

Grundlagen der Robotik

3. Aktuatoren, Gelenke

Prof. Sven Behnke



Letzte Vorlesung

- Abstandssensoren
 - Ultraschall
 - IR-Triangulation
 - Laser-Scanner
 - Time-of-Flight-Kameras
 - Stereo-Kameras
 - Primesense
 - Radar
- Kameras
 - RGB, Thermal, ...
- Encoder
 - Inkrementell
 - Absolut
- Inertialsensoren (IMUs)
 - Beschleunigungen
 - Drehraten
 - Magnetfelder
- Oberflächensensoren
- Chemische Sensoren



Aktuatoren

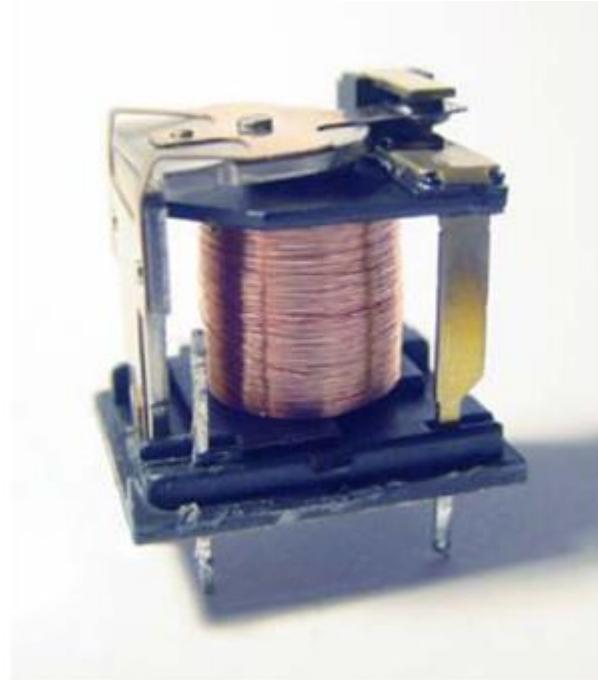
- Bewegen Teile des Roboters
- Benötigen Energiequelle
 - Elektrisch
 - Pneumatisch
 - Hydraulisch
 - Chemisch
- Müssen angesteuert werden
 - Motortreiber
 - Ventile
- Benötigen häufig Feedback für Regelung über Sensoren
- Haben unterschiedliche Charakteristika
 - Effizienz
 - Größe, Gewicht
 - Kraft, Drehmoment
 - Geschwindigkeit
 - ...



[<http://eap.jpl.nasa.gov>]

Elektromagnetische Aktuatoren

- Bewegung durch magnetische Felder
- Mittlere Kräfte und Wege



Relais



Elektromotor

Elektromagnetische Aktuatoren



Lautsprecher
(Schwingspule)



Vibrations-
aktuator

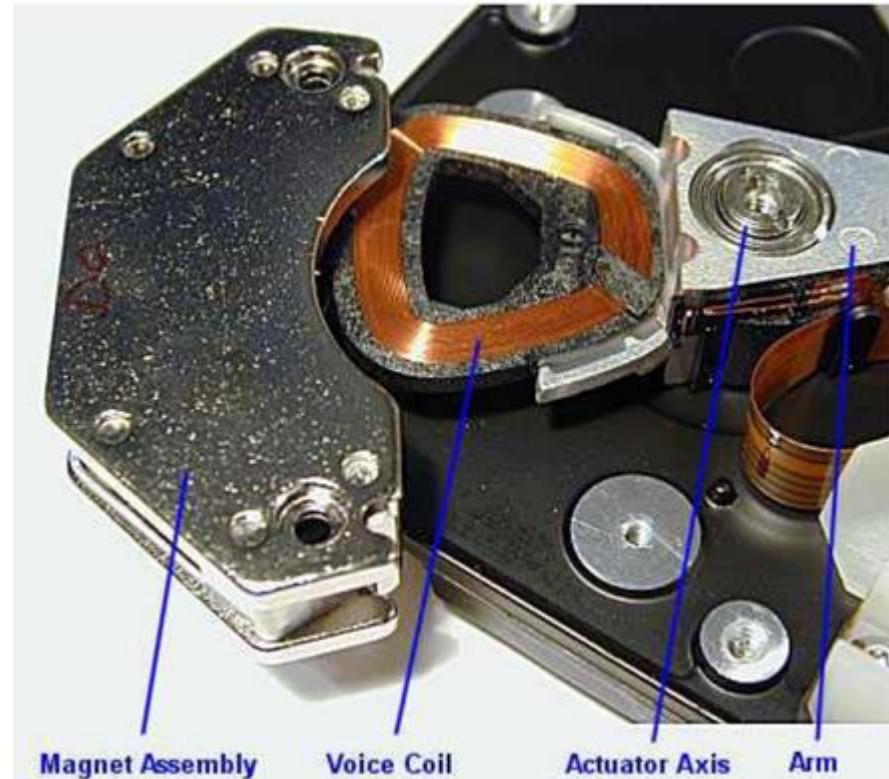


Türverriegelung

Elektromagnetische Aktuatoren



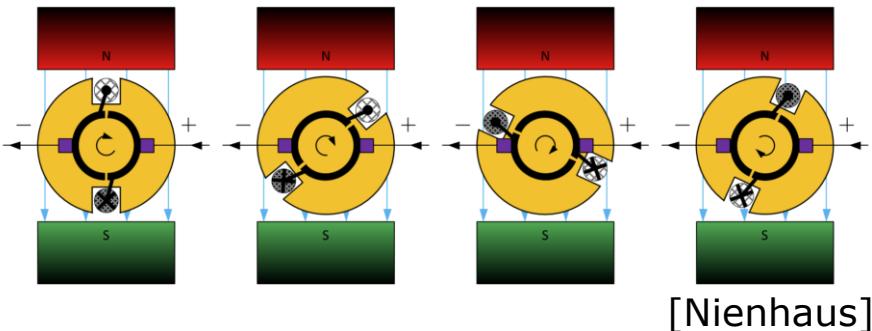
Magnetventil



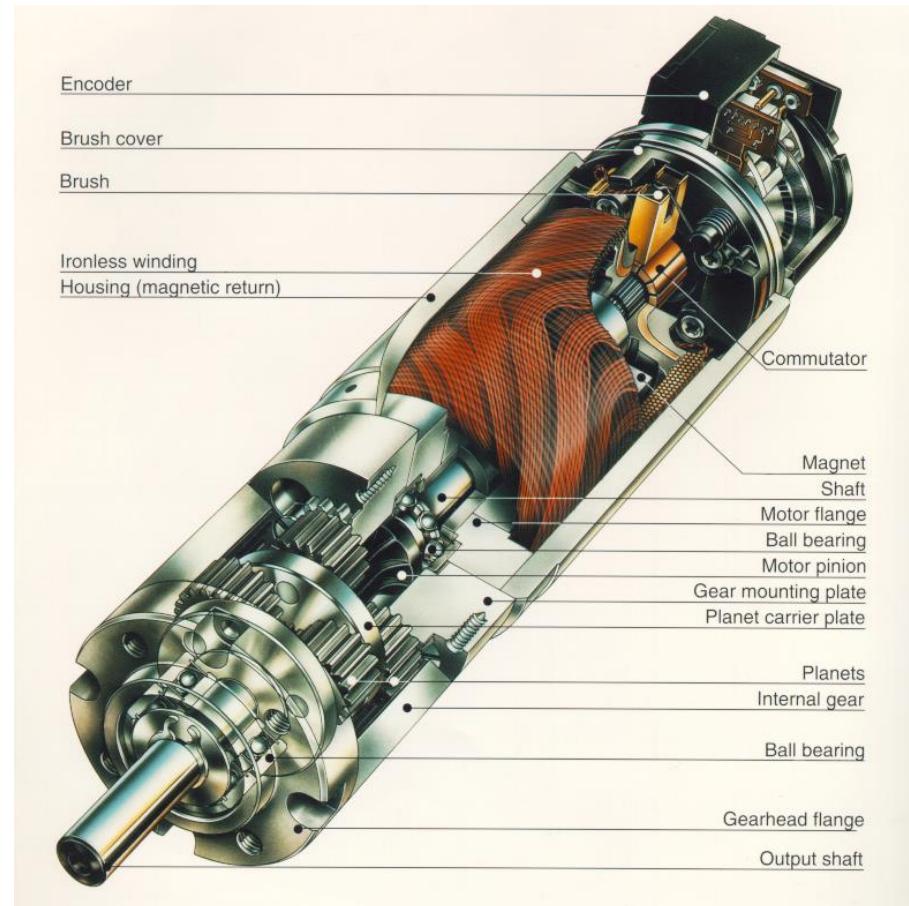
Festplatte

Gleichstrom (DC)-Motoren

- Kommutation durch Schleifkontakte



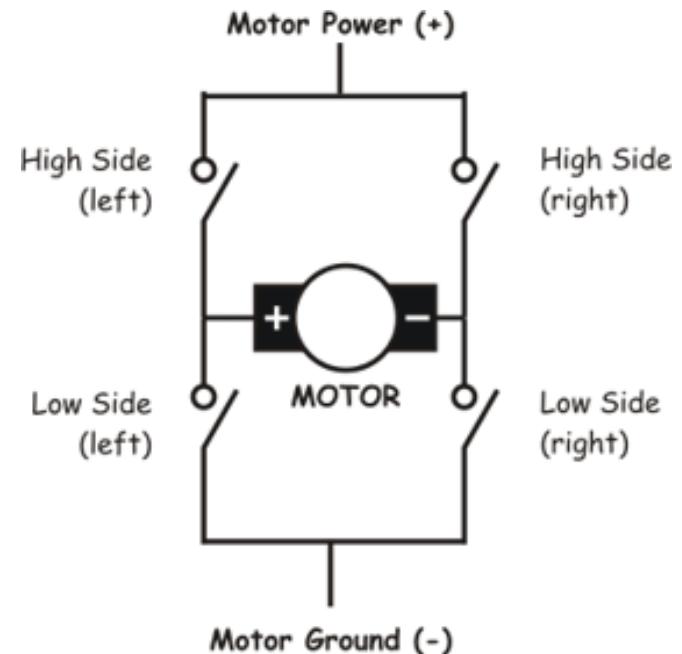
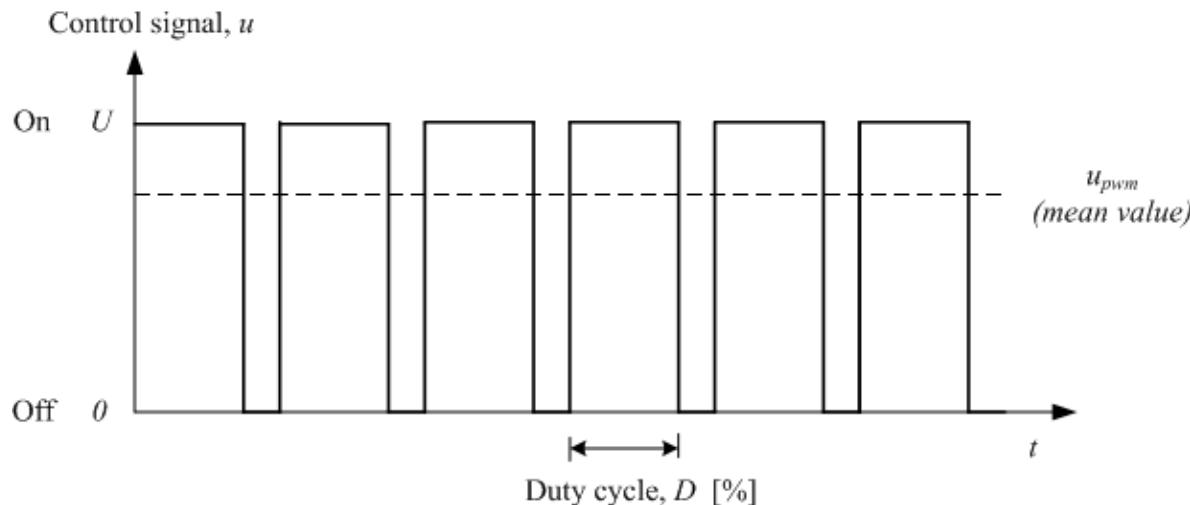
- Einfach, preiswert
- Leicht anzusteuern
- 1W - 1kW
- Kurzfristige Überlastung möglich
- Abnutzung der Bürsten
- Verlustleistung muss abgeführt werden



[Faulhaber]

