

# Mechanik und Motoren

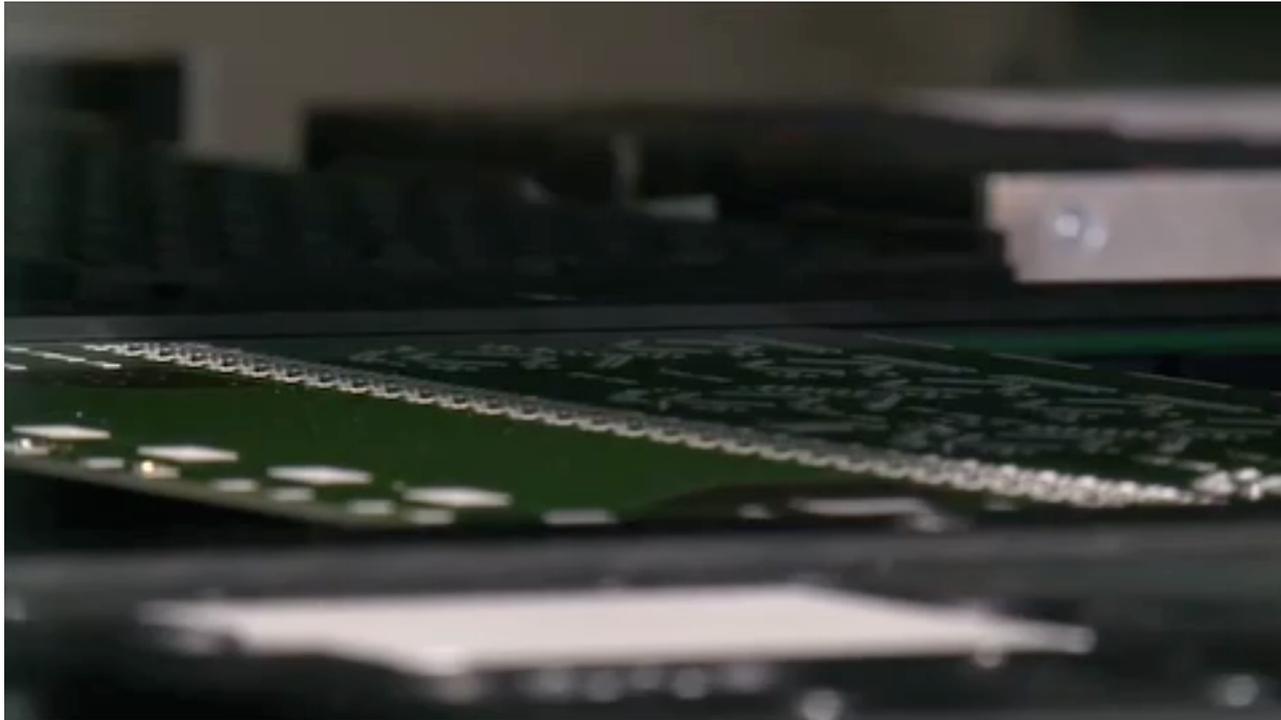
# Mechanik und Antrieb (Aktuatoren)

---

- Welche Art von Mechanik und Aktuatoren verwendet werden, wird durch die gewünscht Funktion des Roboters bestimmt
- Früher versuchte man Roboter zu bauen, die alles können. Diese waren unnötig schwer zu kontrollieren und zu teuer
- Heute baut man spezialisierte Roboter (Extremfall: Swarm Robotics)
- Designparameter:
  - Gesamtgröße (WS & WE)
  - Traglast
  - Kinematisches Skelett
- Anforderungen an die Bewegung des Endeffektors:
  - Schnell (z.B. Pick & Place)
  - Gleichmäßig (z.B. Schweißen)
  - Wiederholungsgenauigkeit
  - Genauigkeit

# Unterschiedliche Anforderungen an Roboter

---



[https://www.youtube.com/watch?v=S8qkaTsr2\\_o](https://www.youtube.com/watch?v=S8qkaTsr2_o)



<https://www.youtube.com/watch?v=NJlgQjKDVUg>



<https://www.youtube.com/watch?v=FMcMVUtwguM>



<https://www.youtube.com/watch?v=MbEVK717r6Y>

# Genauigkeit

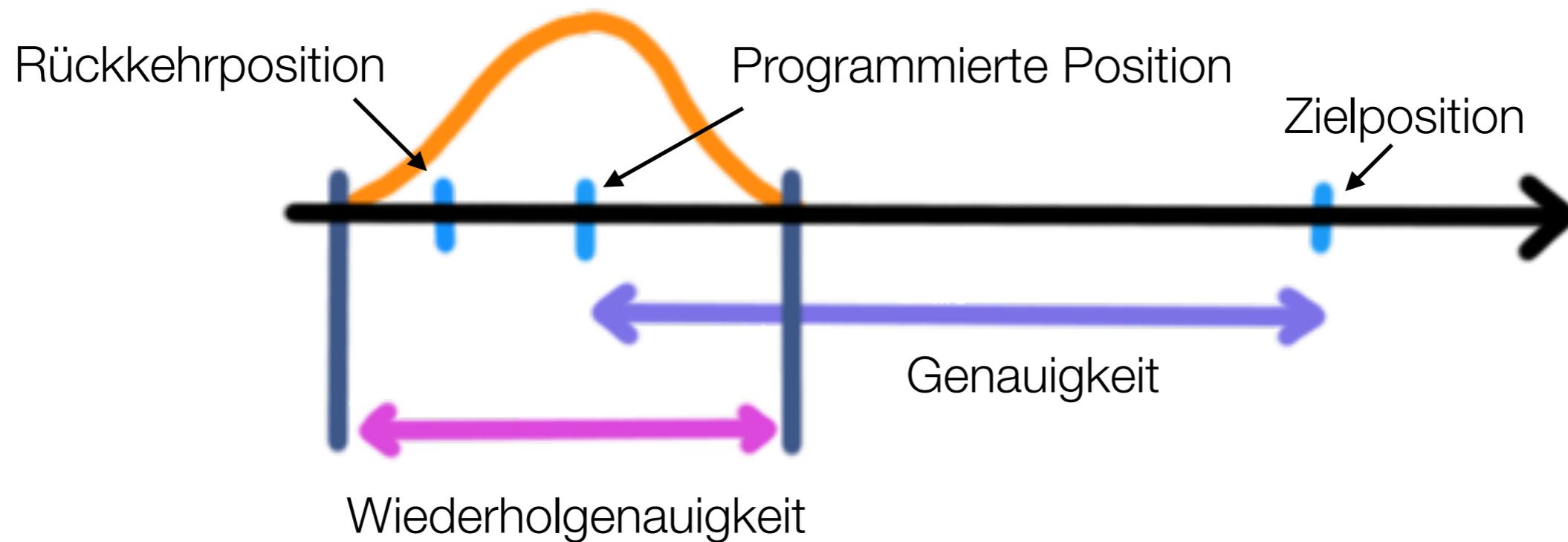
- Die Fähigkeit eine *gewünschte* Position anzufahren
- Wichtig bei Aufgaben, die nicht repetitiv sind, z.B. wechselnde Aufgaben aus einer Datenbank
- Ist auch eine Funktion der Genauigkeit des kinematischen Modells. Genaues Messen der Geometrie ist erforderlich
- $\pm 10\text{mm}$  bei unkalibrierten Systemen
- $\pm 0.01\text{mm}$  bei kalibrierten Systemen

