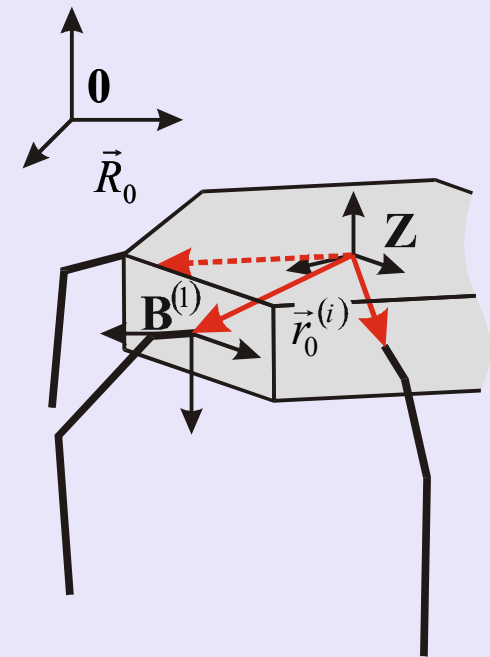
# Bewegungssteuerung

## Bewegungssteuerung durch Superposition:

- Körper mit 6 Freiheitsgraden bewegbar
- Körperbewegung für unmittelbare Umgebung
- Überlagerung mit Laufbewegungen

## Prinzip:

- Zentralkoordinatensystem ersetzt fehlendes ortsfestes Bezugssystem (virtueller Fixpunkt)
  - ▣ Lokalisierung des Roboters
  - ▣ Bezugspunkt aller Bewegungen
- Beinbefestigungspunkte bestimmen Position des Körpers



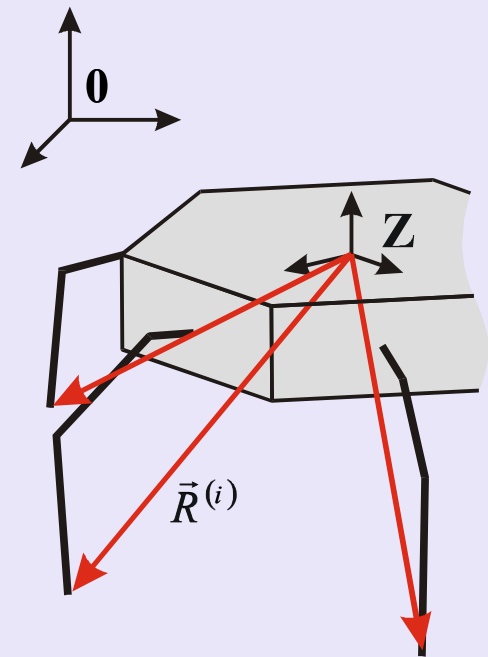
# Bewegungssteuerung

## Bewegungssteuerung durch Superposition:

- Körper mit 6 Freiheitsgraden bewegbar
- Körperbewegung für unmittelbare Umgebung
- Überlagerung mit Laufbewegungen

## Prinzip:

- Zentralkoordinatensystem ersetzt fehlendes ortsfestes Bezugssystem (virtueller Fixpunkt)
  - ▣ Lokalisierung des Roboters
  - ▣ Bezugspunkt aller Bewegungen
- Beinbefestigungspunkte bestimmen Position des Körpers
- Beschreibung der Fußtrajektorien im Zentralkoordinatensystem