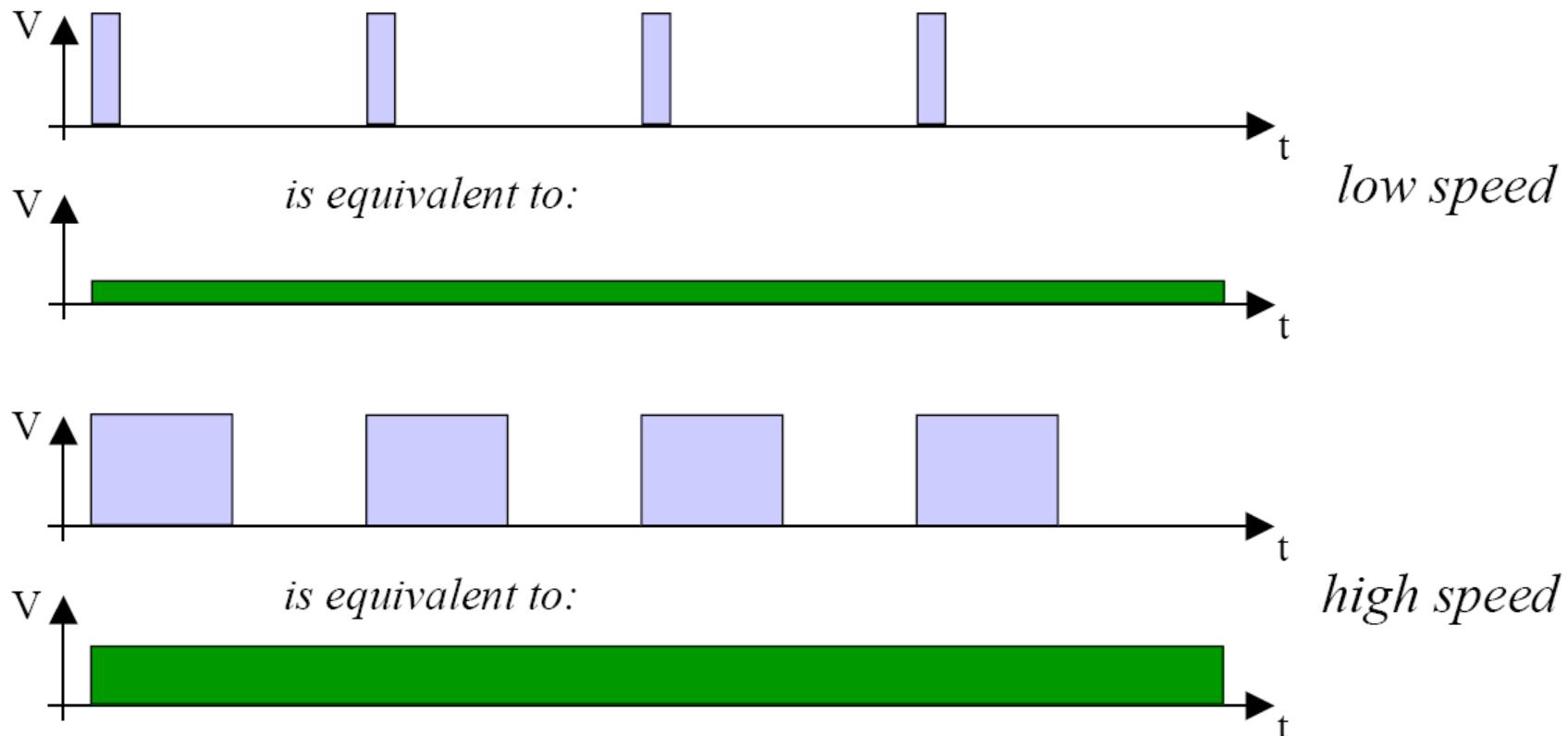
Ansteuerung von DC-Motoren

- Controller + H-Brücke
- Effizient, kleine Bauelemente
- PWM-Ansteuerung



Puls-Weiten-Modulation (PWM)

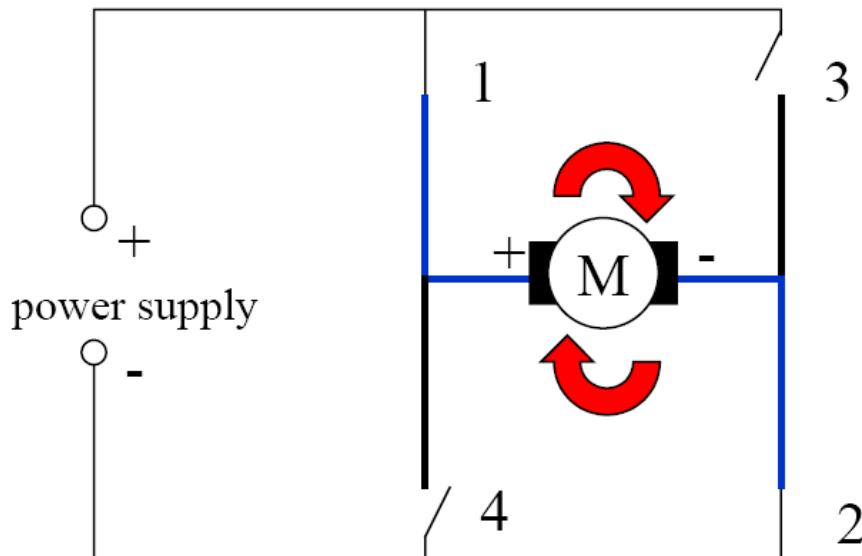
- Änderung der Spannung nicht energieeffizient
=> An- und Ausschalten mit hoher Frequenz (z.B. 20kHz)



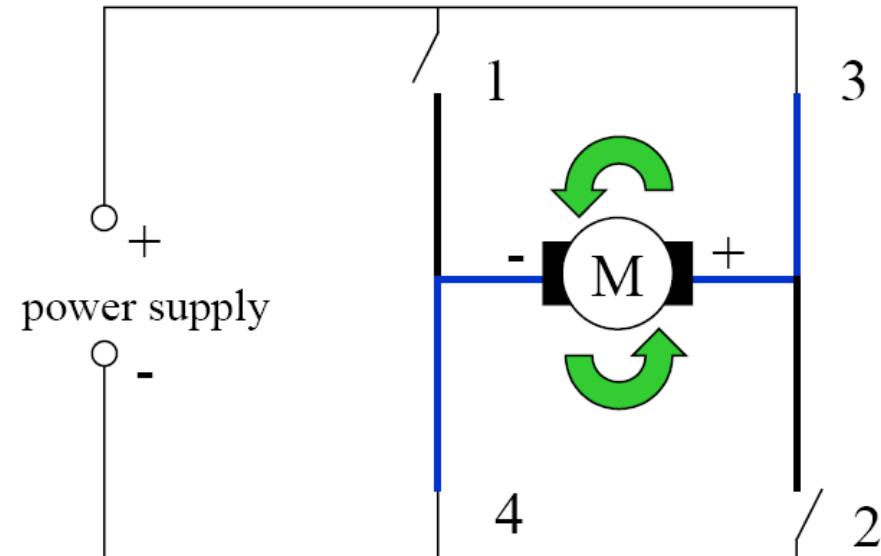
H-Brücke

- Erlaubt Änderung der Drehrichtung

Drive forward:

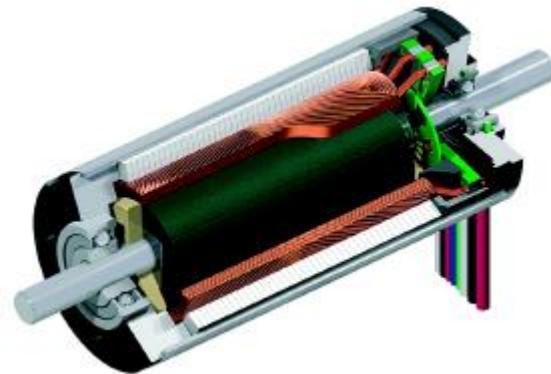


Drive backward:



Bürstenlose DC-Motoren

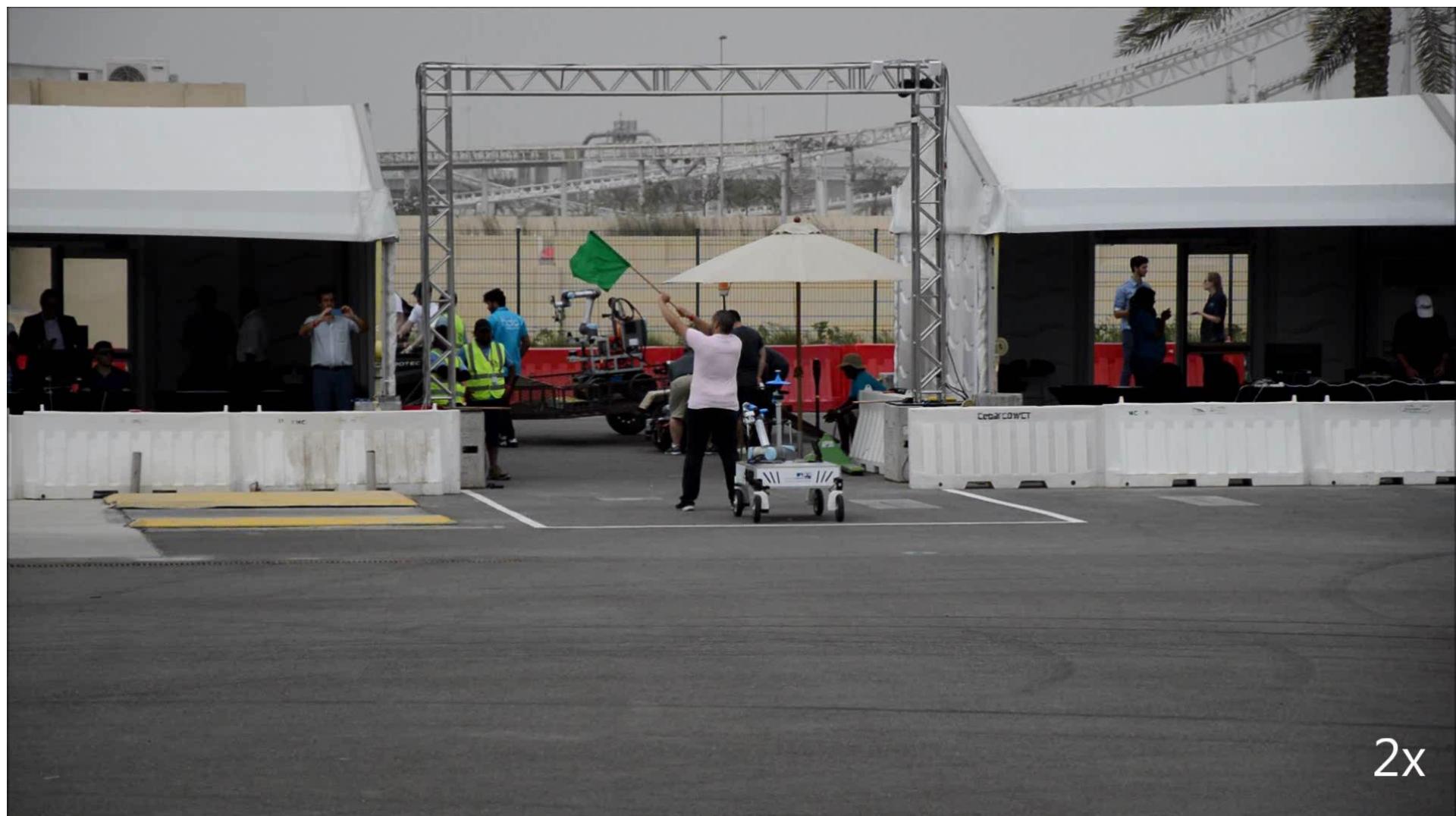
- Keine Bürsten
 - > Keine Abnutzung
 - > Hohe Drehzahlen
- Windungen außen
 - > bessere Kühlung
- Viel Leistung pro Gewichtseinheit
- Einfache Mechanik
- Benötigt Winkel- und Geschwindigkeitssensoren
- Kompliziertere Ansteuerung
- Kleine bis mittlere Leistung (10W – 50kW)