# Wiederholgenauigkeit

- Die Fähigkeit, an die *gleiche* Position wie zuvor zurückzufahren
- Wird als Kugel um den Zielpunkt gemessen und muss nicht den Zielpunkt enthalten
- Wichtig bei repetitiven Aufgaben
- 1-2mm bei großen Robotern (Puma)
- $5\mu\text{m}$  bei Mikrorobotern

# Genauigkeit & Wiederholgenauigkeit

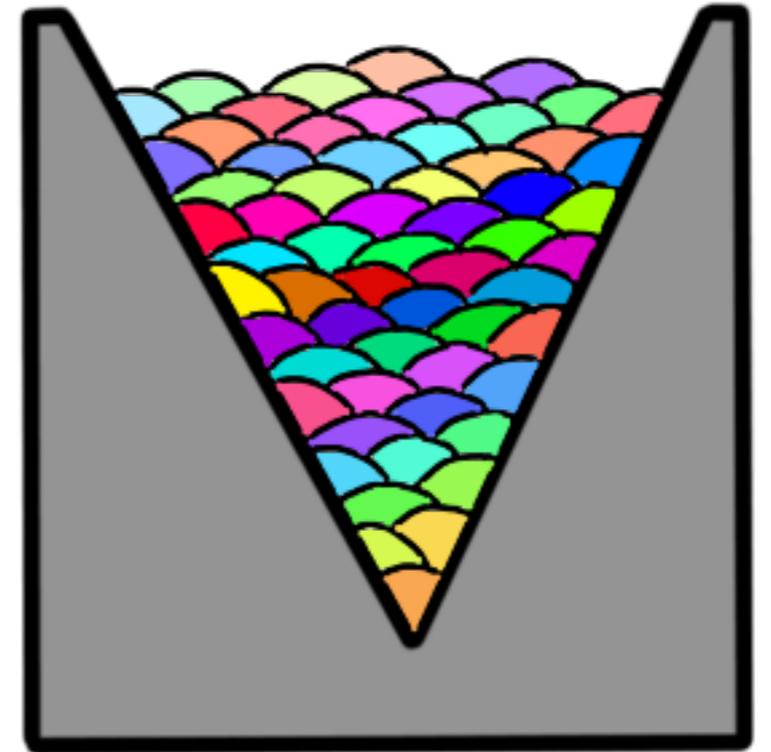
---



# Schweißroboter (welding)

---

- Eine der wichtigsten Aufgaben in der industriellen Robotik.
- Kleine Fehler können große Auswirkungen haben (benötigt viel Erfahrung)
- Hohe Wiederholgenauigkeit ( $\pm 0.1\text{mm}$ ) und hohe Genauigkeit ( $\pm 1\text{mm}$ ) notwendig
- Hohe Geschwindigkeiten, bis  $8\text{ m/s}$  (ca.  $30\text{ km/h}$ )
- Sensorgetrieben, z.B. um Lücken zu schliessen, oder mehrere Schichten aufzutragen



# Automontage (car assembly)

---

- War die dominierende Aufgabe in der Robotik
- Das Stampfen und Formen der Autoteile ist gefährlich und körperlich sehr anstrengend
- Wiederholgenauigkeit von  $\pm 0.5\text{mm}$  bei Traglasten von 100-300kg notwendig
- 50.000h Dauerbetrieb (Mean-time between failures)



# Systemeigenschaften – Arbeitsbereich und Arbeitsraum

---

Die beiden wichtigsten Eigenschaften eines (industriellen) Roboters sind:

## 1. Arbeitsbereich (Work envelop):

Der gesamte Raum, der von dem Roboter eingenommen werden kann

Wichtig: Bewegungseinschränkungen & Sicherheitsvorkehrungen

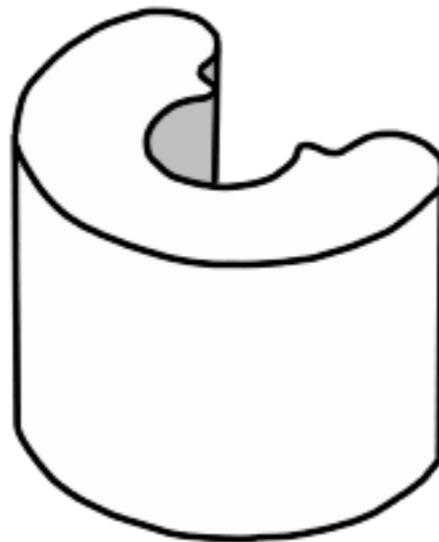
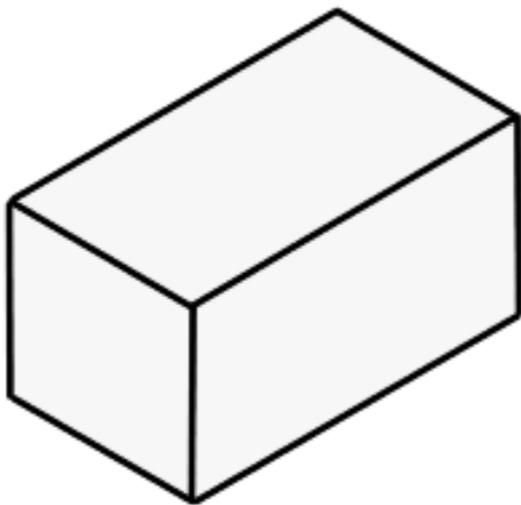
## 2. Arbeitsraum (Work space):

Alle Positionen, die der Endeffektor einnehmen kann.

Wichtig: Bestimmt, welche Arbeiten der Roboter ausführen kann.