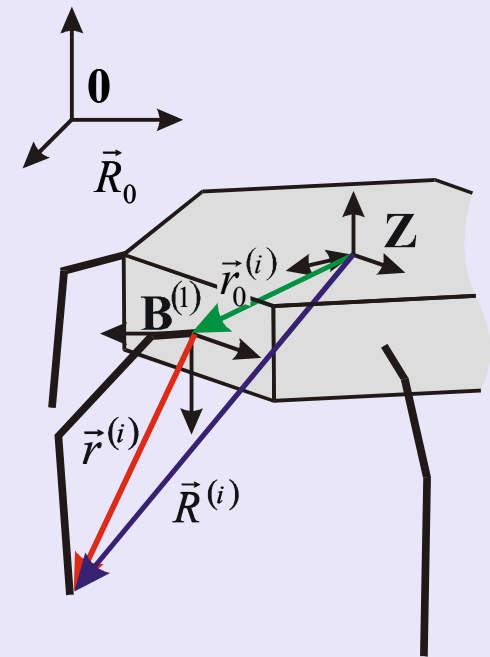
# Bewegungssteuerung

## Bewegungssteuerung durch Superposition:

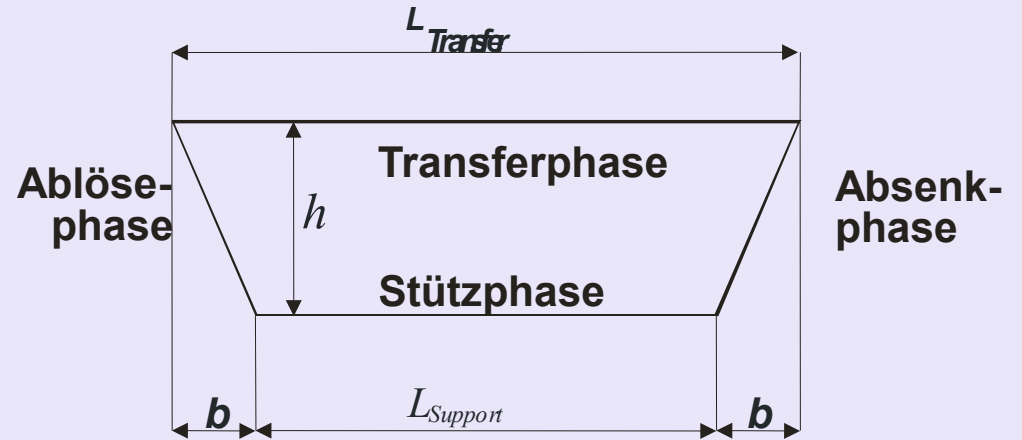
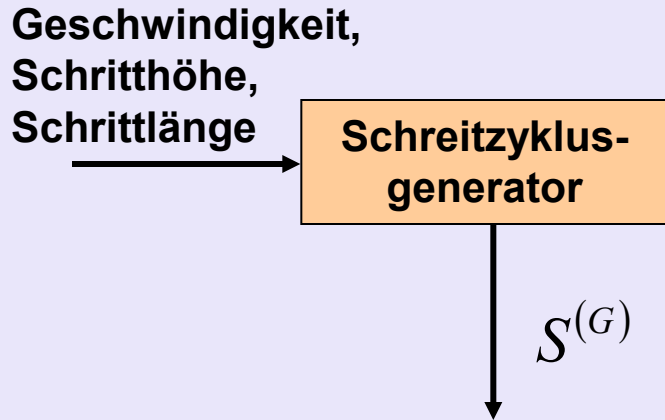
- Körper mit 6 Freiheitsgraden bewegbar
- Körperbewegung für unmittelbare Umgebung
- Überlagerung mit Laufbewegungen

## Prinzip:

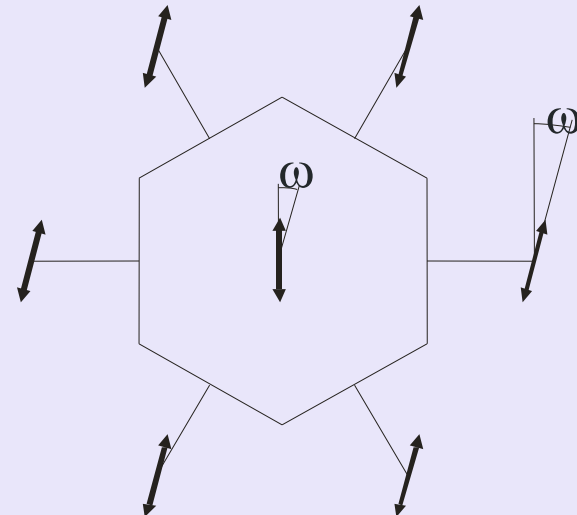
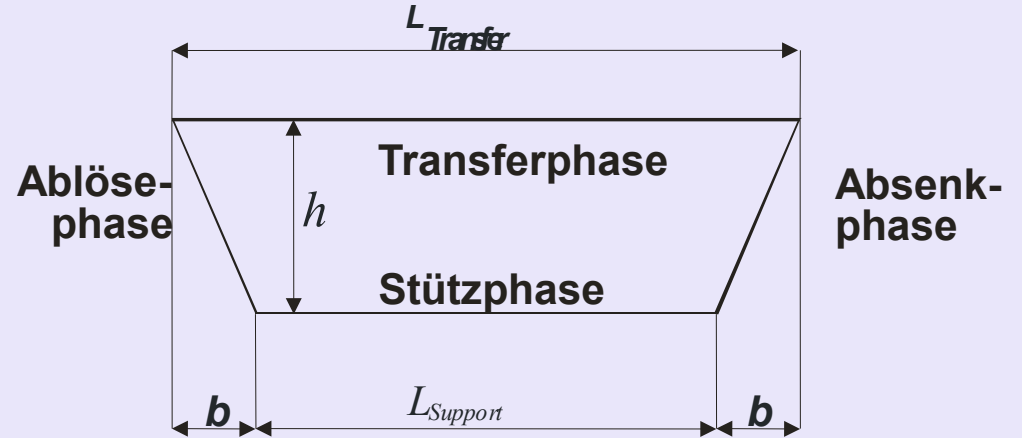
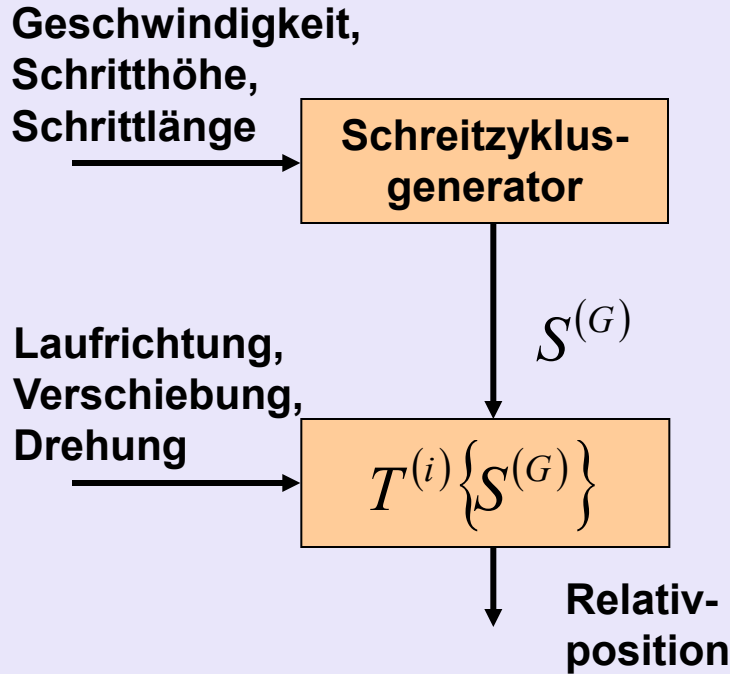
- Zentralkoordinatensystem ersetzt fehlendes ortsfestes Bezugssystem (virtueller Fixpunkt)
  - ▣ Lokalisierung des Roboters
  - ▣ Bezugspunkt aller Bewegungen
- Beinbefestigungspunkte bestimmen Position des Körpers
- Beschreibung der Fußtrajektorien im Zentralkoordinatensystem
- Bestimmung der Beinstellungen durch Vektoraddition