Beispiel: Mario-Räder

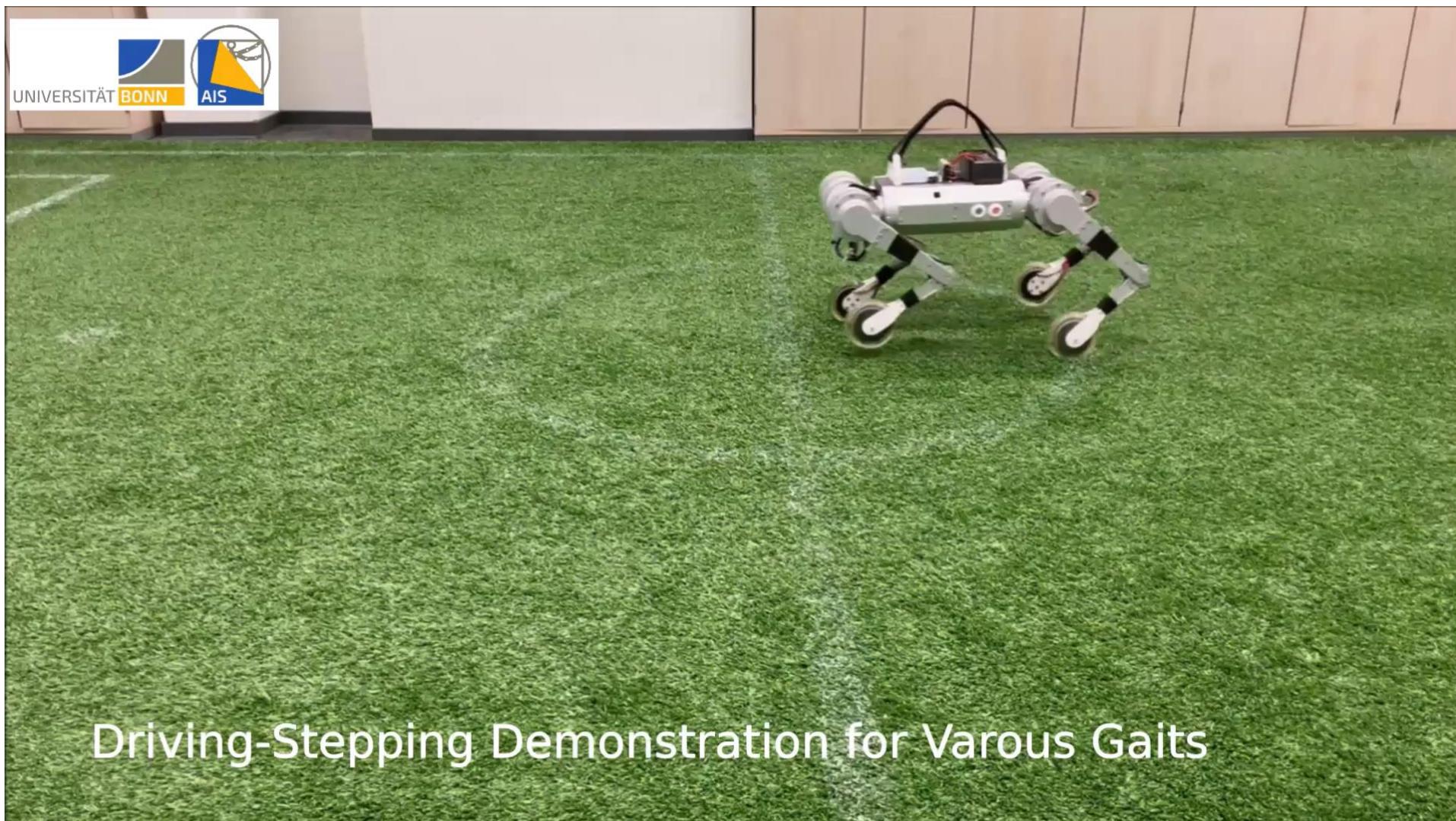


MBZIRC Challenge 2



2x

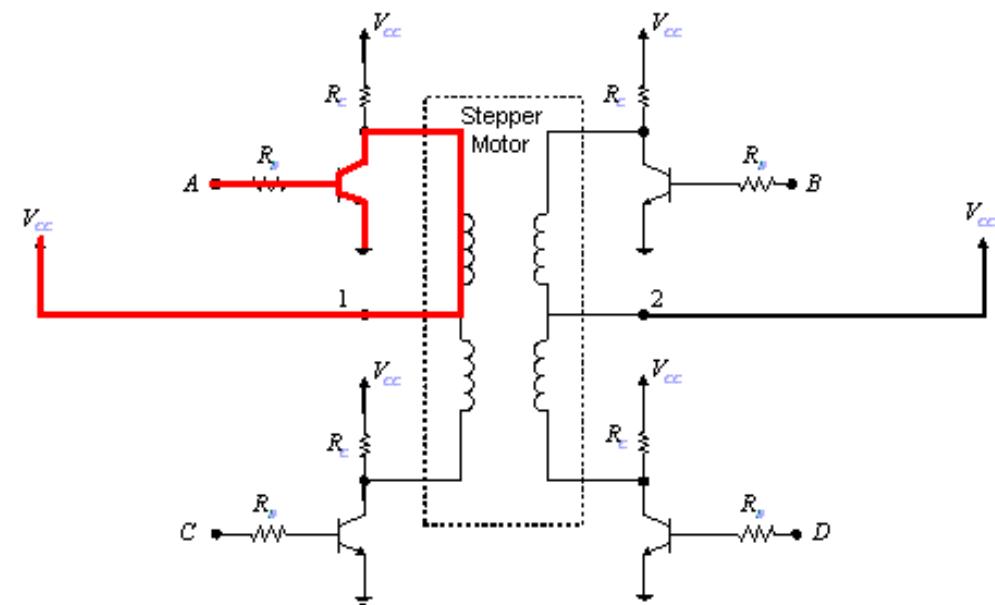
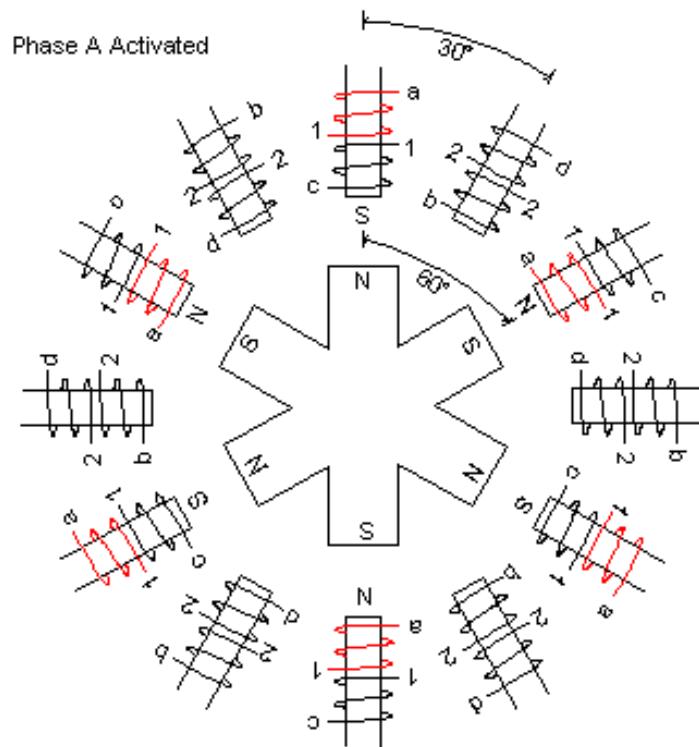
Beispiel: Mini Cheetah-Räder



Driving-Stepping Demonstration for Various Gaits

Schrittmotoren

- Inkrementelle Ansteuerung durch einzelne Schritte, vorwärts oder rückwärts
- Winkelsteuerung, langsam
- Häufig ohne Sensorik



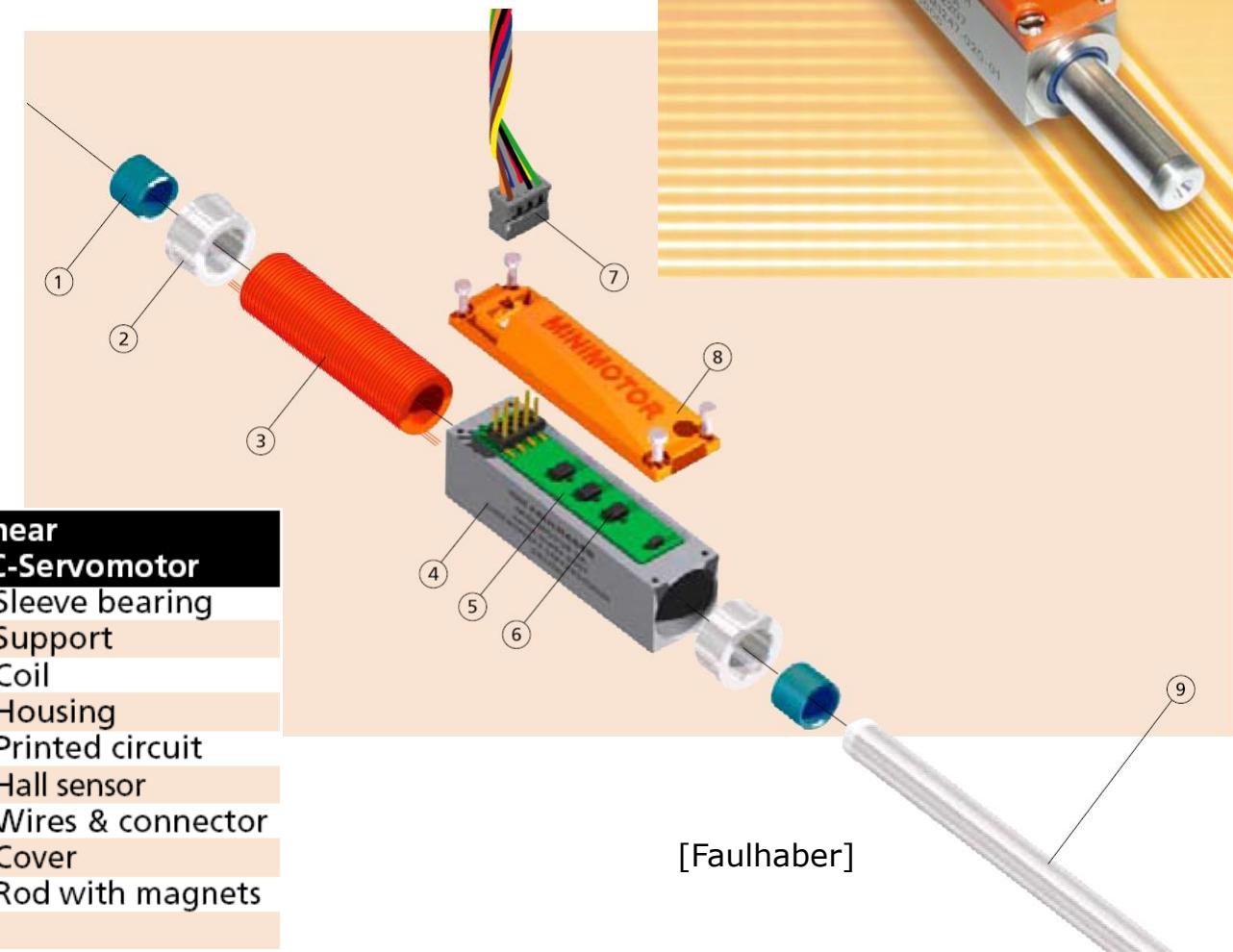
Beispiel: igus robolink

- Relativ preiswerter und flexibler Baukasten

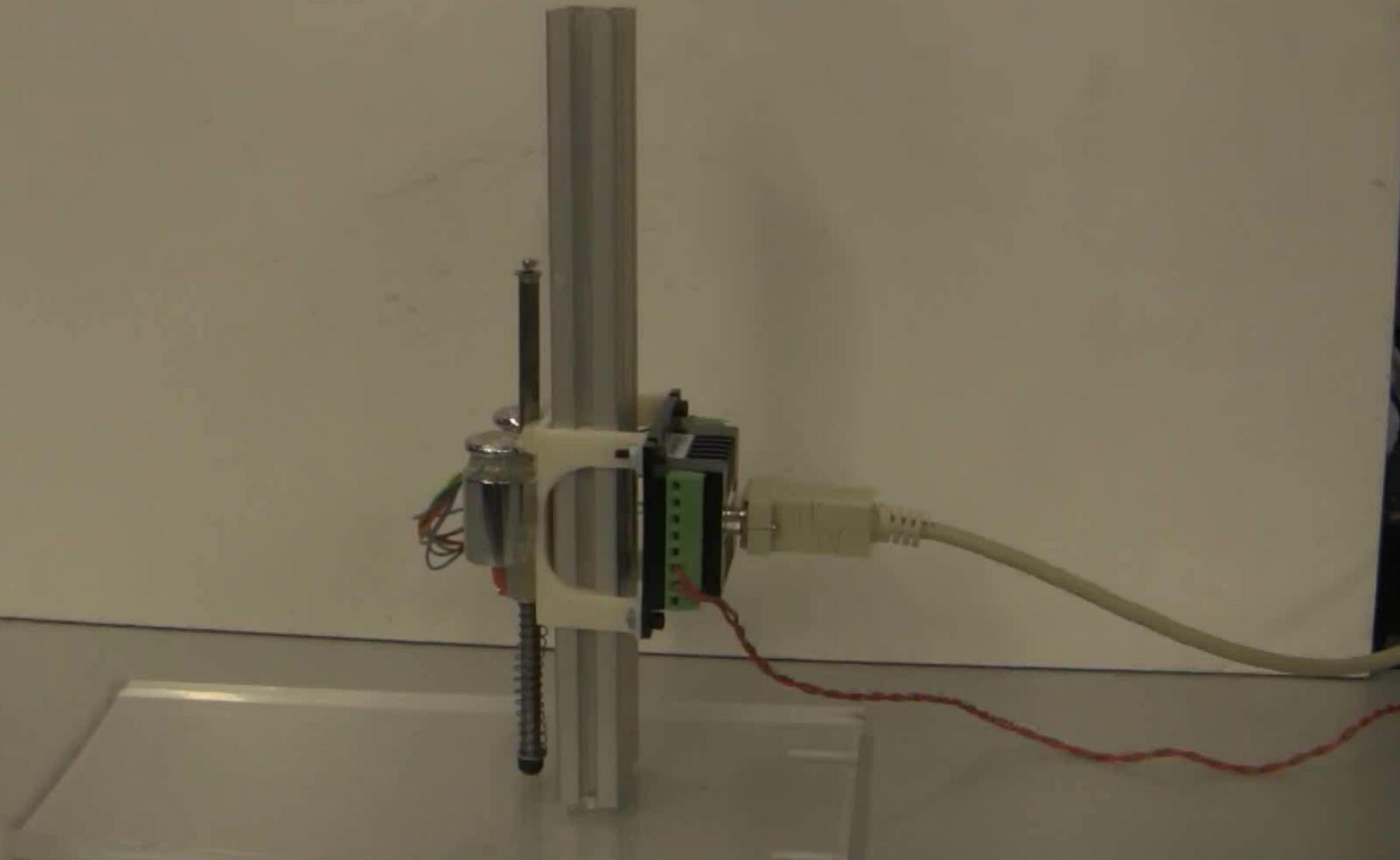


Linearmotoren

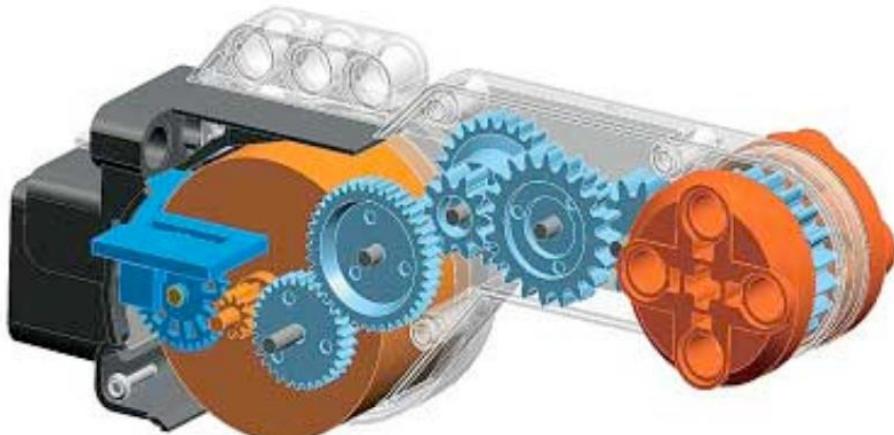
- Elektronische Kommutierung
- Schnell, geringe Kraft
- Hohe Beschleunigung
- Genaue Positionierung
- Viel Leistung pro Gewichtseinheit
- Komplexer Controller nötig