# Arbeitsbereiche — Beispiele

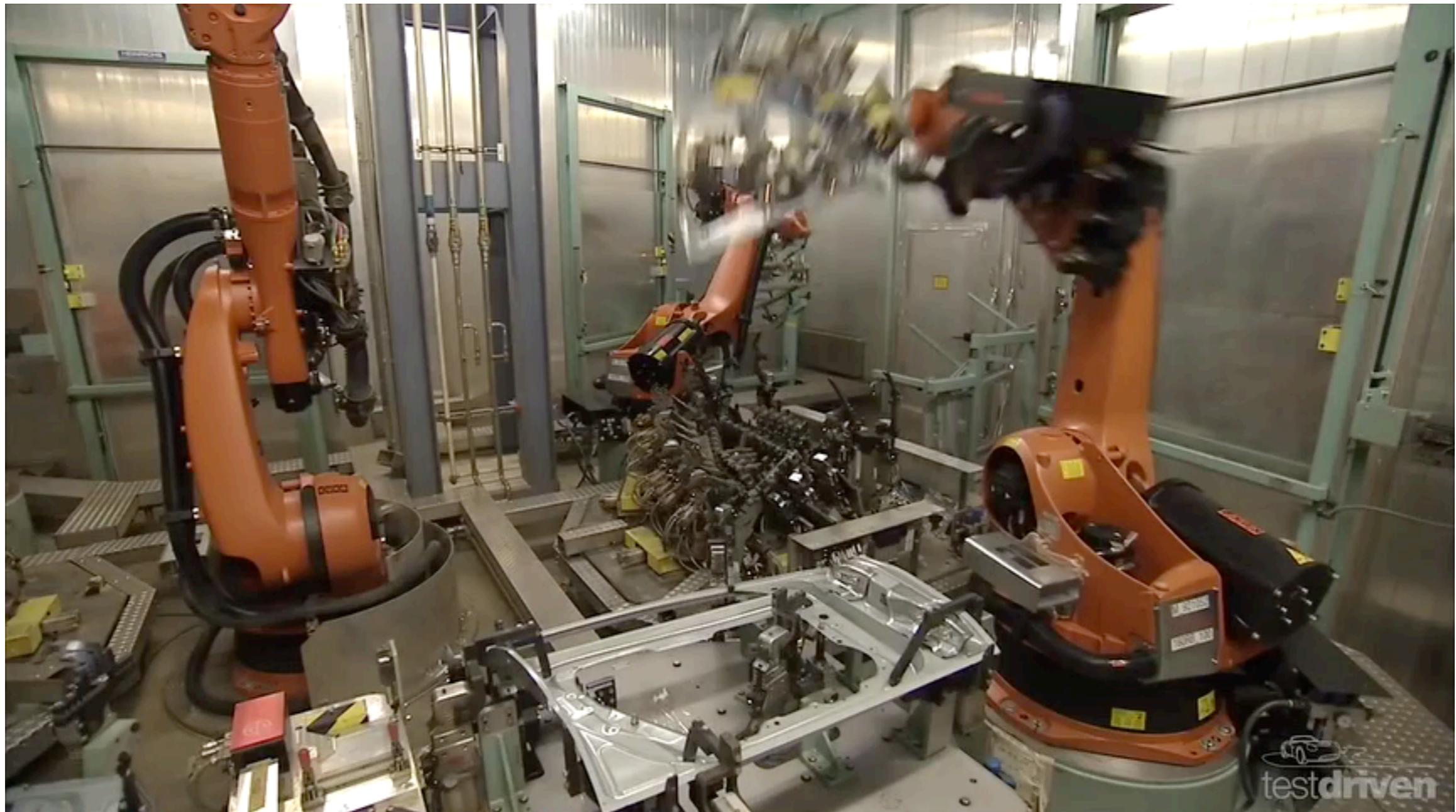
---



# Industrielle Fertigungsstrasse

---

## Mercedes A-Klasse Produktion



<https://www.youtube.com/watch?v=VreG1iC65Lc>

# Industrielle Fertigungsstrasse

---

## Mercedes A-Klasse Produktion



<https://www.youtube.com/watch?v=VreG1iC65Lc>

# Systemeigenschaften – Traglast (Load capacity)

---

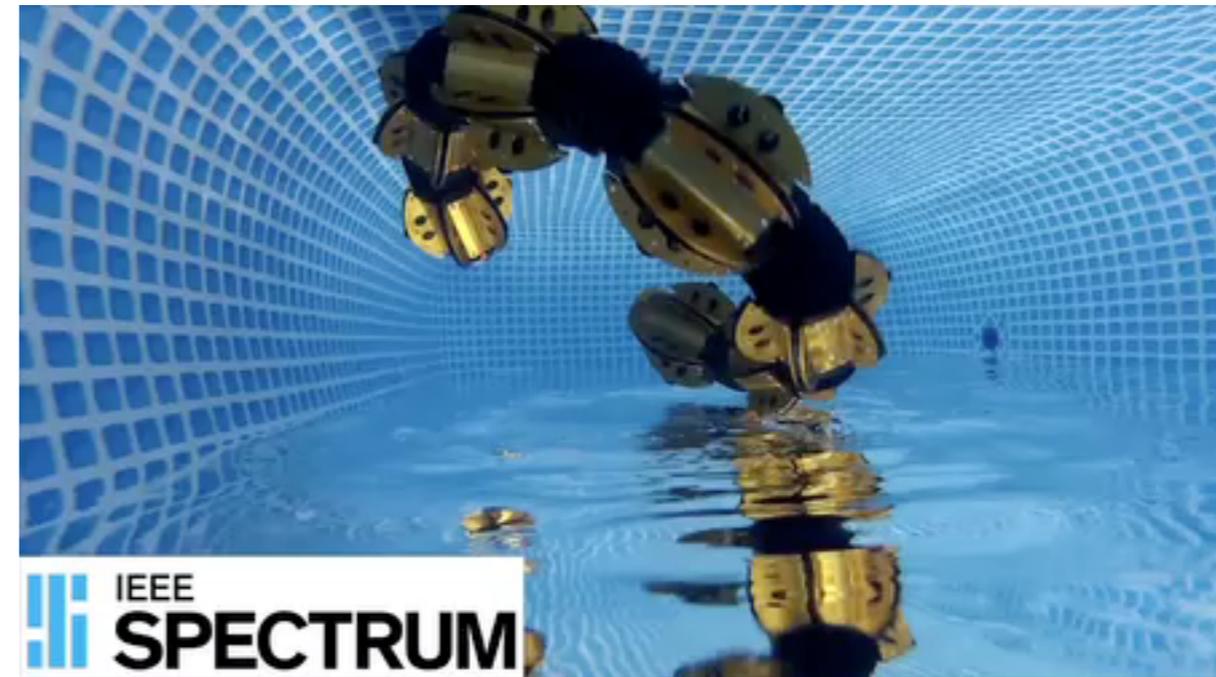
- Hat grossen Einfluss auf die Geschwindigkeit und Beschleunigung
- Dabei geht es nicht immer um maximale Traglast oder Geschwindigkeit
- Beispiele:
  - Pick & Place: Beschleunigung und Steifigkeit
  - Schweißroboter: Langsame, präzise und gleichmäßige Bewegung ohne Zittern.



# Robotertopologien — Serielle vs. Parallele Roboter

---

- Man unterscheidet zwischen seriellen und parallelen Robotern:
  - Serielle Roboter: Kette von Segmenten/Gelenken und einem einzelnen Endeffektor.
  - Paralleler Roboter: Ein Endeffektor wird von zwei oder mehr seriellen Ketten gesteuert
    - Beispiele:
      - Stewart-Plattform
      - Laufmaschinen
      - Roboterhände