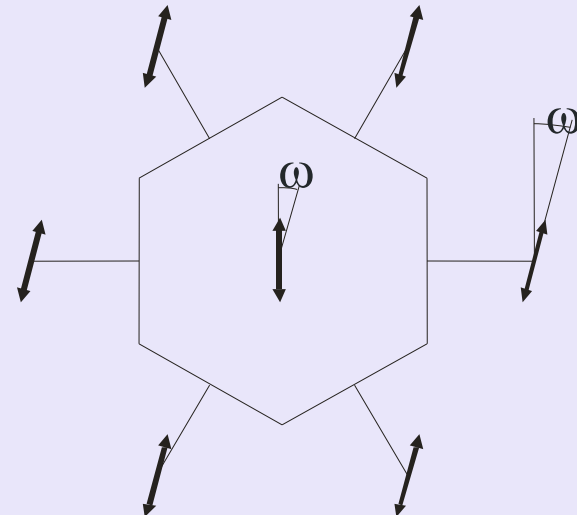
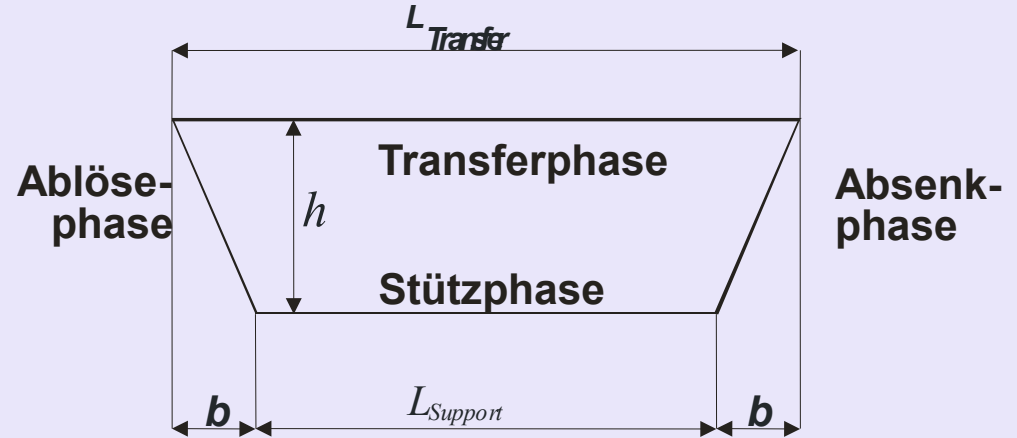
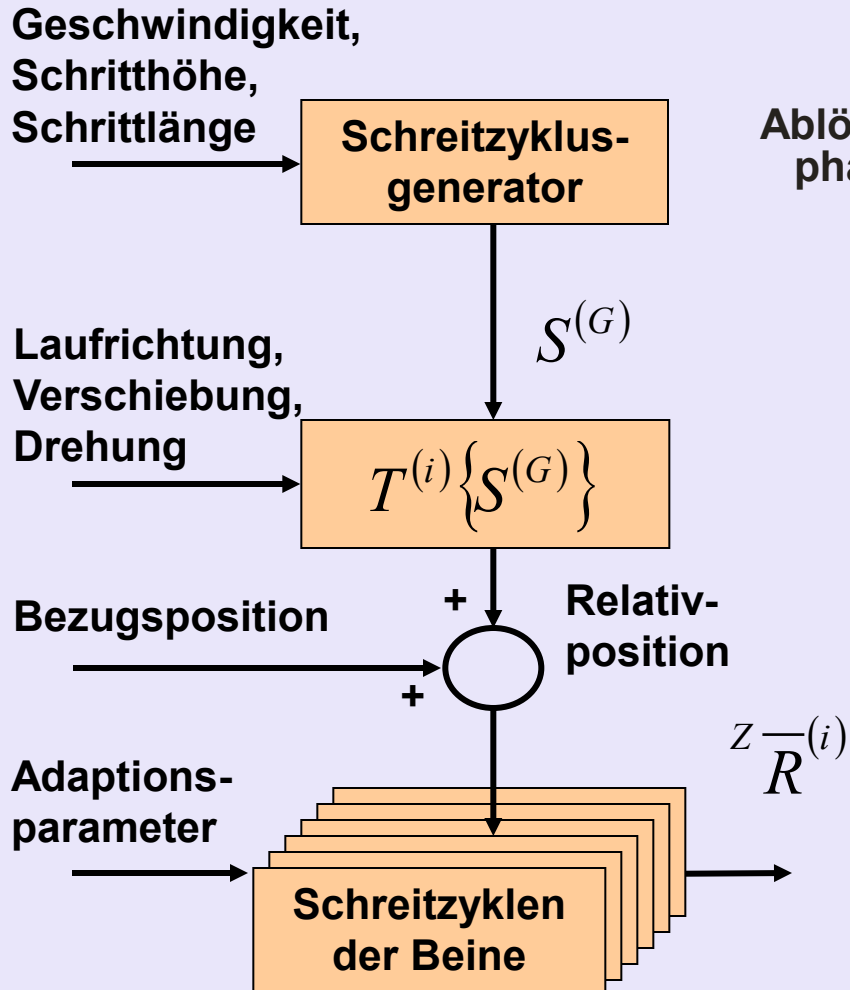
# Laufbewegungen