Beispiel: Hüpfender Roboter



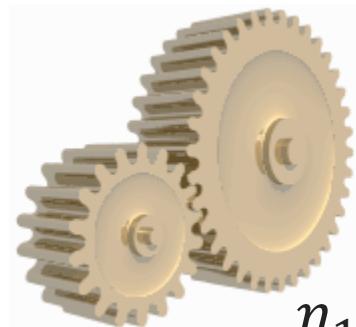
Lego NXT Aktuatoren



- Langsam, hohes Drehmoment
- Inkrementalgeber eingebaut
- Motortreiber, Controller

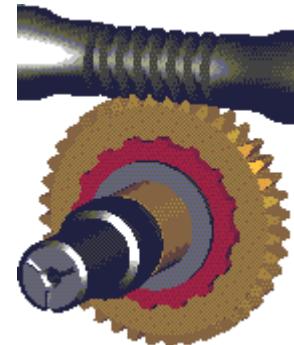
Getriebe

- Elektromotoren sind nur effizient bei schneller Rotation
- Getriebe reduzieren Geschwindigkeit und erhöhen Drehmoment



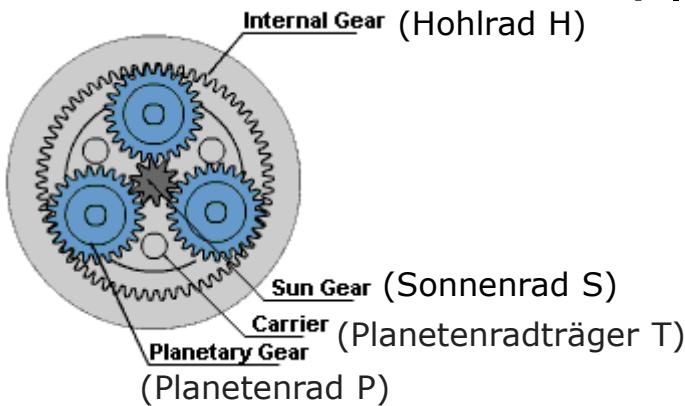
$$n_1 \cdot z_1 = n_2 \cdot z_2$$

Stirnrad



$$n_1 = n_2 \cdot z_2$$

Schneckenrad



Planetengetriebe

- Wills-Gleichung:

$$n_P \cdot z_P = n_T(z_P + z_S) - n_S \cdot z_S$$

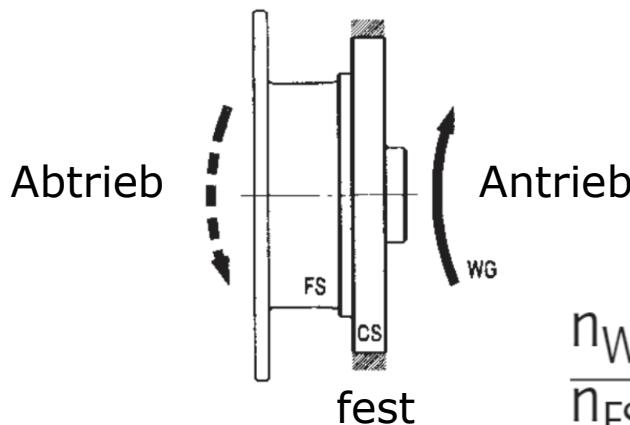
- Planetenradgleichung:

$$n_H \cdot z_H = n_T(z_H + z_S) - n_S \cdot z_S$$

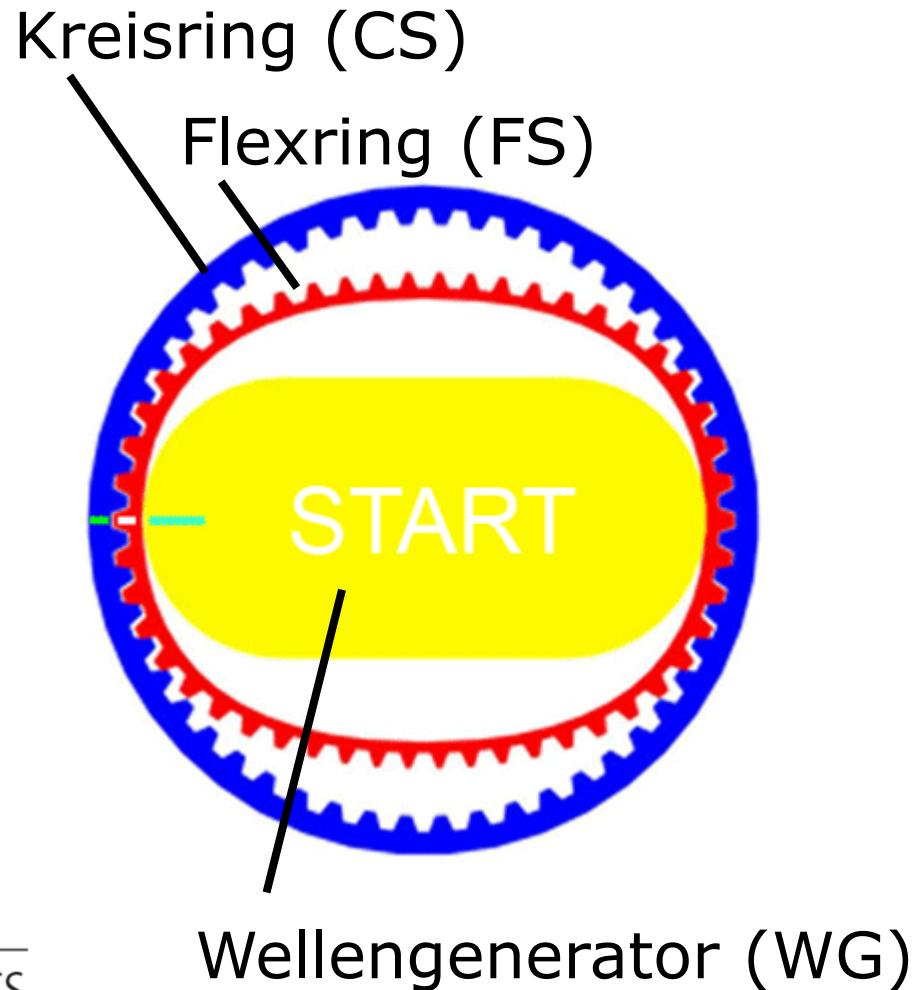
n-Drehzahlen, z-Zähnezahlen

Harmonik-Drive-Getriebe (Wellgetriebe)

- Spielfrei
- Große Untersetzung in einer Stufe
- Kompakt, leicht
- Hohe Drehmomente
- Koaxialer An- und Abtrieb
- Hohlwellen möglich

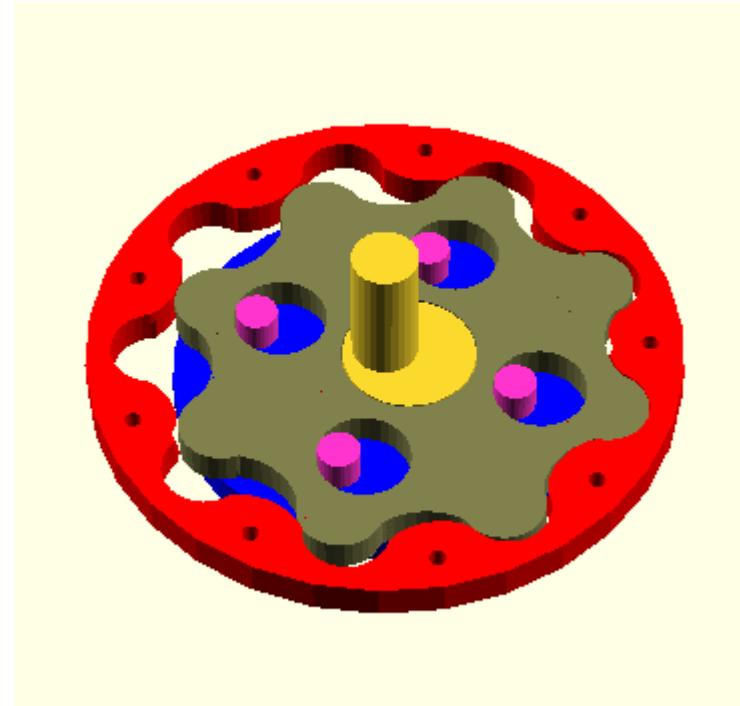


$$\frac{n_{WG}}{n_{FS}} = \frac{z_{FS}}{z_{FS} - z_{CS}}$$



Zykliod-Getriebe

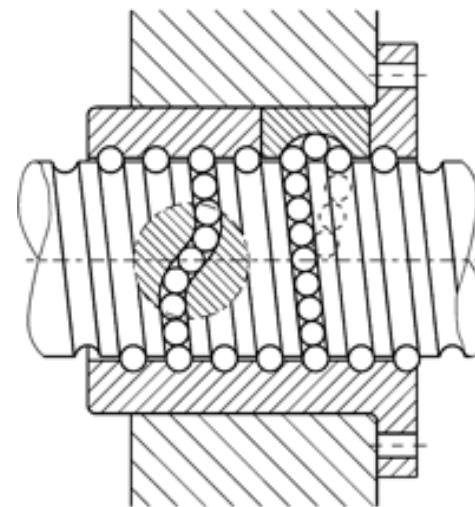
- Exzentrischer Antrieb
- Keine Zähne,
sondern Abrollen
- Hohe Untersetzung in
einer Stufe
- Hohe Drehmomente
- Spielarm



[makezine.com]

Gewindestangen

- Umwandlung von schneller Drehbewegung in langsame Linearbewegung



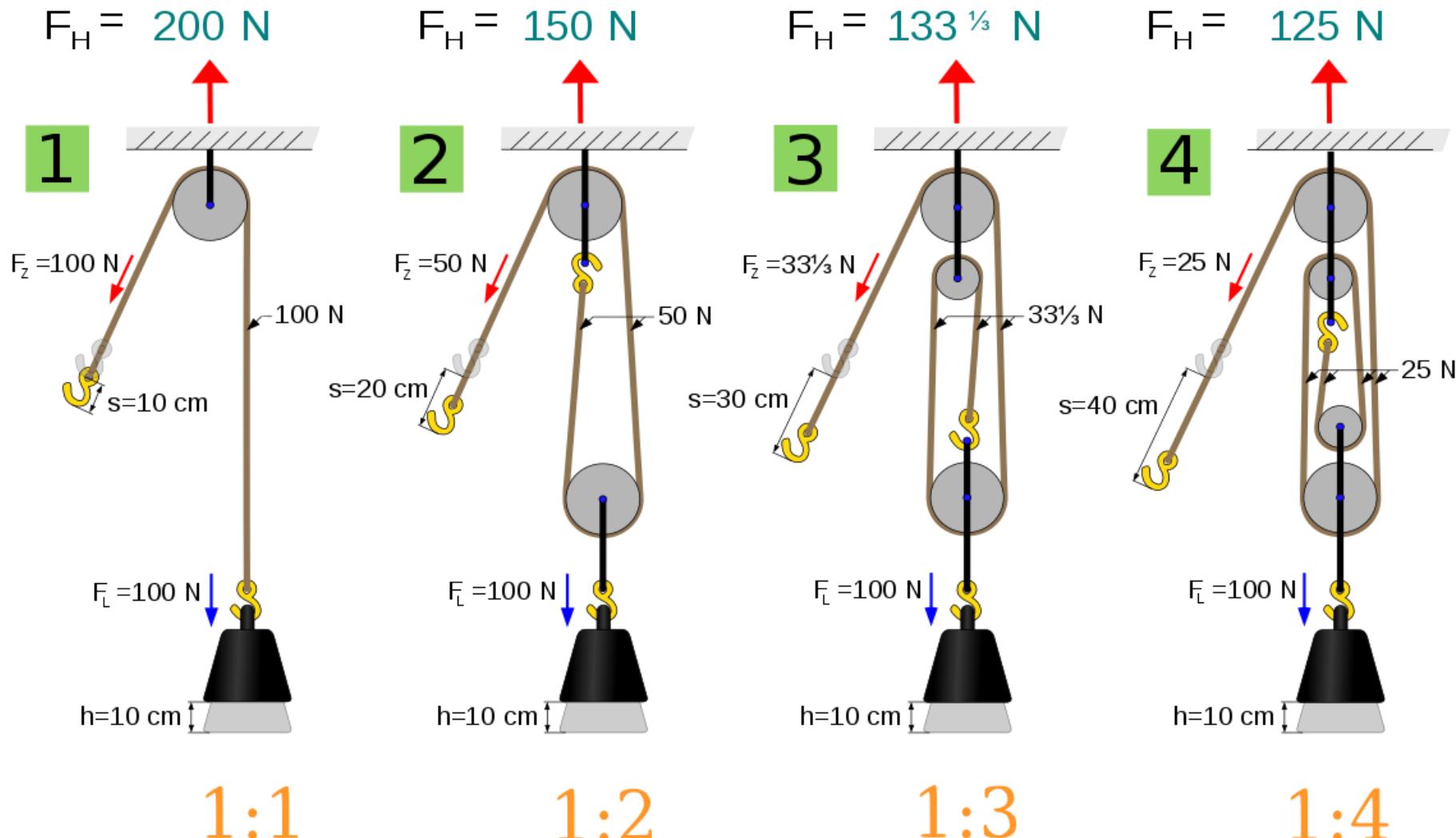
Kugelumlaufspindel

Zahnriemen und Ketten

- Verbinden parallele Achsen
- Untersetzung möglich (Verhältnis der Zähnezahlen)
- Müssen gespannt werden