<https://www.youtube.com/watch?v=vCrN47cOmHQ>



<https://www.youtube.com/watch?v=cNZPRsrwumQ>

# Inverse Kinematik für die Stewart-Plattform

Vorteil: Kann grosse Lasten tragen

Nachteil: Kleiner Workspace

Parameter:  $q$  - Beinlänge

$p$  — Position der Plattform im globalen KS

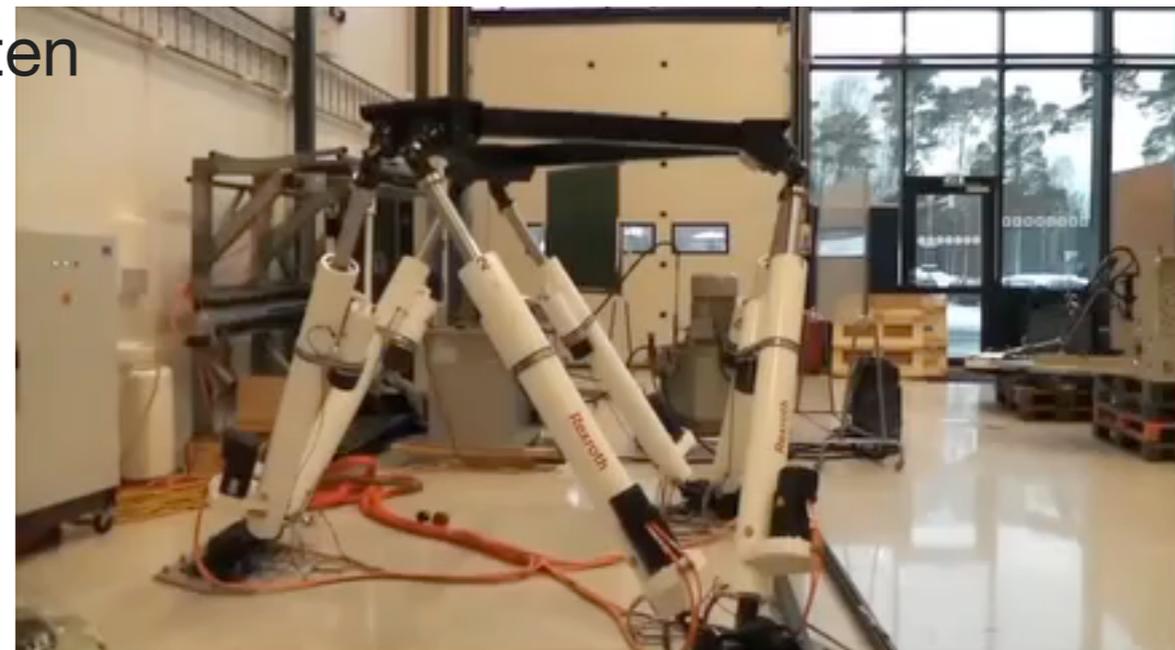
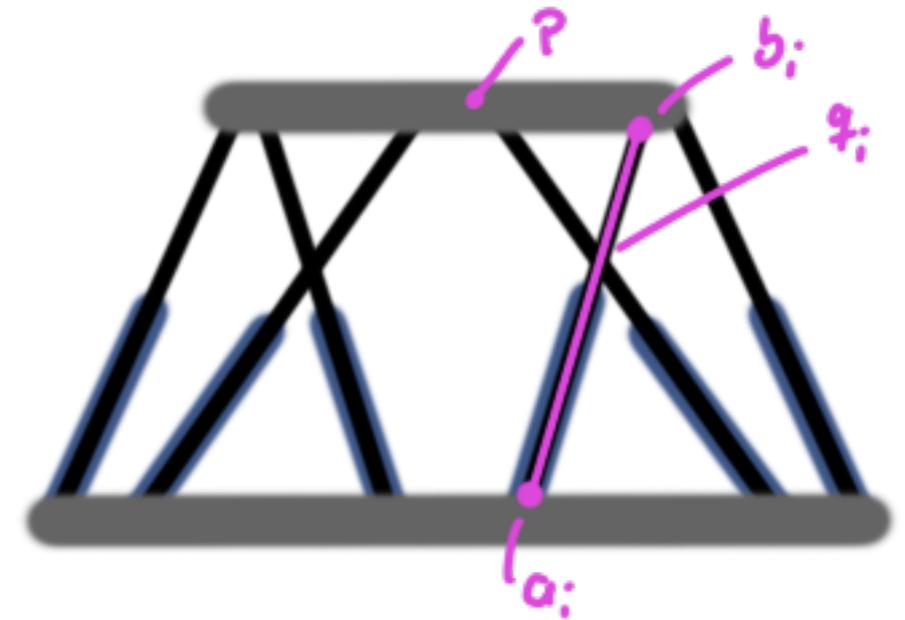
$R$  — Rotationsmatrix der Plattform im globalen KS

$a_i$  — Position des Beins im globalen KS

$b_i$  — Position des Beins in Plattformkoordinaten

$$s_i = p + Rb_i - a_i$$

$$q_i = \sqrt{(s_i^x)^2 + (s_i^y)^2 + (s_i^z)^2}$$



# Gelenkmechanik

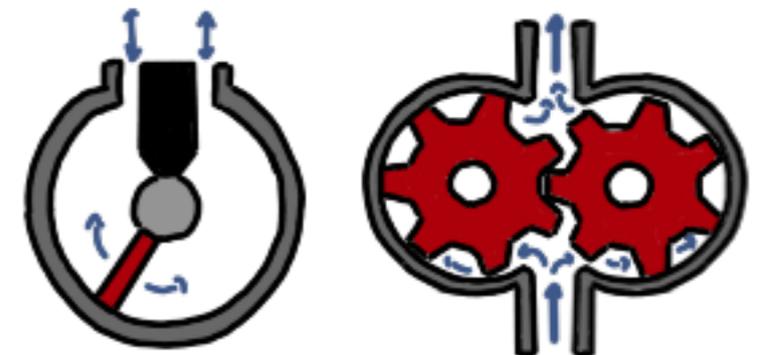
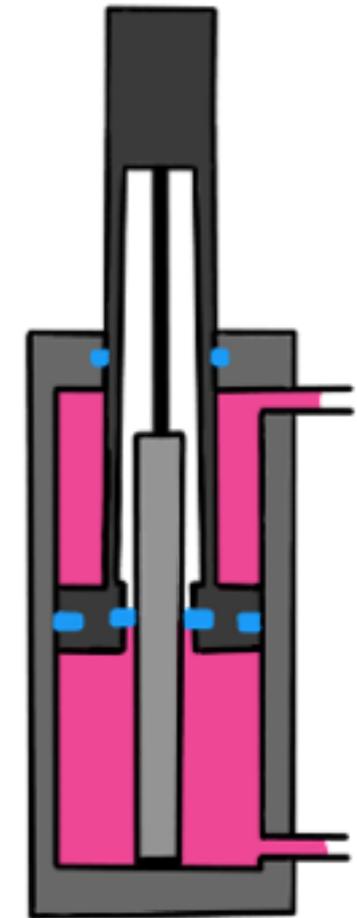
---

- Ein Gelenk besteht aus 4 Hauptkomponenten:
  1. Gelenkachsentyt (rotatorisch & prismatisch)
  2. Aktuator (hydraulisch, pneumatisch, elektrisch)  
Erzeugt die Kraft
  3. Getriebe / Übersetzung  
Übermittelt die Kraft an das Gelenk
  4. Zustandssensorik

# Hydraulische Aktuatoren

---

- Fand vor allem in der Anfangszeit der Robotik Anwendung
- Funktionsweise: Elektromotor pumpt eine Flüssigkeit (Öl) um das Gelenk anzutreiben
- Anwendungen:
  - Linear
  - Schaufel (*Vane*)
  - Motor
- Steuerung:
  - Solenoid Ventil
  - Servoventil
- Vorteil:
  - Hohes Kraft-Gewicht Verhältnis
- Nachteil:
  - Steuerung ist sehr gross und teuer
  - Lecks