# Laufbewegungen

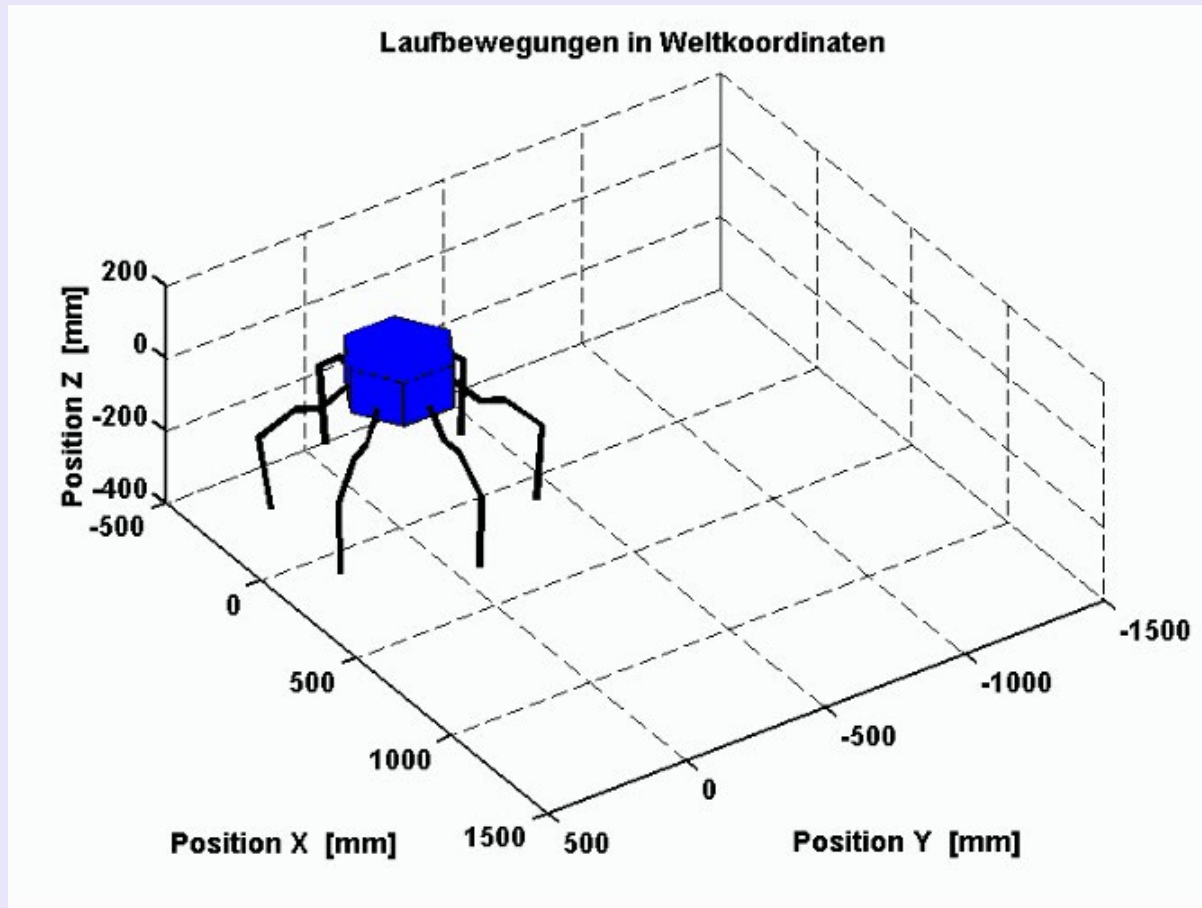


# Laufbewegungen



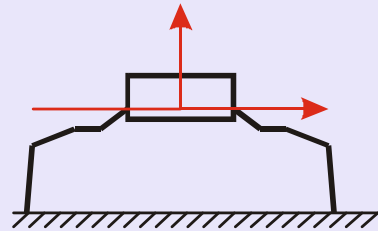
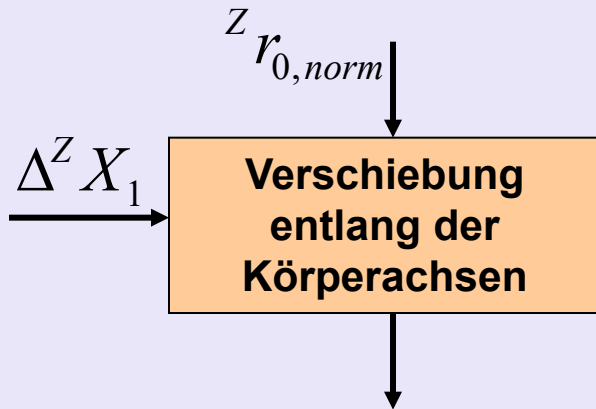


# Laufbewegungen



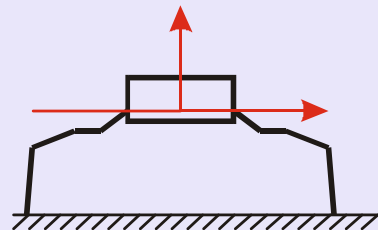
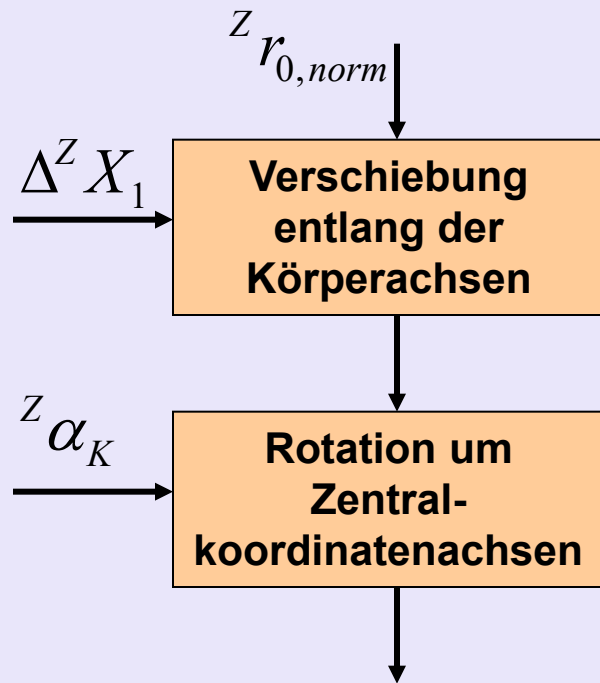