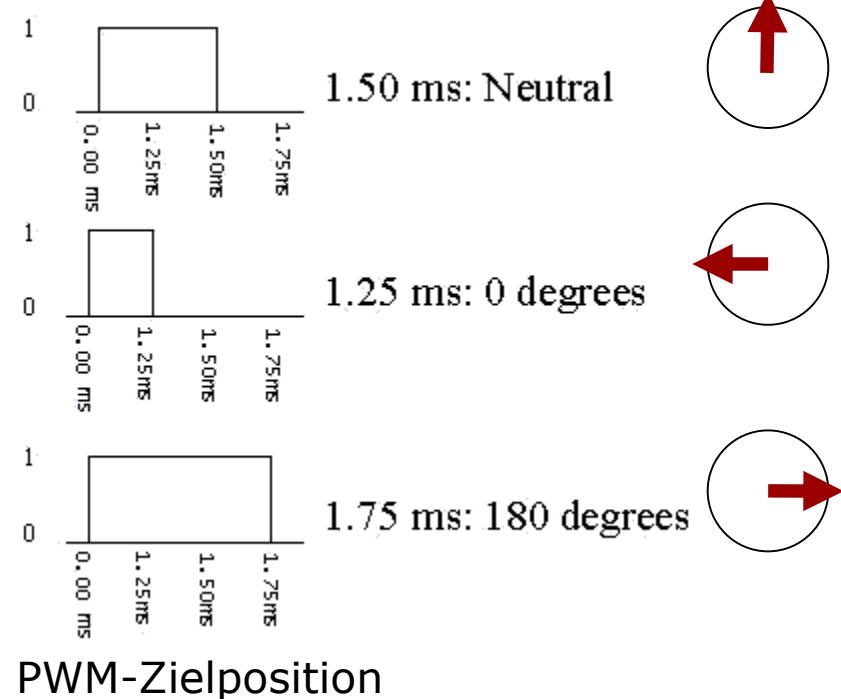


Flaschenzug



Modellbau (RC)-Servos

- Positionsregelung
- PWM-Signal codiert Zielposition
- Positionsmessung durch Potentiometer
- Integrierte Regler-Elektronik
- Geringes Gewicht
- Hohes Drehmoment



Robotis Dynamixel-Aktuatoren

- DC-Motor
- Stirnradgetriebe aus Metall
- Über RS-485-Bus konfigurierbar
- Parameter:
 - Zielposition
 - Max. Geschwindigkeit
 - Max. Drehmoment
 - Nachgiebigkeit (Compliance)
- Messung
 - Position
 - Geschwindigkeit
 - Belastung (Load)
 - Temperatur
- Master-Slave-Kopplung möglich



Beispiele für Dynamixel-Roboter



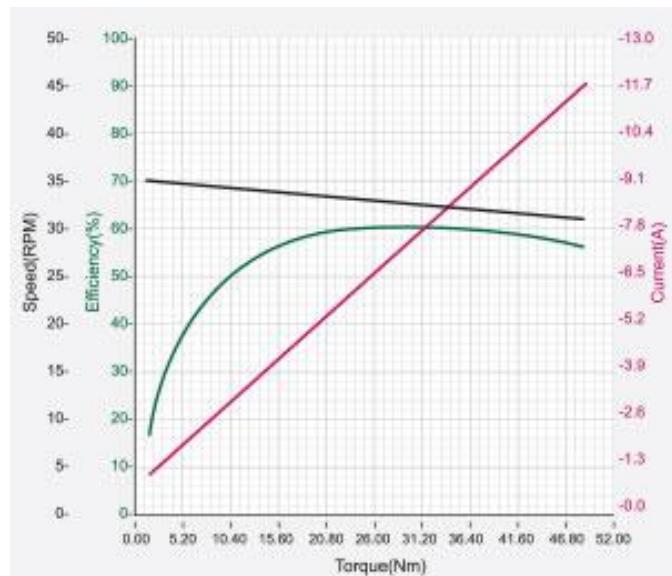
Cosero



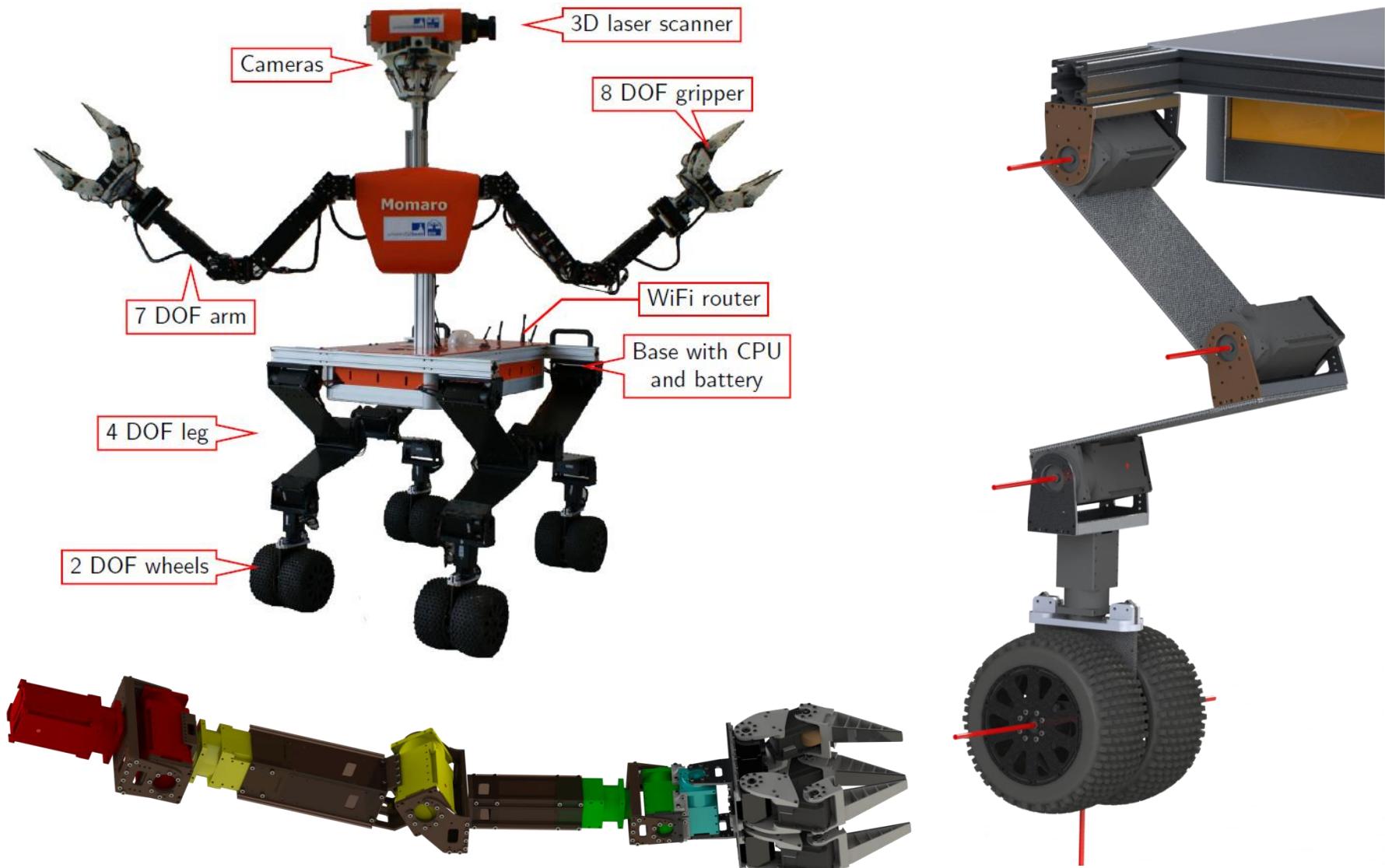
NimbRo-OP2

Robotis Dynamixel Pro

- Drei Größen 20-200W
- Zykloid-Getriebe (spielarm, Untersetzung bis zu 1:502)
- 5,6-39 Nm Drehmoment
- 15-32 Umdrehungen/Minute
- RS-485/CAN