<https://www.youtube.com/watch?v=rVlhMGQgDkY>

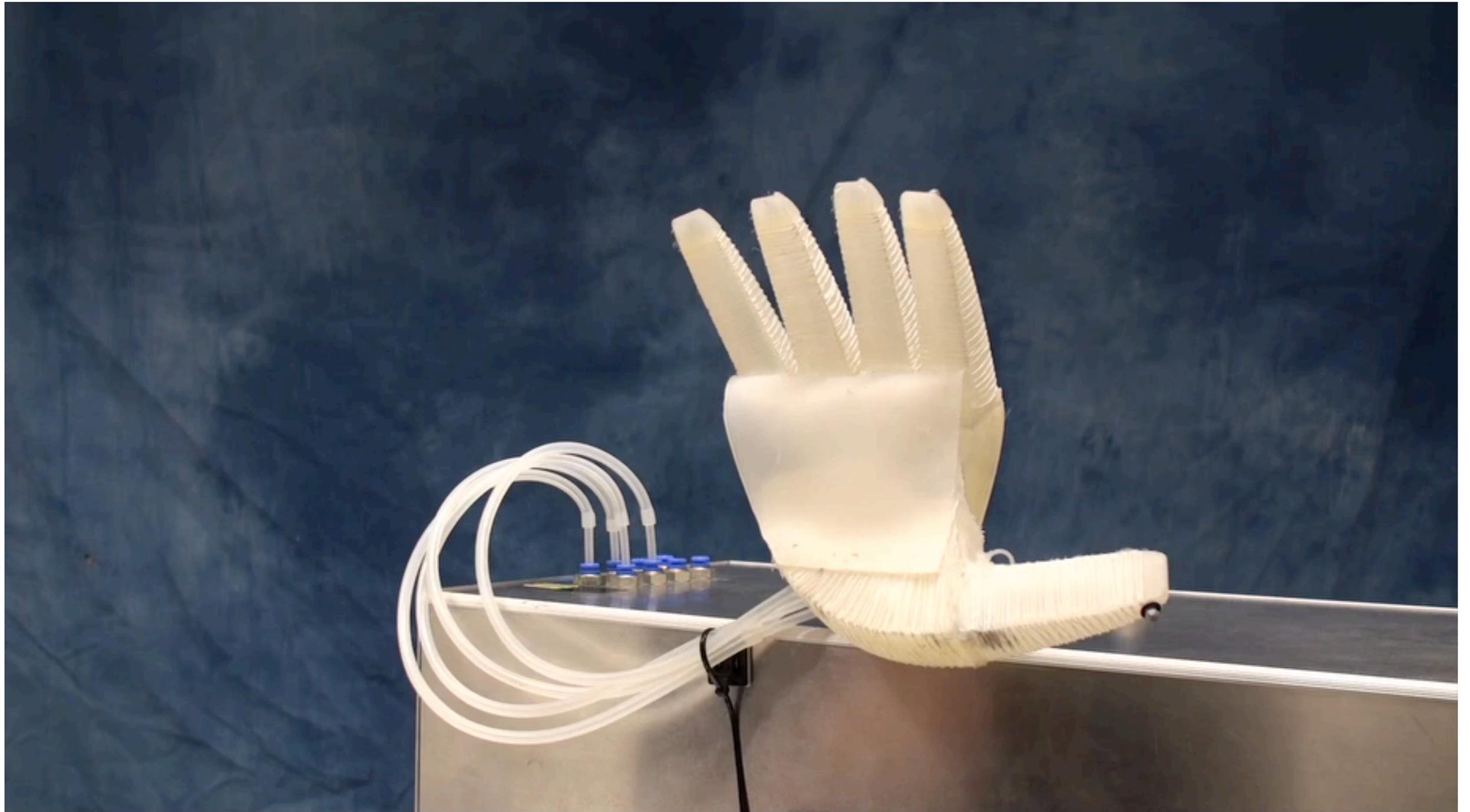
# Pneumatische Aktuatoren

---

- Funktionsweise: Über einen Kompressor wird Luftdruck zum Antreiben des Gelenks erzeugt
- Anwendungen: Wird vor allem in einfachen Manipulatoren eingesetzt
- Vorteile:
  - Billig
  - Einfach zu steuern
  - Compliant (Anpassungsfähig)
  - Robust
- Nachteile:
  - Unkontrollierte Bewegung zwischen den Endpunkten
  - Benötigt in der Regel spezielle Kompressionen (energieineffizient, teuer)
- Erste Anwendungen mit proportionale Kontrolle

# Beispiel für einen hydraulischen Aktuator

---



Oliver Brock  
Raphael Deimel  
TU Berlin

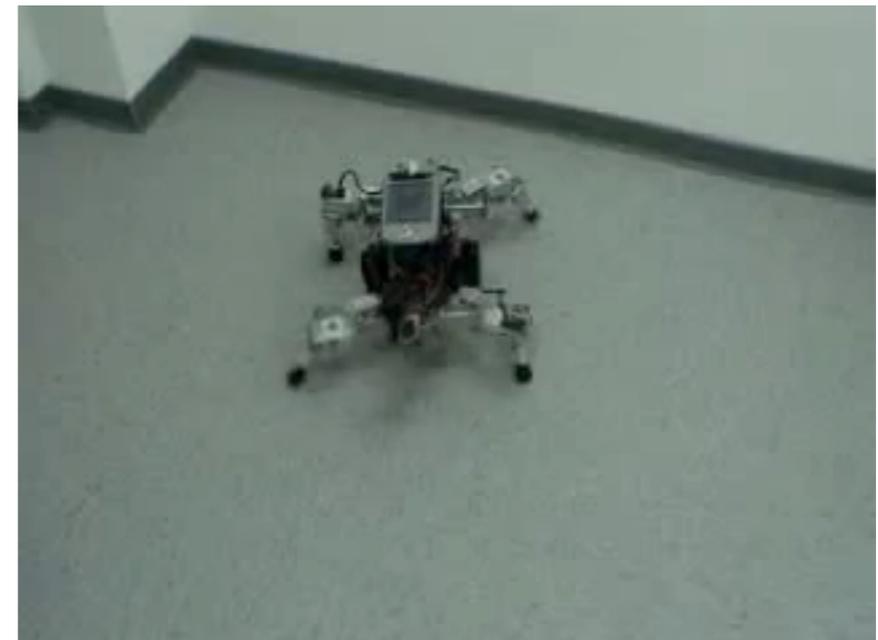
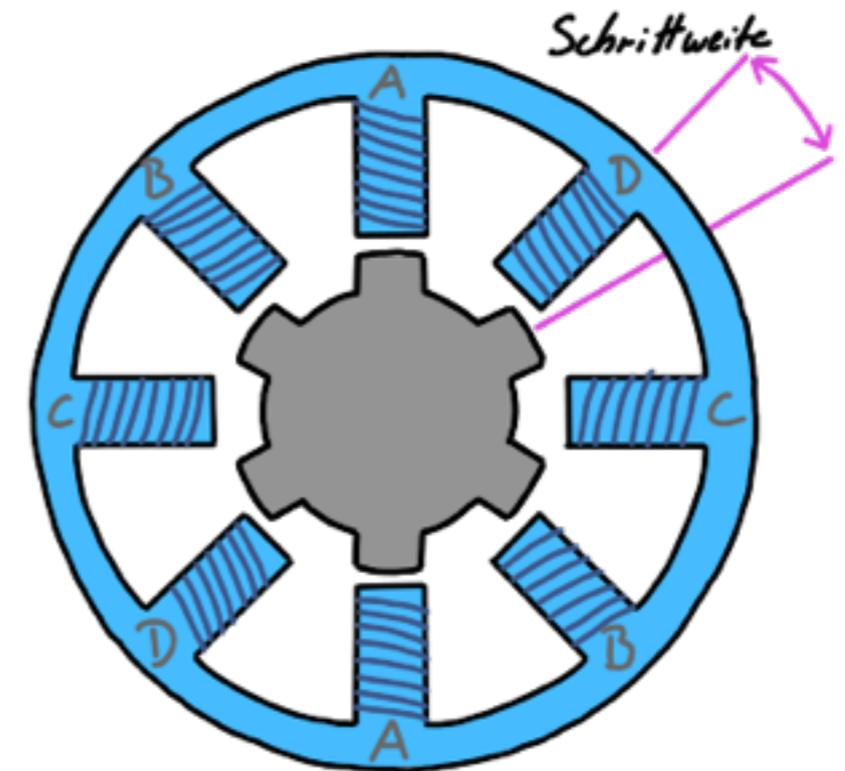
# Elektromagnetische Motoren