**Beispiel zum Laufen mit Richtungswechsel  
Basierend auf experimentell gewonnenen Daten**

# Körperbewegungen

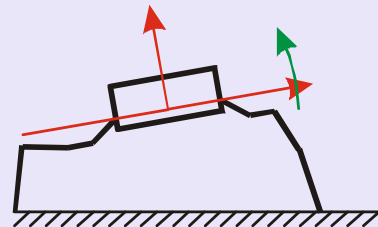


**Verschiebung mit Bezug auf Werkzeugkoordinaten**

# Körperbewegungen

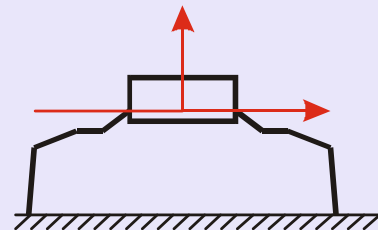
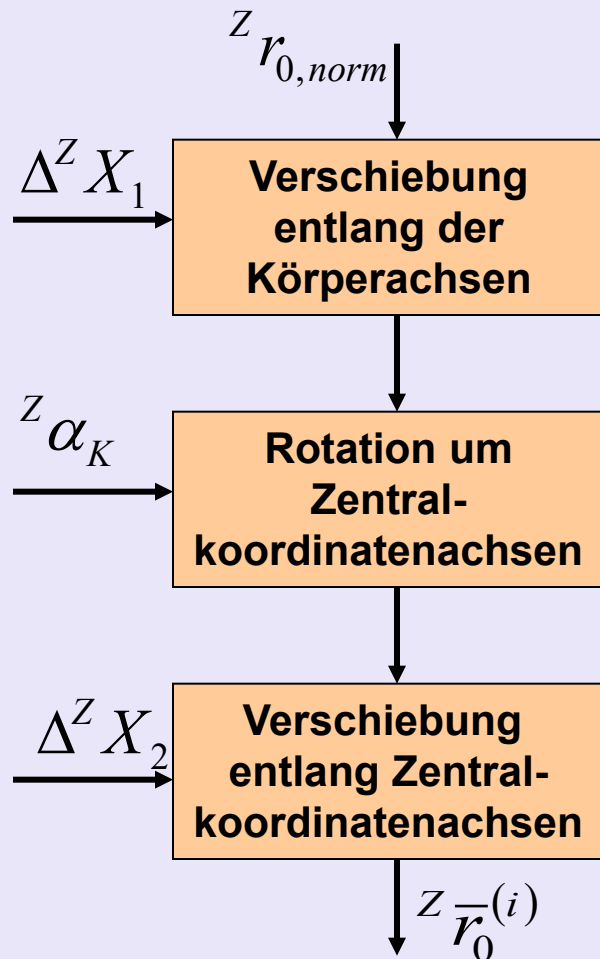