Beispiel Dynamixel Pro: Momaro

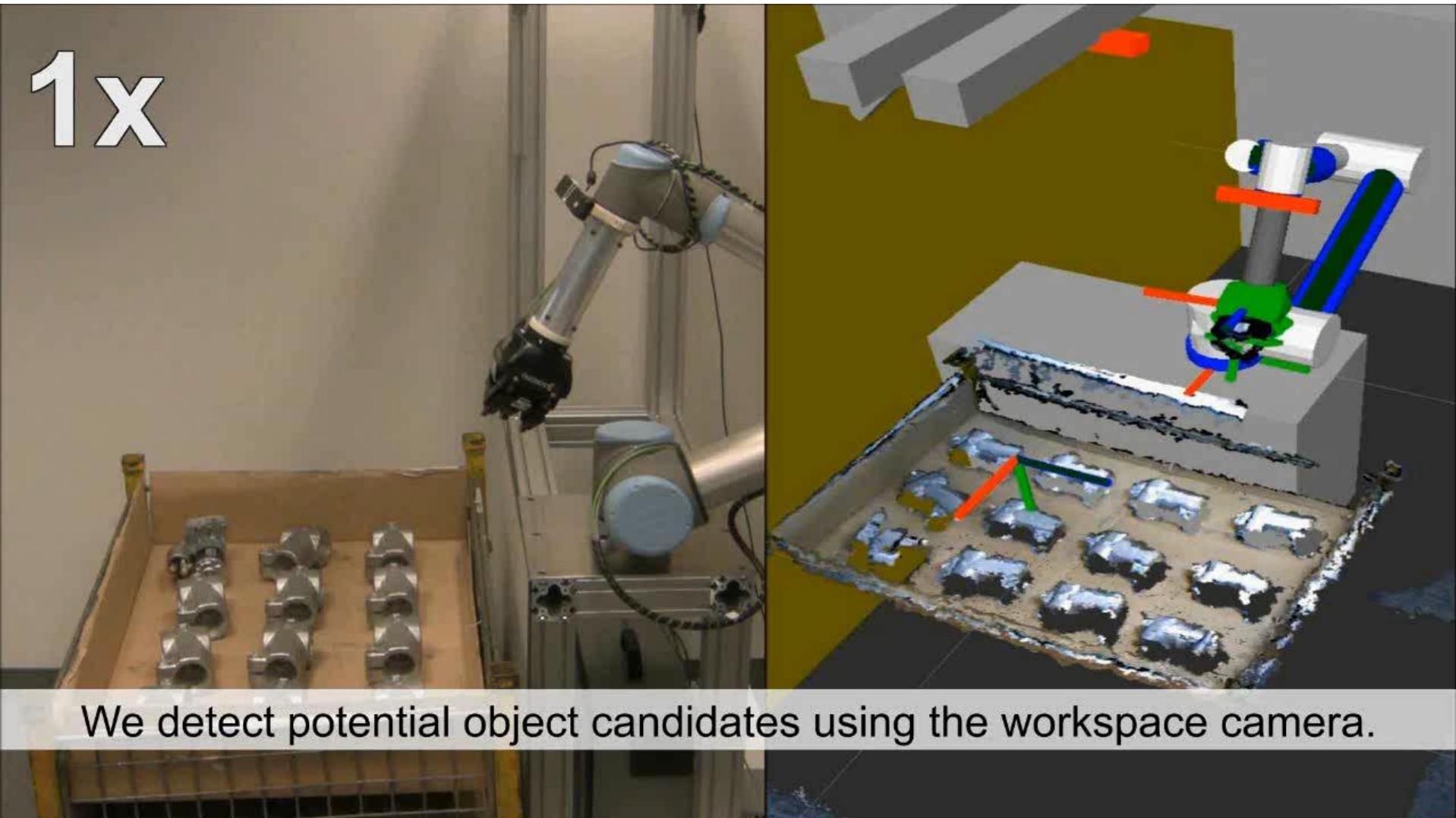


Industrielles Rotationsmodul



Entnahme von Teilen aus Palette

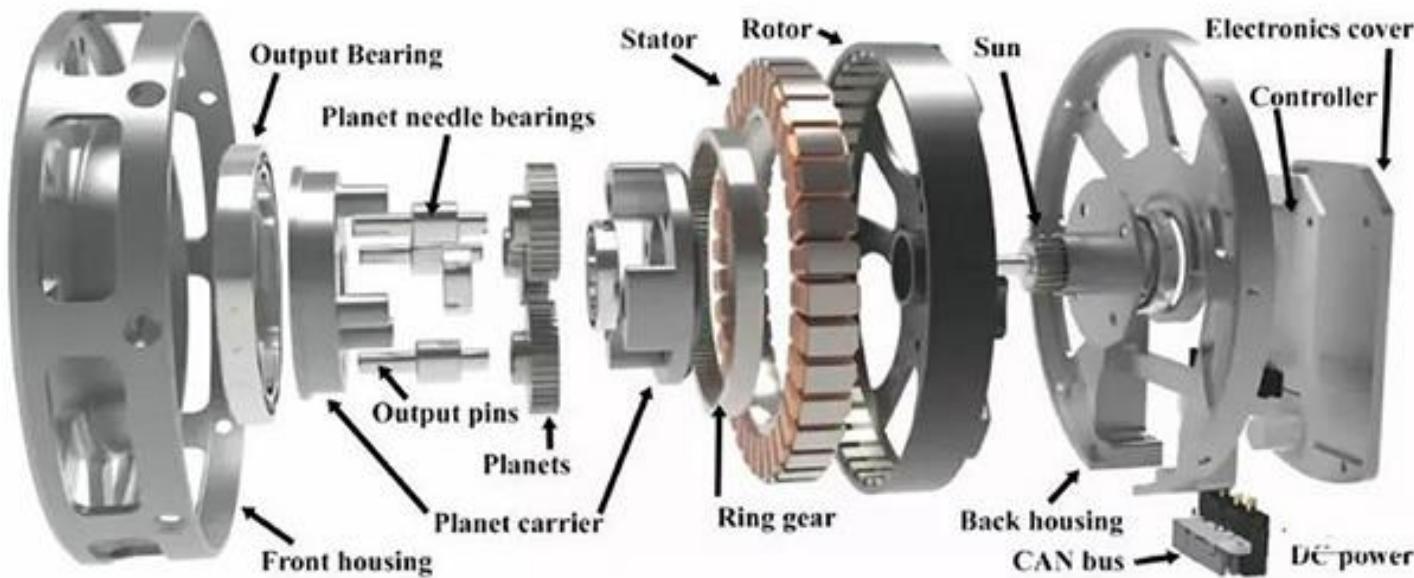
1x



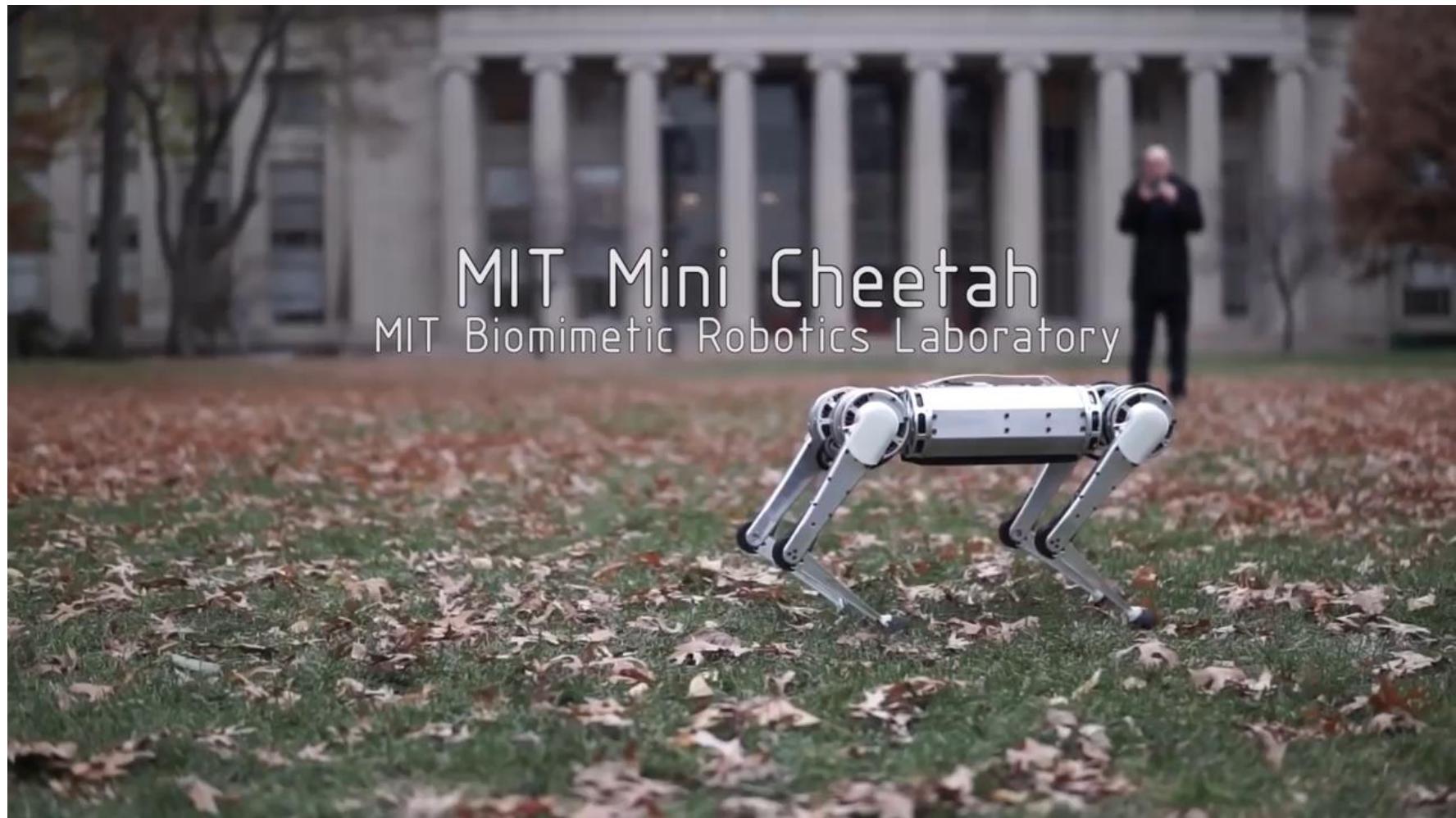
We detect potential object candidates using the workspace camera.

Quasi-Direct-Drive

- Flache, bürstenlose DC-Motoren mit Planetengetriebe (geringe Untersetzung) und Controller
- Hohes Drehmoment
- Rücktriebbar
- Spielbehaftet



Beispiel: MIT Mini Cheetah

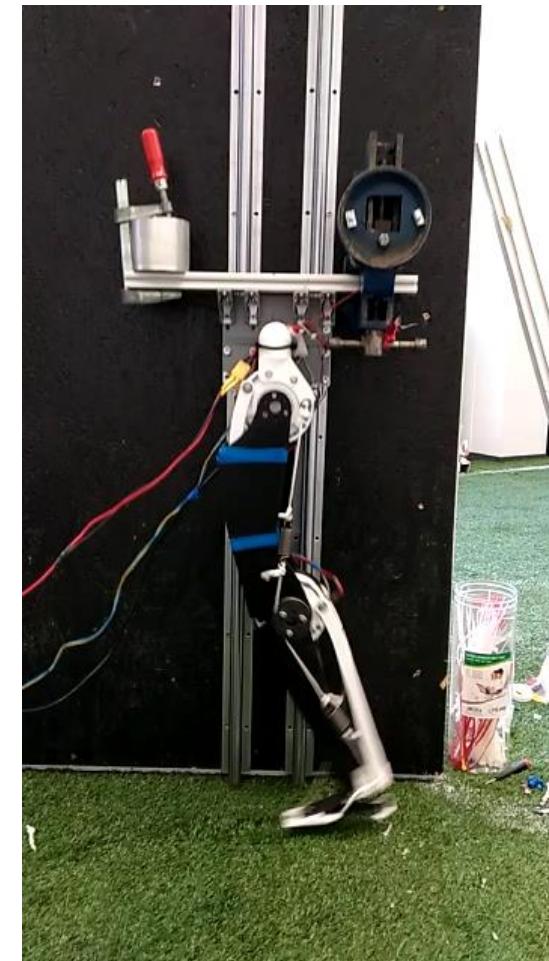
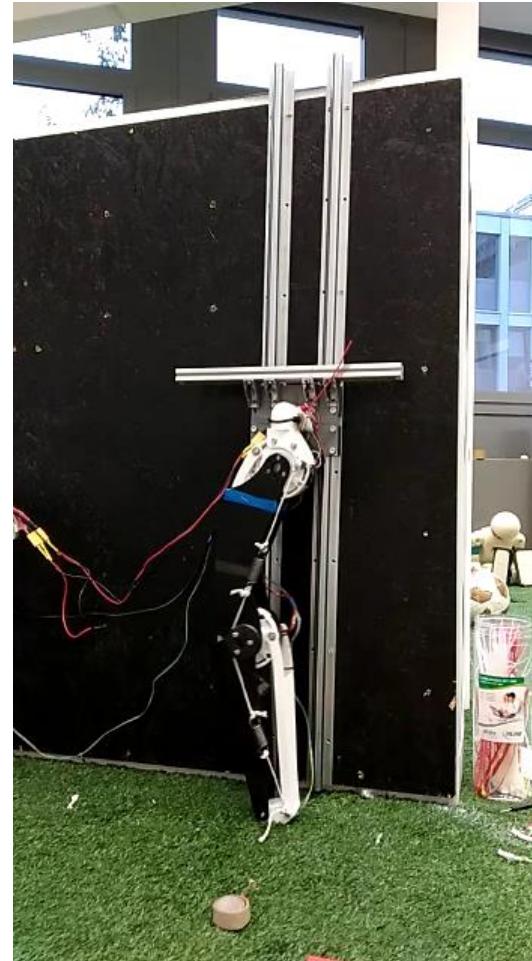


Beispiel: Unitree Aliengo



Unitree Robotics 宇树科技

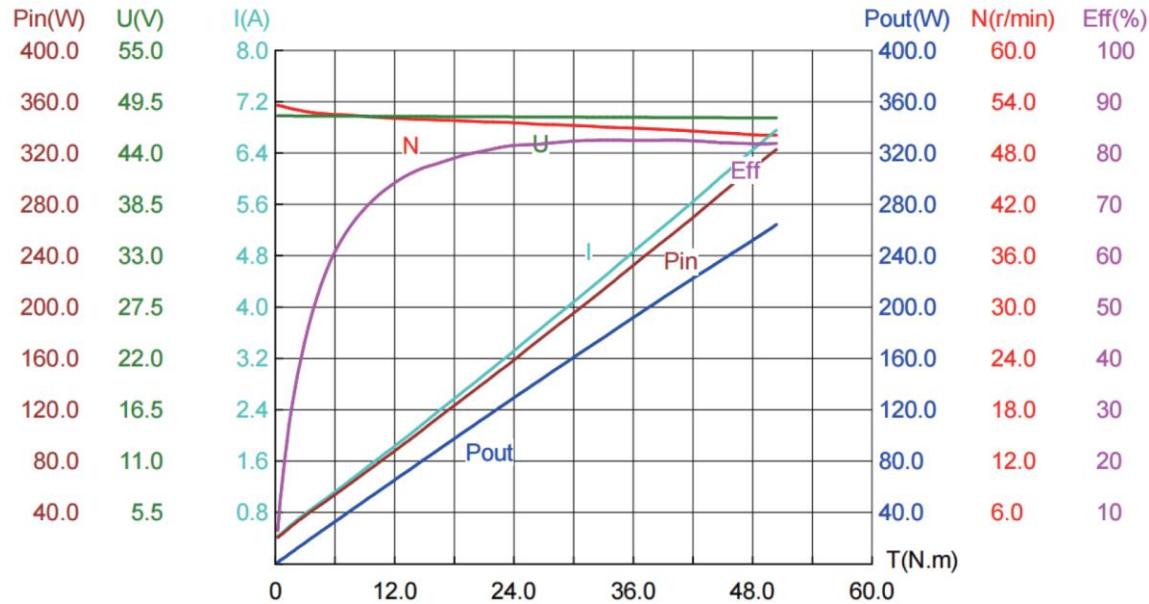
Beispiel: Hüpfendes Bein



[Ficht 2020, unpublished]

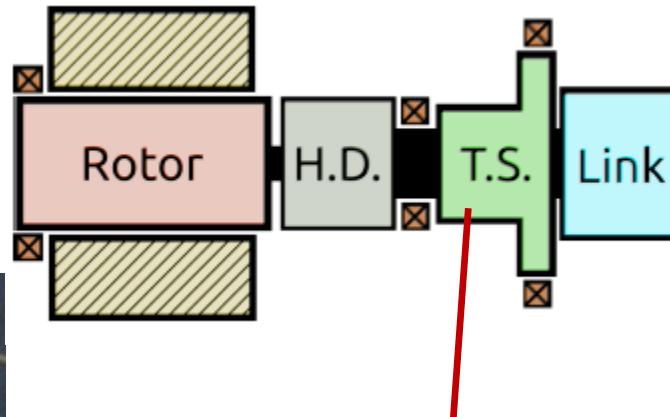
Bürstenlose Motoren mit zweistufigem Planetengetriebe

- Mehr Drehmoment, langsamer
- Z.B. MyActuator RMD-S2 1:35
 - Drehmoment: 50 Nm
 - Geschwindigkeit: 50 rpm
 - Leistung 265 W; Gewicht 1,7 kg
 - Durchmesser 12,2 cm; 7,4 cm lang

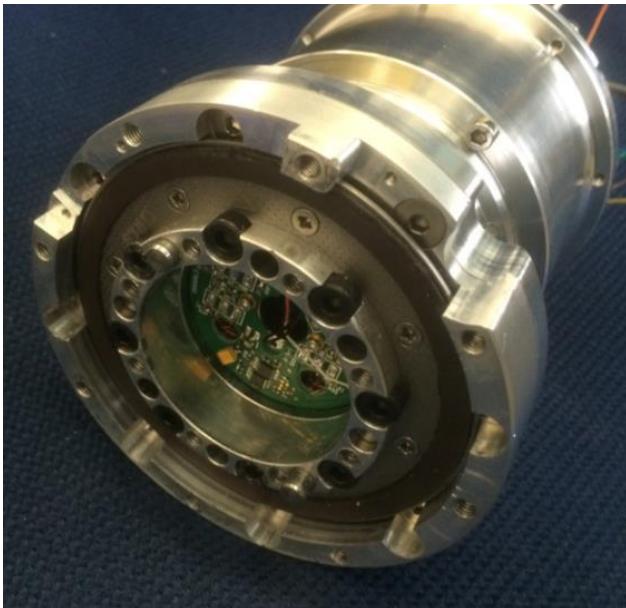


Seriell-elastische Aktuatoren

- Feder zwischen Getriebe und Abtrieb
- Positionsmeßung auf beiden Seiten der Feder
- Regelbares Drehmoment bzw. Kraft



Feder



[IIT]



[Apptronik]