---

- Die am häufigsten verwendeten Motoren in der Robotik
- Es werden hauptsächlich 3 Arten verwendet:
  1. Schrittmotoren  
(*stepper motors*)
  2. Gleichstrom Permanentmagnetmotoren  
(*permanent-magnet DC motors*)
  3. Bürstenlose Motoren  
(*brushless motors*)

# Schrittmotoren (*stepper motors*)

- Billig und sehr einfach zu integrieren, d.h. die Verknüpfung mit elektrischen Schaltkreisen ist sehr einfach
- Sehr präzise: Microstep Motoren können bis zu 10.000 unterschiedliche Positionen anfahren
- Open-Loop, d.h. bei einem Neustart muß erst eine Referenzfahrt (Nullposition) durchgeführt werden
- Keine Sensorik

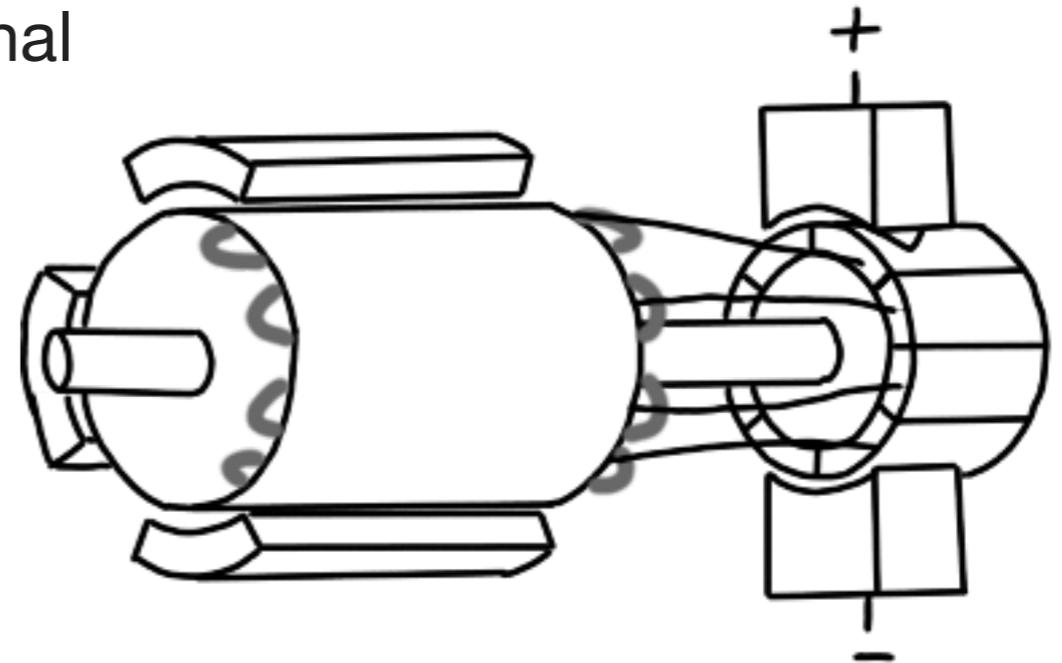


# Gleichstrom Permanentmagnet Motoren

*(permanent-magnet DC motors)*

---

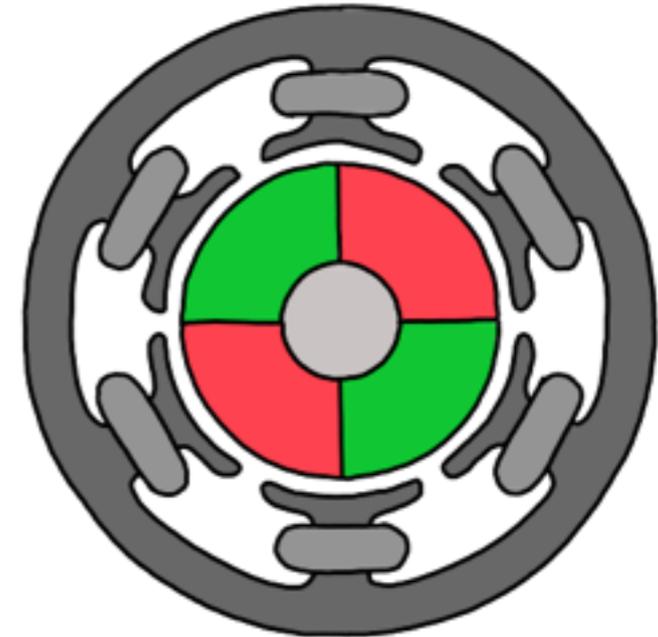
- Die Rotationsgeschwindigkeit ist proportional zur angelegten Spannung
- Vorteile:
  - Geringe Reibung
  - Geringes Rastmoment
  - Sanfte Rotation mit wenig Drehmomentwelligkeit
- Nachteile:
  - Geringe thermische Belastbarkeit (oft externe Kühlung notwendig)
  - Es können sich Funken bilden
  - Verschleiss



# Bürstenlose Motoren

---

- Sehr verbreitet In der industriellen Robotik
- Haben nicht die Nachteile der Permanentmagnetmotoren
- Die Kontrolle ist deutlich komplexer und die Motoren auch deutlich teurer



# Zusammenfassung Aktuatoren

---

## Hydraulisch:

### *Vorteile:*

- Hohes Gewicht-Leistung Verhältnis
- Position kann leicht gehalten werden
- Selbstschmierend / -kühlend
- Sicher (brennbare, explosive Umgebungen)
- Sanfte Bewegungen bei geringer Geschwindigkeiten