**Verschiebung mit Bezug auf Werkzeugkoordinaten**

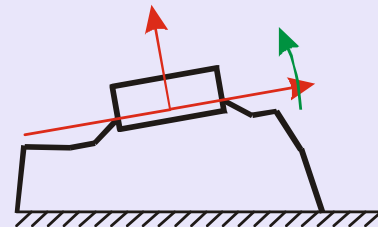


**Neigung des Körpers**

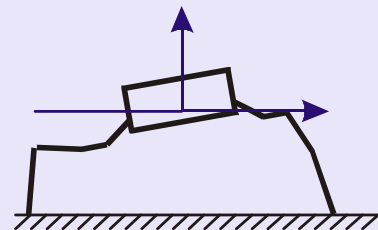
# Körperbewegungen



Verschiebung mit Bezug auf Werkzeugkoordinaten



Neigung des Körpers

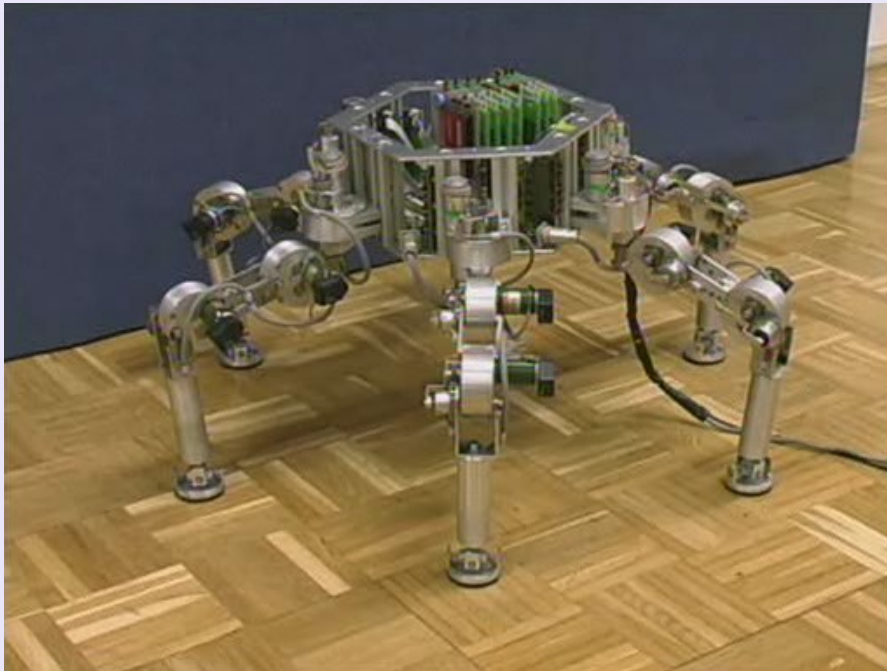


Verschiebung mit Bezug auf Untergrund bzw. externen Objekten

Koordinaten der Beinbefestigungspunkte der bewegten Plattform

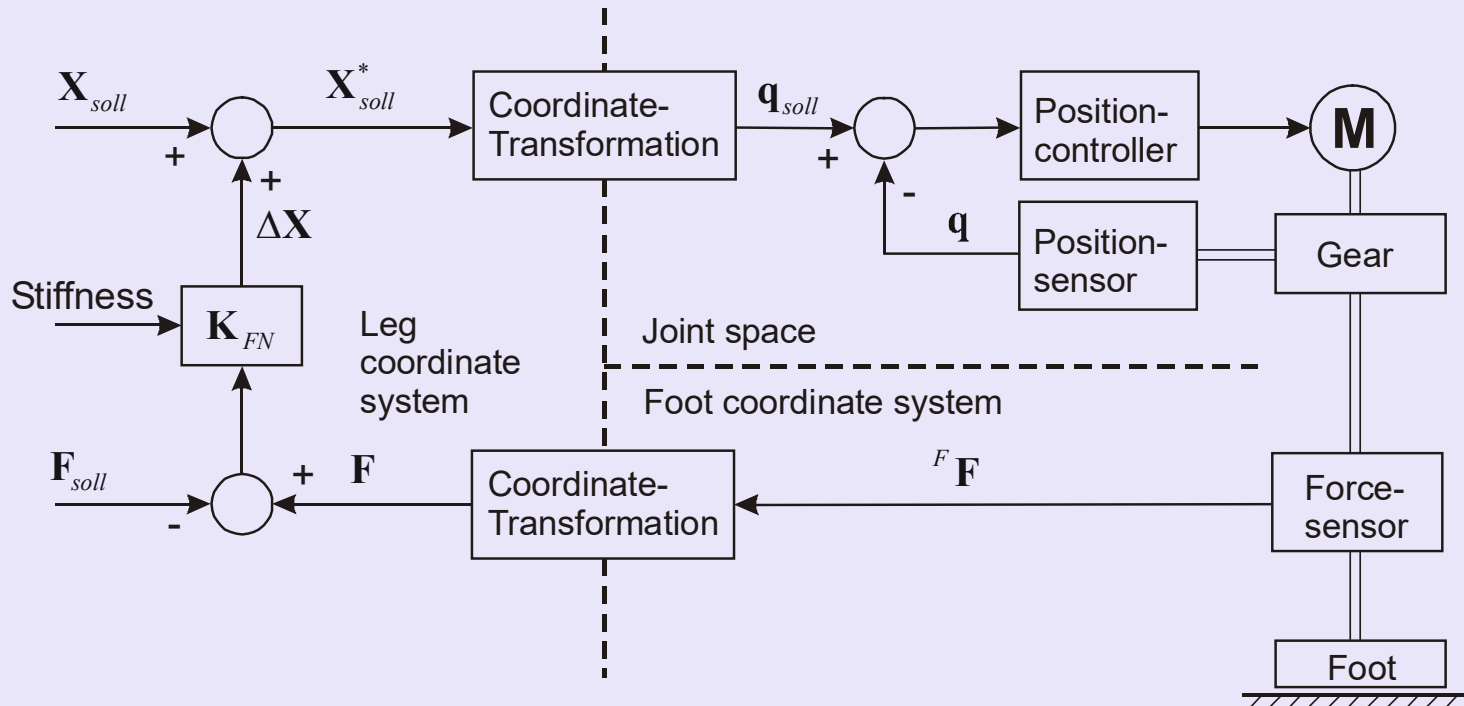
# Demonstration einer überlagerten Bewegung