Centauro-Roboter

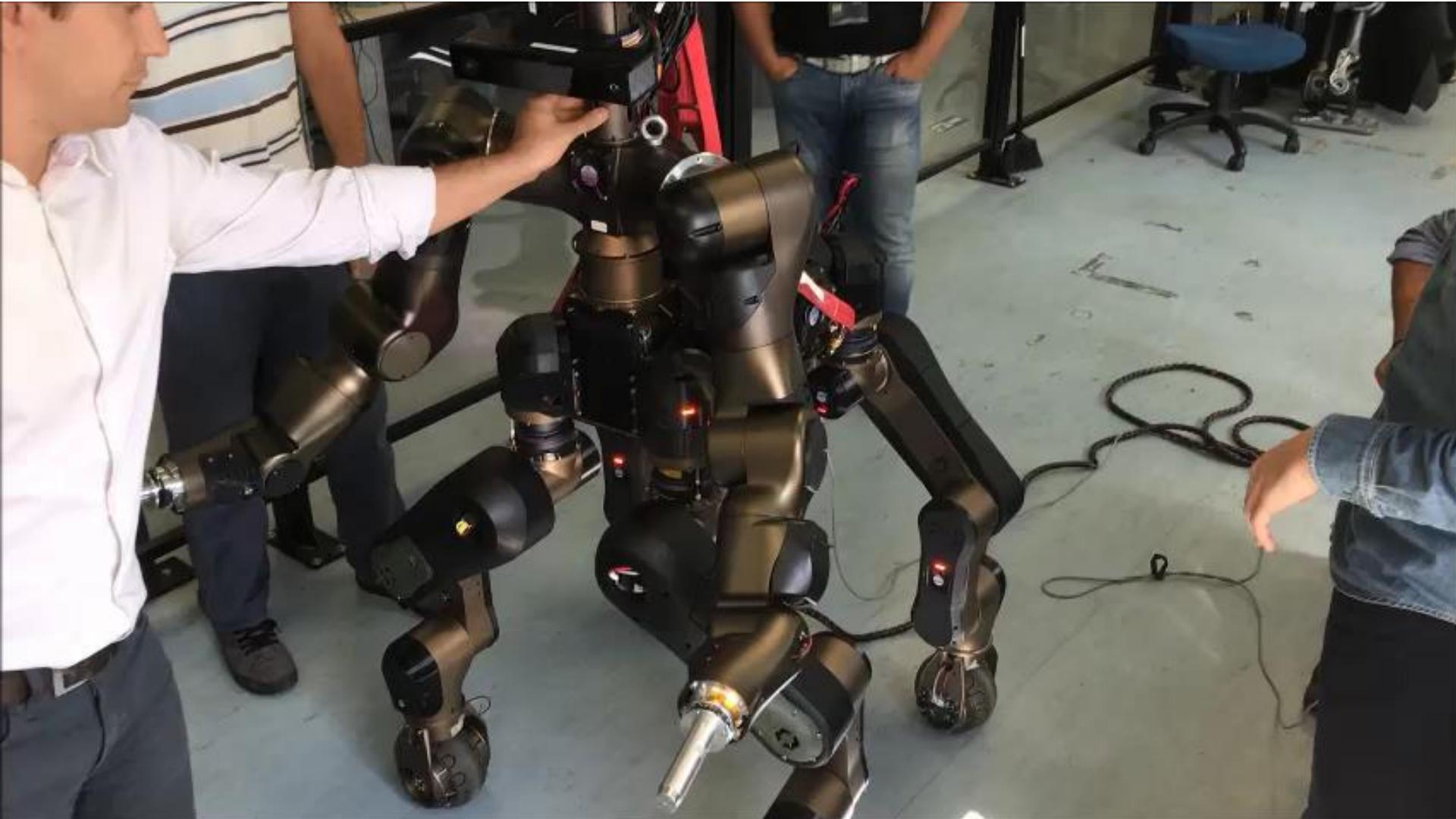
CENTAURO



- Serial-elastische Aktuatoren
- 42 große Gelenke
- Schunk-Hand
- 3D-Laserscanner
- RGB-D-Kamera
- Farbkameras
- Zwei GPU-PCs

[Tsagarakis et al.,
IIT 2017]

Nachgiebige Gelenke



Pneumatische Aktuatoren

- Bewegung durch Luftdruck
- Hohe Kräfte, mittlerer Weg
- Elastisch



Pneumatisches Ventil



Pneumatik-Zylinder

Pneumatische Aktuatoren

- Auch kontinuierliche Drehung möglich



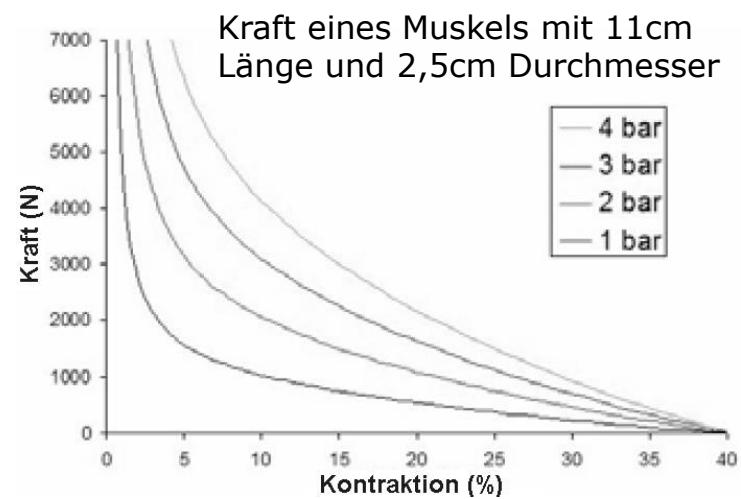
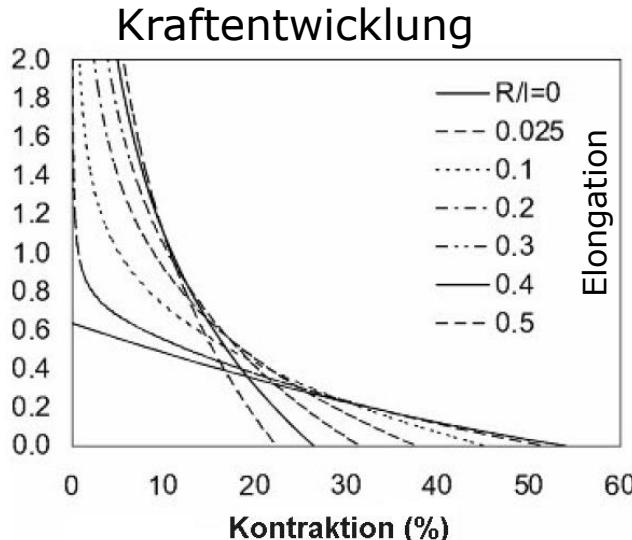
Pneumatischer Motor



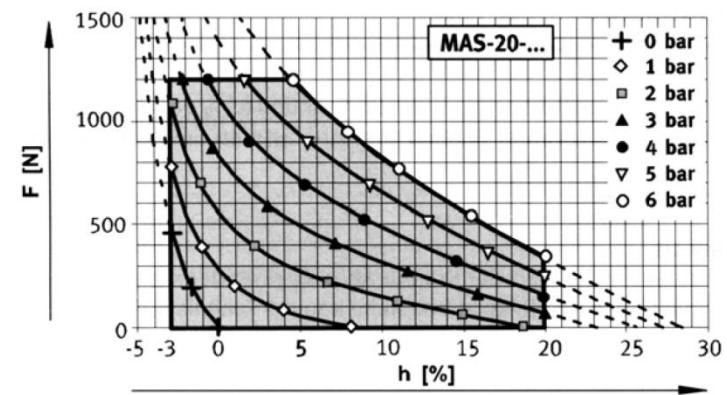
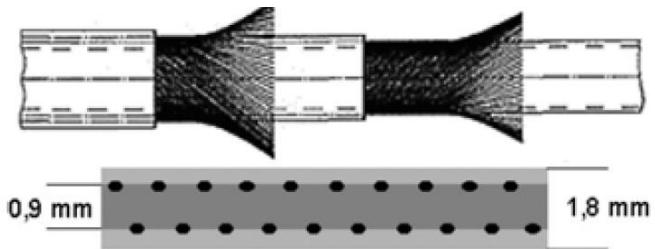
Pneumatischer Bohrhammer

Pneumatische Muskeln

- Gefalteter Polyesterschlauch
- Nicht dehbare Fasern in den Falten, um Zugkräfte zu übertragen
- Auswölbung, ohne Längenändernung
- Keine Hysterese
- Arbeiten mit geringem Druck



McKibben-Muskeln

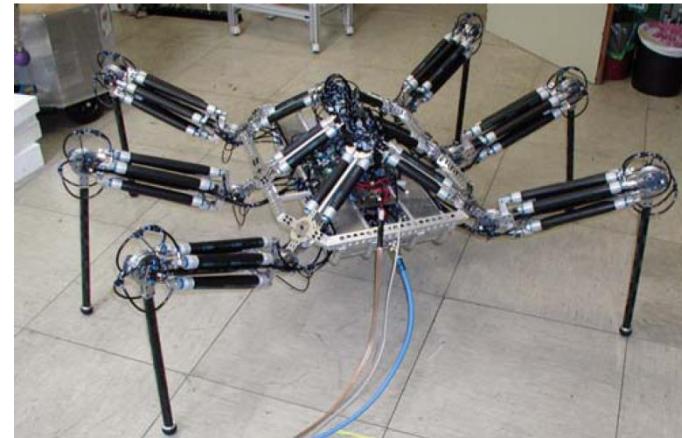


- Schlauch aus drei Gummischichten
- Zwischen den Schichten nicht-dehbare Fasern
- Luftdruck verursacht Kontraktion und Zugkraft
- Arbeitsdruck: 0..6 bar, Maximalkraft \sim 1700 N
- Längenänderung bis zu 28%

Pneumatische Roboter



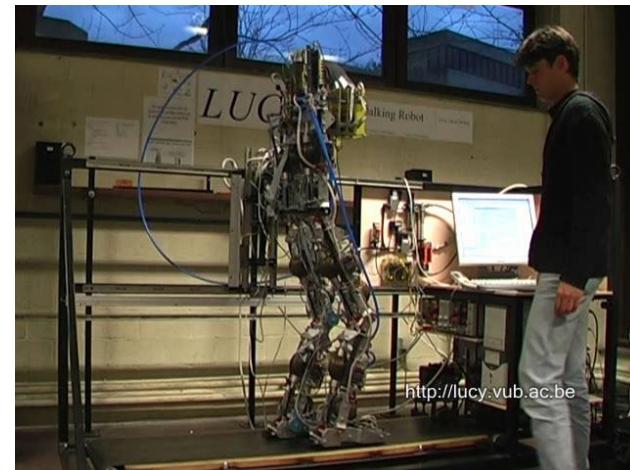
Shadow-Hand



AirBug (Karlsruhe)



ZAR 5 (TU Berlin)



Lucy (VUB)