### *Nachteile:*

- Teuer
- Dichtungen
- Rückführungsleitung
- Hoher Energieaufwand

## Pneumatisch:

### *Vorteile*

- Günstig
- Schnell
- Keine Verschmutzungen (Flüssigkeiten)
- Keine Rückführungsleitung notwendig
- Stoppen ohne Schaden

### *Nachteile:*

- Laut
- Abgase
- Evt. Filter nötig
- Geschwindigkeitskontrolle ist schwierig

## Elektrisch:

### *Vorteile:*

- Schnell und präzise
- Relativ günstig
- Schnelle Entwicklungszyklen für Weiterentwicklungen
- Hohe Kraftentwicklung
- Geringes Gewicht
- Kurze Reaktionszeiten

### *Nachteile:*

- Getriebe notwendig
- Getriebespiel limitiert die Genauigkeit
- Überhitzung bei Hindernissen (Stoppen)

# Übersetzungen / Getriebe (*transmission*)

---

- Aufgabe: Kraftübermittlung von der Quelle (Motor) zum Ziel (Gelenk)
- Beispiele:
  - Bei wenig Beschleunigung ( $< 0.5g$ ) kann man den Aktuator im Gelenk anbringen, da Trägheit keine Rolle spielt (Direktantrieb)
  - Bei hohen Beschleunigungen (3-10g) müsse alle Motoren in der Nähe des ersten Gelenks angebracht werden. Transmissions können dann aber die Steifigkeit des Systems reduzieren
- Auswahlkriterien:
  - Welche Bewegung soll erzeugt werden (linear, rotatorisch, Radantrieb)?
  - Welche Last muss bewegt werden?
  - Wo befindet sich der Motor und wo befindet sich das Gelenk?
- Die wichtigsten Punkte sind: Steifigkeit, Effizienz und Kosten

# Direktantrieb (direct drives)

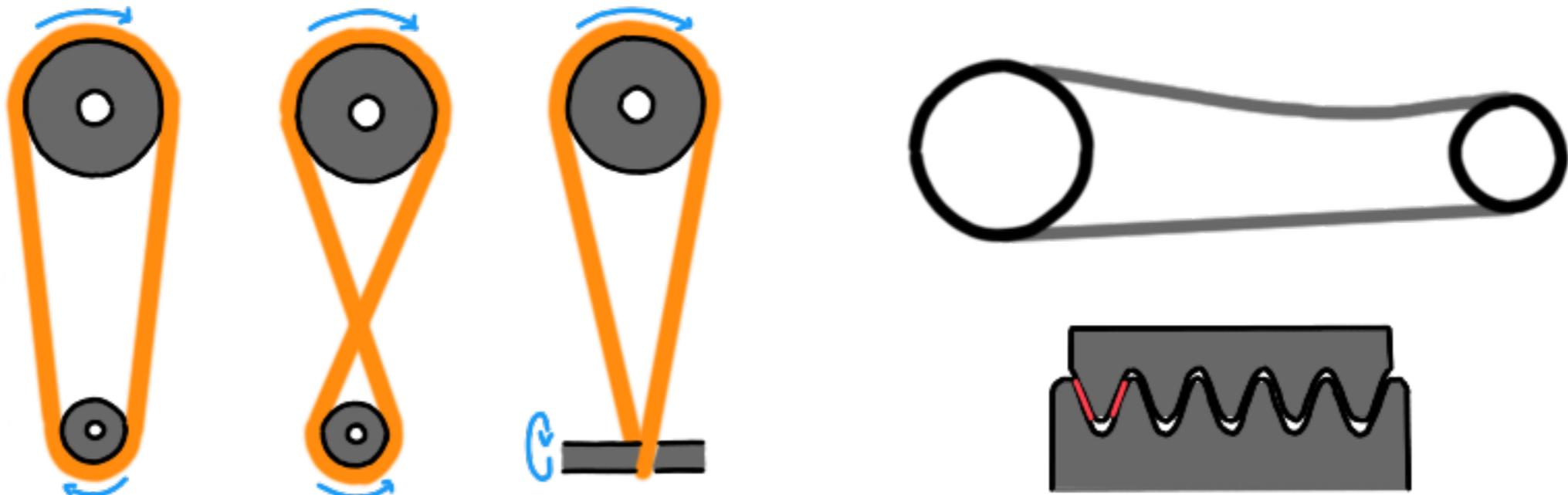
---

- Einfach zu realisieren
- Direkte Verbindung zwischen Antrieb und Gelenk
- Vorteile:
  - Kein Gelenkspiel
  - Gute Drehmomentübertragung
  - Kompakte Bauweise
  - Getriebe und Getriebekosten entfallen
- Nachteile:
  - Trägheit spielt eine grosse Rolle
  - Benötigen robuste Lager um z.B. Unwuchten auszuhalten
  - D.h. man muß oft große, energieineffiziente Motoren verwenden

# Belt drives (Antriebsriemen)

---

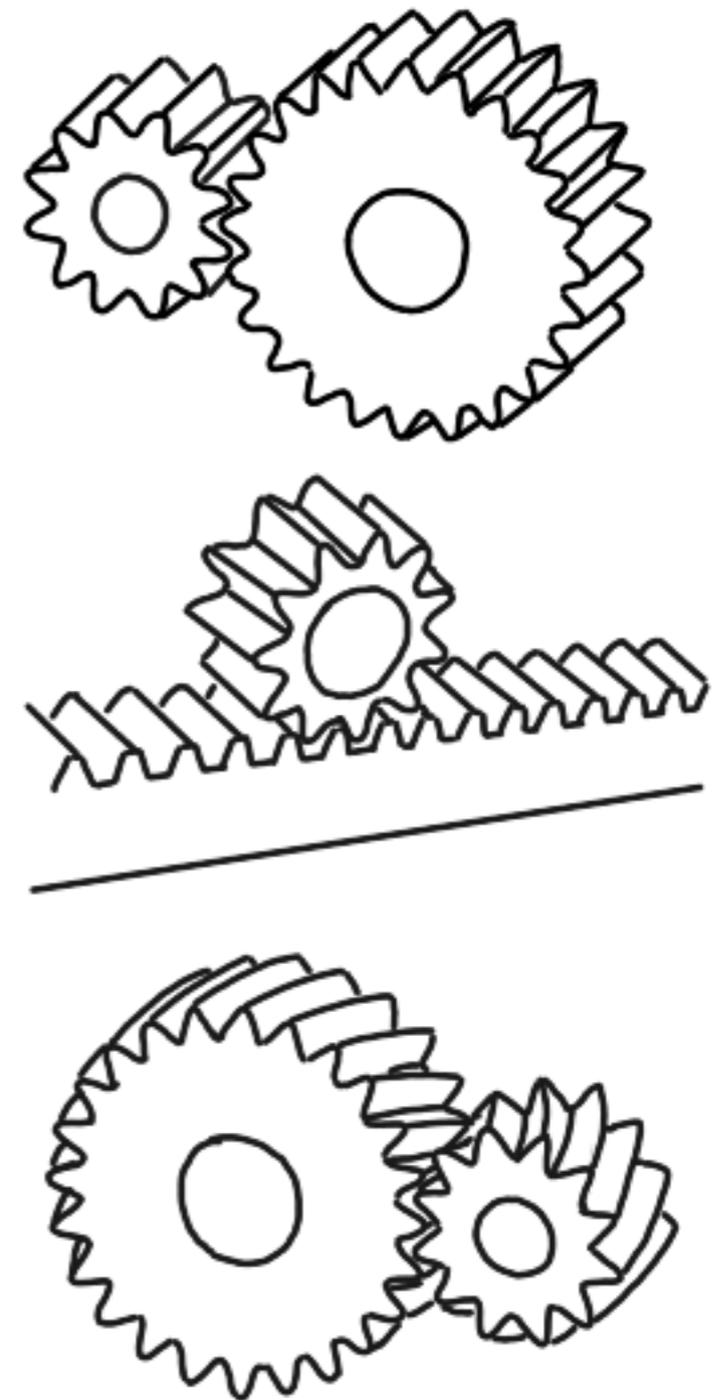
- Dünner, legierter Stahl oder Titanband verbindet Motor und Gelenk
- Die Masse des Motors kann so vom Gelenk entfernt werden um die Trägheit zu reduzieren
- Die Masse und Elastizität des Riemens kann zur Instabilität führen