**Beispiel: Körperbewegung**



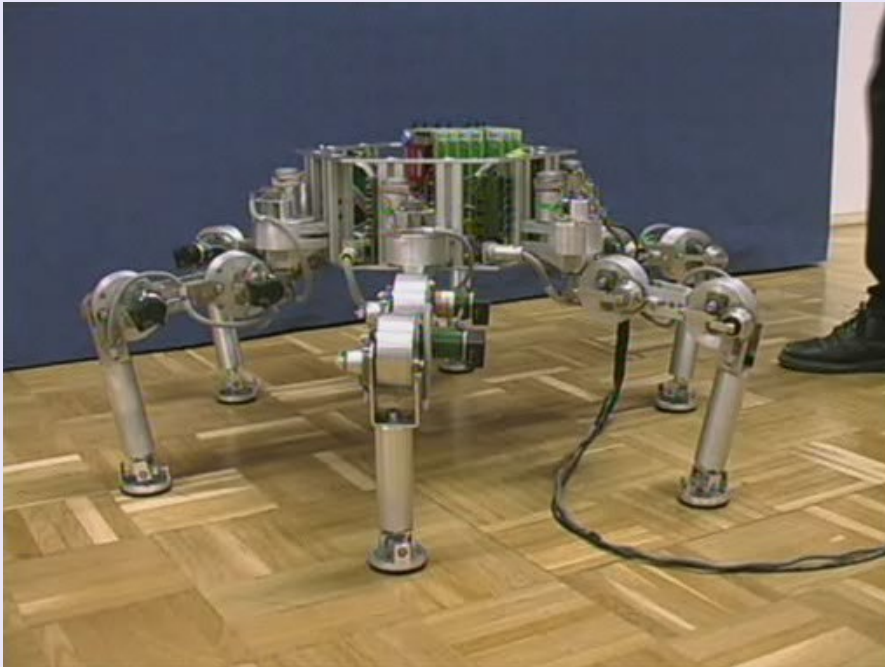
# Kraftregelung

## Beispiel: Aktive Nachgiebigkeit



# Demonstration einer Kraftregelung

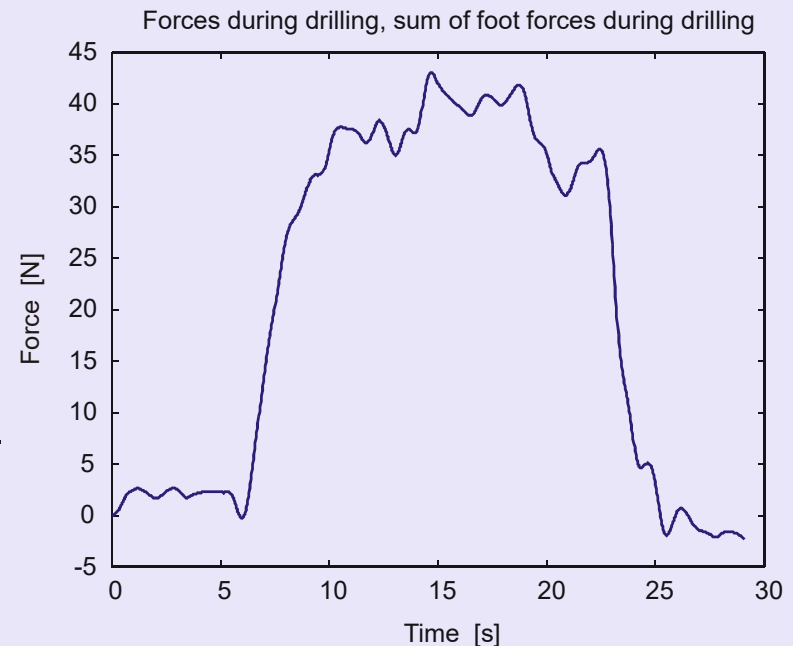
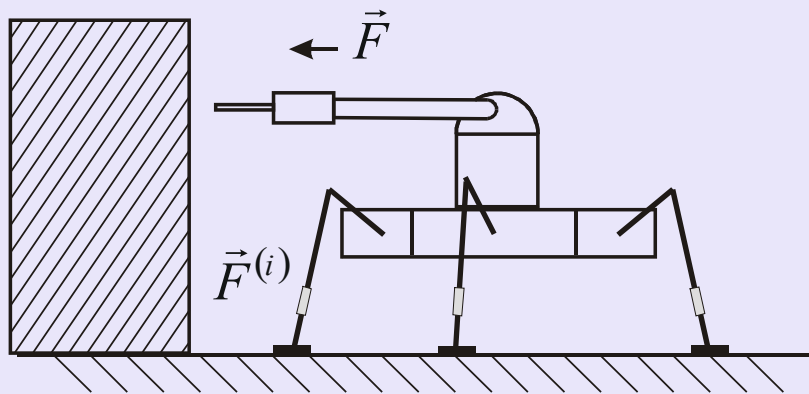
## Beispiel: Aktive Nachgiebigkeit



# Technische Operationen

## Beispiel: Bohroperation

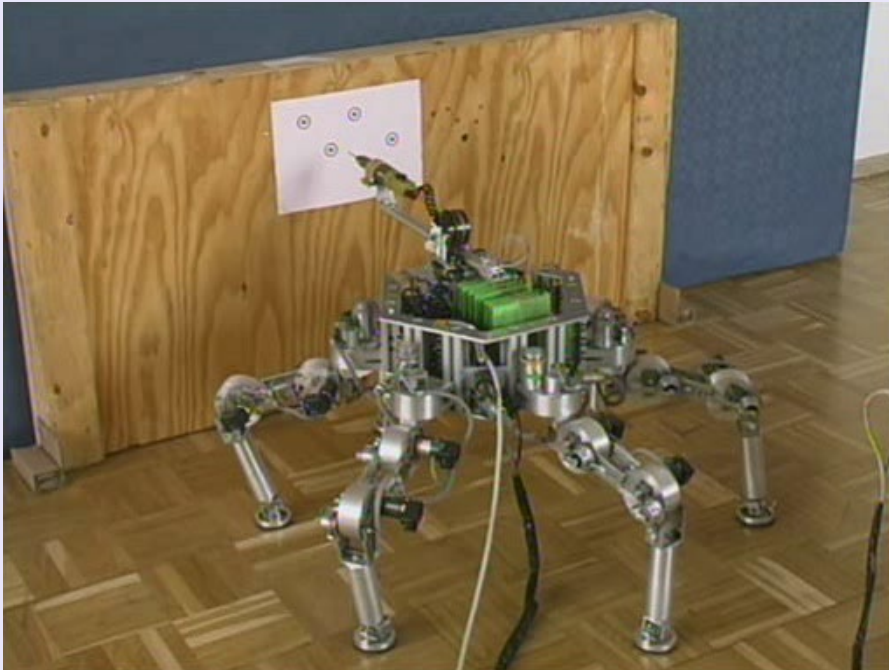
- Phase 1. Identifizierung von Zielkoordinaten mittels Stereobildverarbeitung
- Phase 2. Annäherung (z.B.: visual servoing + force control)
- Phase 3. Bohroperation – Problem der Kraftregelung und der Sensorfusion
- Phase 4. Rückbewegung mit Kontakt, kraftgeregelt
- Phase 5. Rückbewegung ohne Kontakt





# Demonstration einer technischen Operation

## Beispiel: Bohroperation



# Zusammenfassung

- **Laufroboter – ein interdisziplinäres Projekt**
- **Viele Probleme aus Mechanik, Steuerungshardware und Steuerungssoftware**
- **Sechsbeiniges mechanisches Design für statische Stabilität**
- **Arbeitsraum der Beine, Design der Lauftrajektorie und Kollisionsvermeidung sind komplexe räumlich-geometrische Probleme**
- **Fortgeschrittene Steuerungstechniken zur Beherrschung von Nichtlinearitäten der Antriebe**
- **Verteiltes Steuerungssystem hilft zur Reduktion der Komplexität, verschiedene Ausprägungen möglich**
- **Lösung mit FPGA reduziert Abhängigkeiten von Prozessor und Ein-/Ausgabekomponenten**
- **Verschiedene Steuerungsmethoden führten nicht zu echtem komplexen Verhalten von Robotern**
- **Generalisierter verhaltensbasierter Steuerungsansatz kann verschiedene erfolgreiche Steuerungsstrategien vereinen**
- **Beispiele demonstrieren einige erfolgreichen Lösungen**