# Getriebe (gear drive)

---

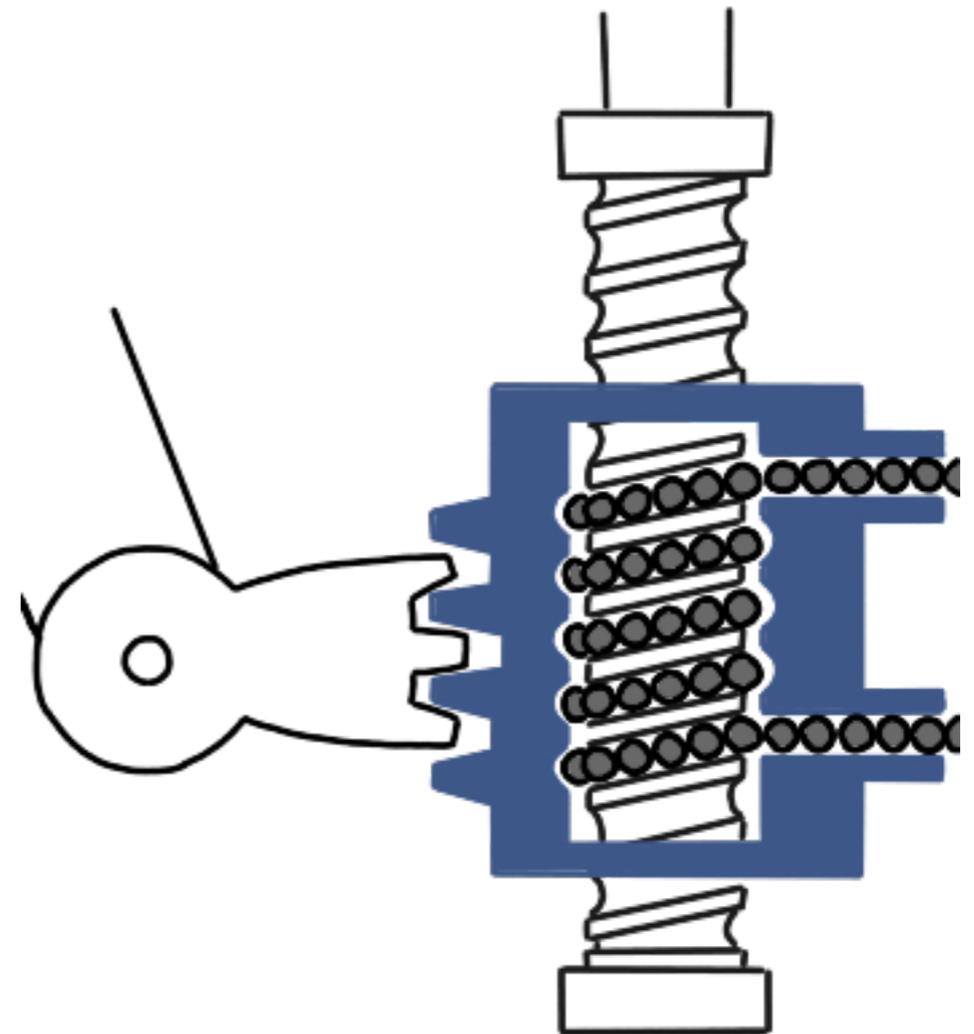
- Stirnradgetriebe (*spur gear drive*) und Schrägstirnradgetriebe (*helical gear drive*) bieten eine
  - zuverlässige
  - versiegelte
  - wartungsarmeÜbertragung der Kraft
- Erlaubt die Trennung von Motor und Gelenk mit langen Antriebswellen (z.B. Auto)
- Oft in der Basis eines Roboters verbaut (z.B. Puma), weil dort grosse Kräfte herrschen und eine hohe Steifigkeit benötigt wird



# Schneckenengwinde (*ball screws*)

---

- Effektive und glatte Übersetzung von rotatorischer in lineare Bewegung
- Hohe Präzision möglich
- Steifigkeit ist gut für kurze und mittlere Entfernungen
- Bei langen Entfernungen ist die Steifigkeit ein Problem, da die Schraube nur an den Endpunkten gestützt wird.
- Durchhängen / -biegen ist dann möglich

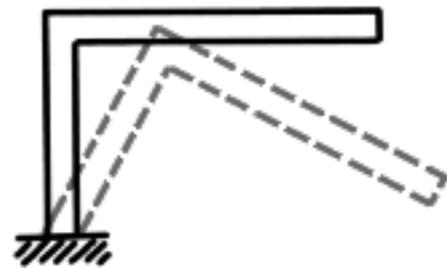


# Potentielle Schwachpunkte beim mechanischen Design

---

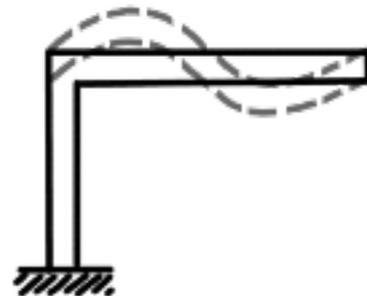
## Permanente Deformation

Steifigkeit erhöhen  
Gewicht reduzieren  
Gegengewichte



## Dynamische Deformation

Steifigkeit erhöhen  
Gewicht reduzieren  
Gewichtsverteilung



## Rückschlag (backlash)

Steifigkeit der Übertragungselemente erhöhen  
Bessere Getriebe



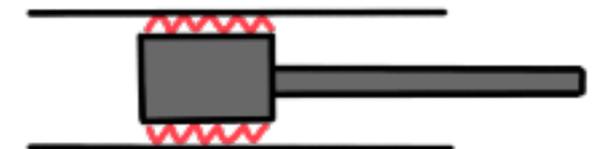
## Lagerspiel (*bearing clearance*)

Vorgespannte Lagerungen



## Reibung

Lagerspiel erhöhen  
Schmierung verbessern



## Thermische Effekte

Isolierung verbessern