Hydraulische Aktuatoren

- Bewegung durch Flüssigkeitsdruck
- Hohe Kräfte, mittlerer Weg



Hydraulikzylinder



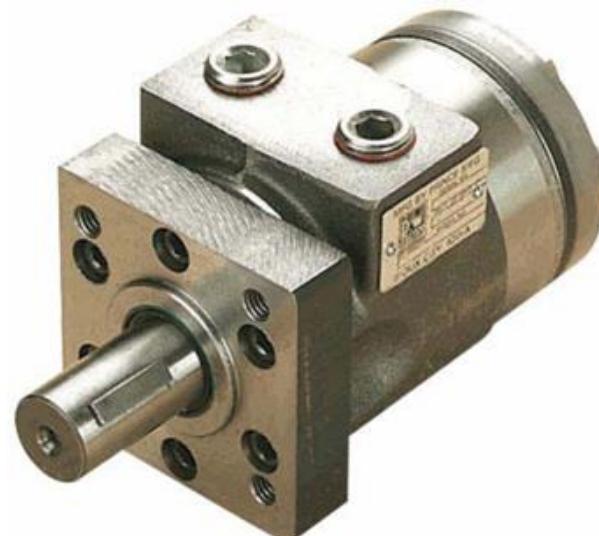
Hydraulischer Wagenheber

Hydraulische Aktuatoren

- Auch kontinuierliche Drehbewegung möglich



Hydraulische-Scheibenbremse



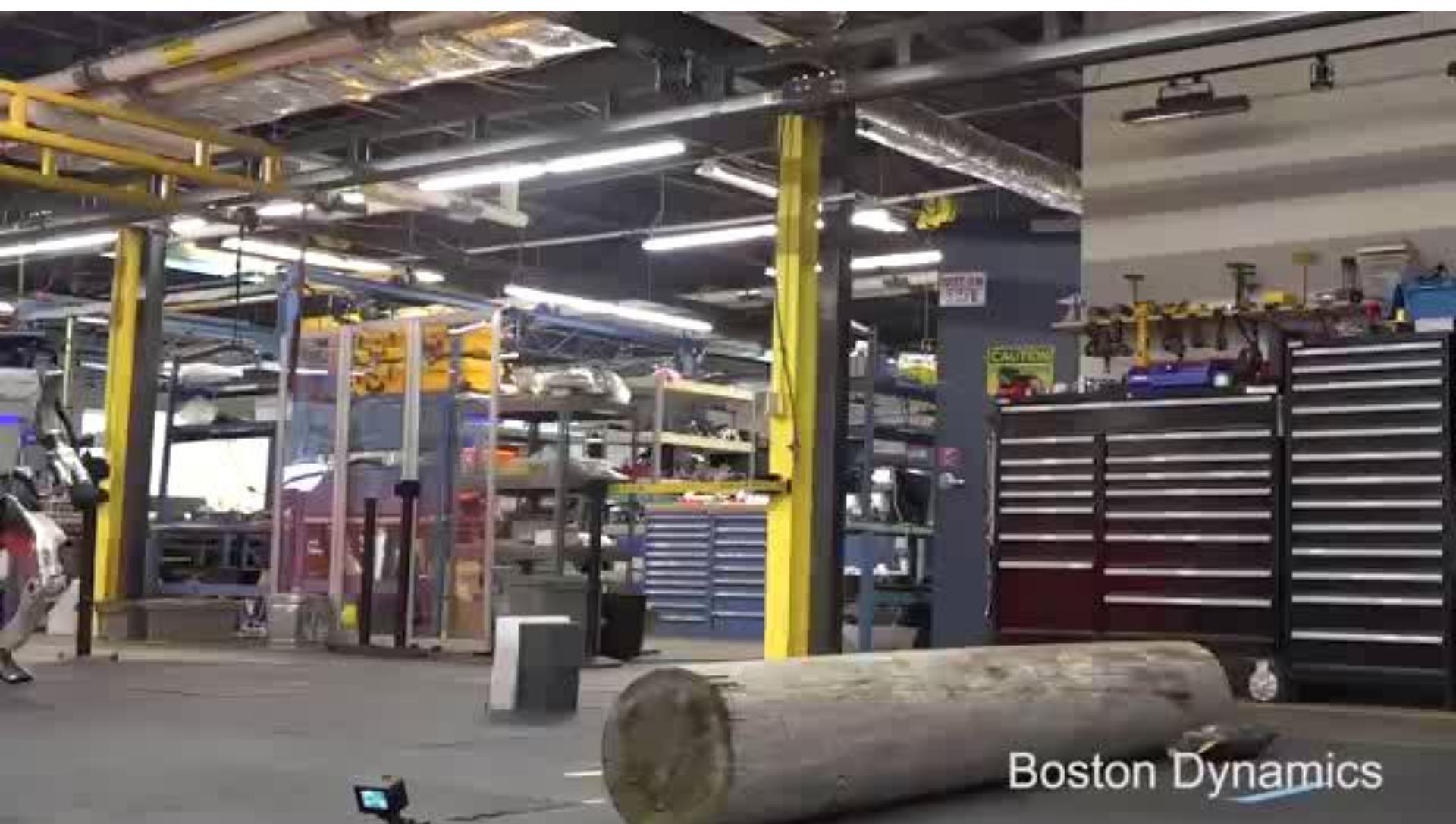
Hydraulik-Motor

Boston Dynamics: WildCat

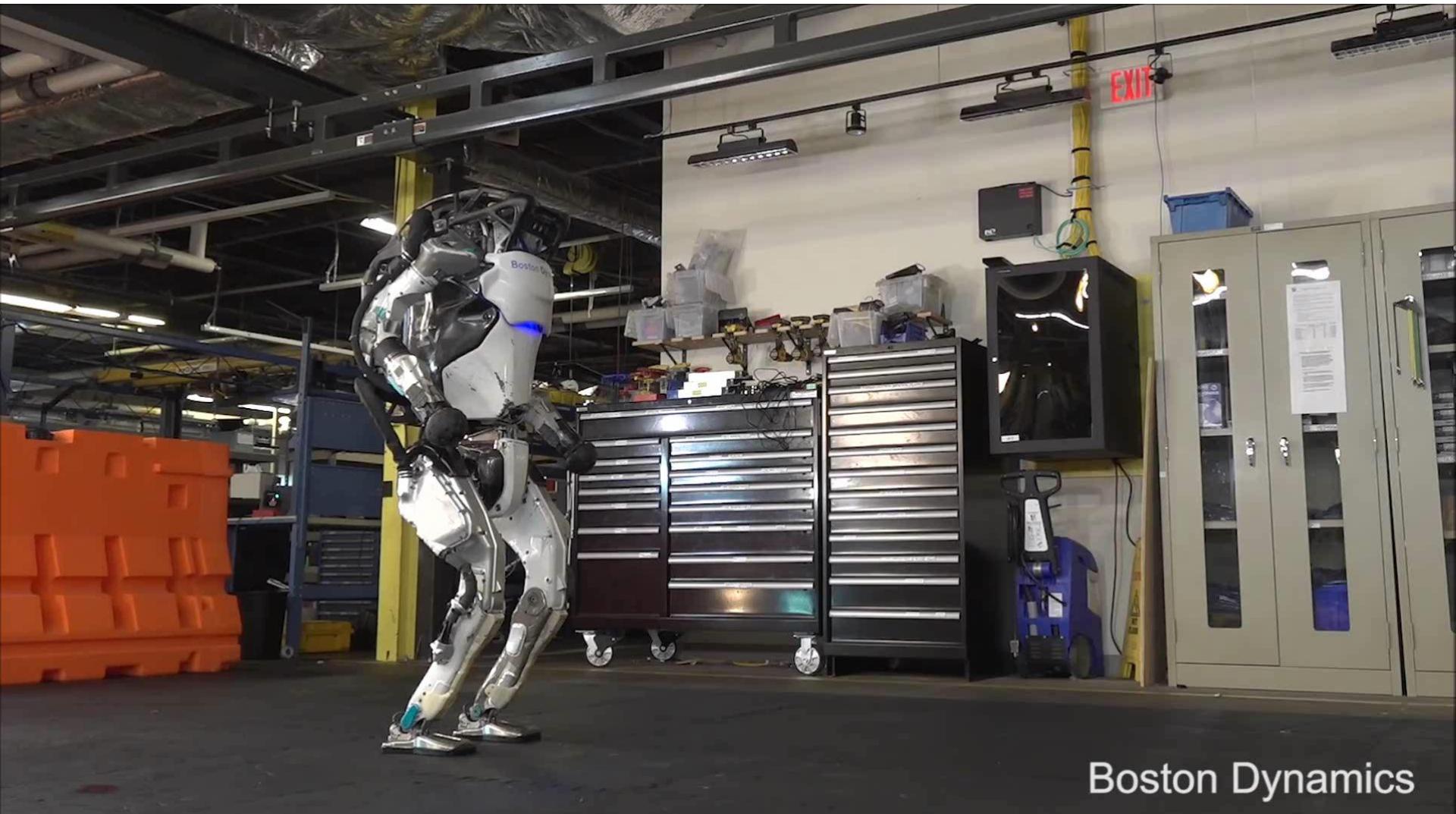


Boston Dynamics

Boston Dynamics Atlas: Parkour



Boston Dynamics Atlas: Gymnastik



Boston Dynamics

Piezo-Aktuatoren

- Längenänderung von Kristallen bei Anlegen von elektrischer Spannung
- Mittlere Kräfte, kleiner Weg



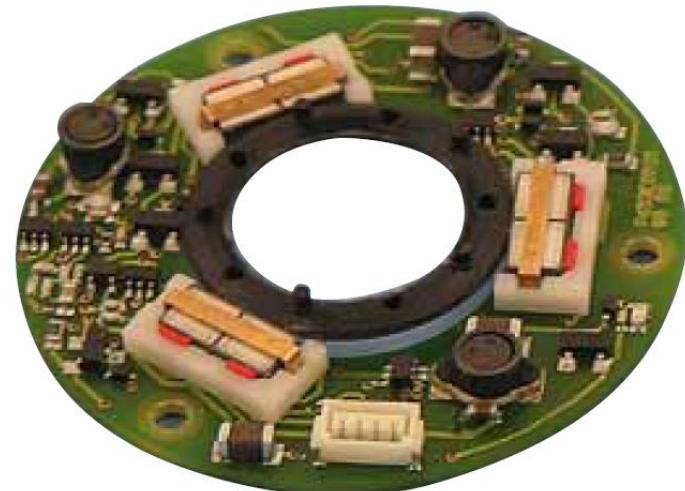
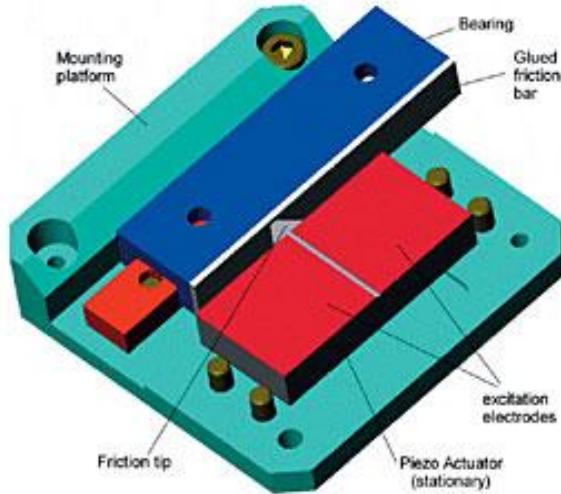
Tintenstrahl-Druckerköpfe



Präzisions-Aktuatoren

Ultraschall-Piezomotoren

- Piezokeramik oszilliert
- Aktuator bewegt sich in kleinen Schritten
- Linear oder rotierend
- Hohe Geschwindigkeit
- Geringe Kraft
- Selbsthaltend

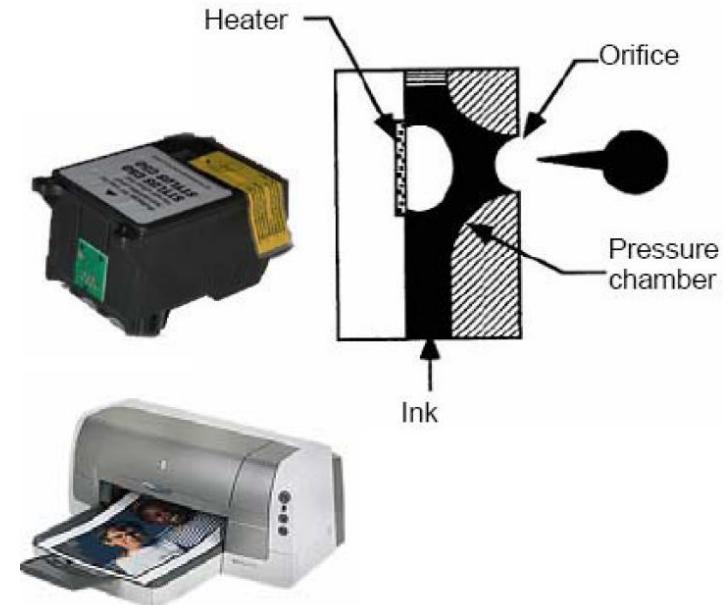


Thermische Aktuatoren

- Bewegung durch Erwärmung
- Kleine Kräfte, kleine Wege



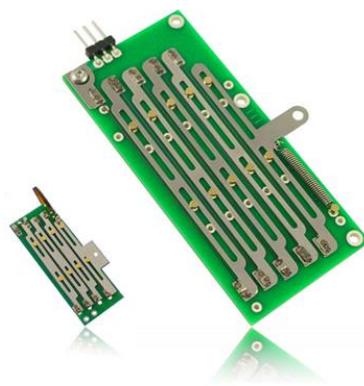
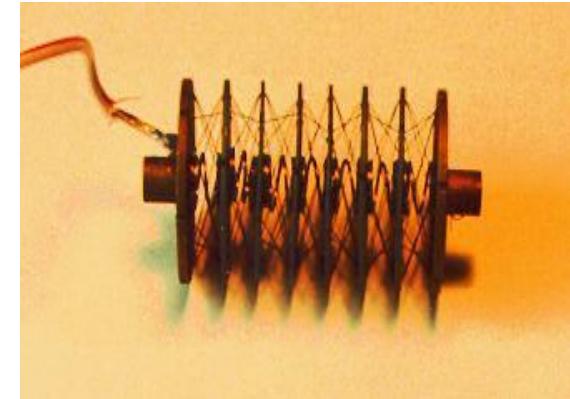
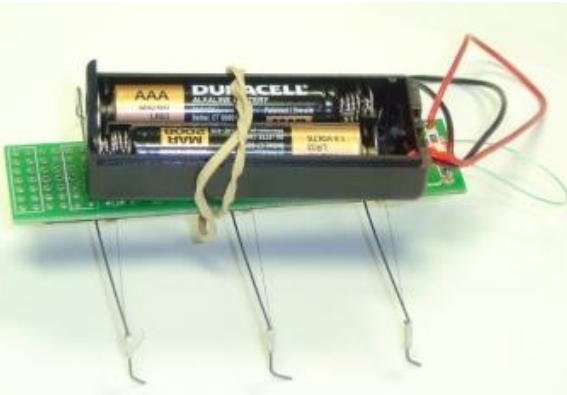
Backthermometer



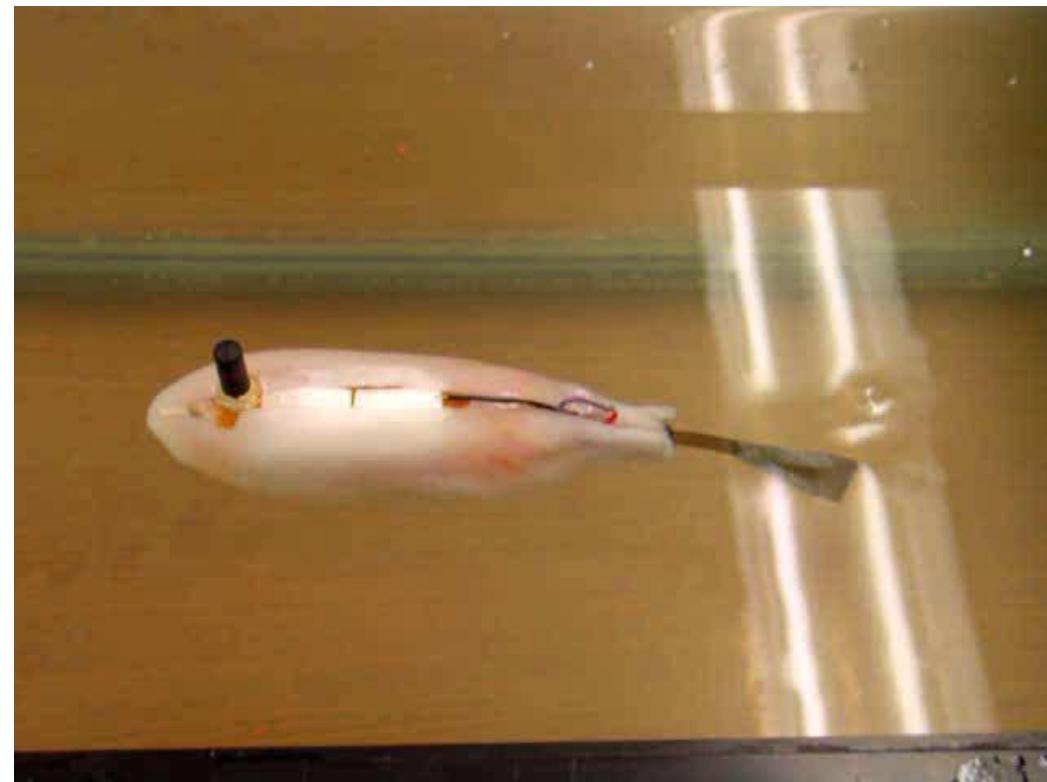
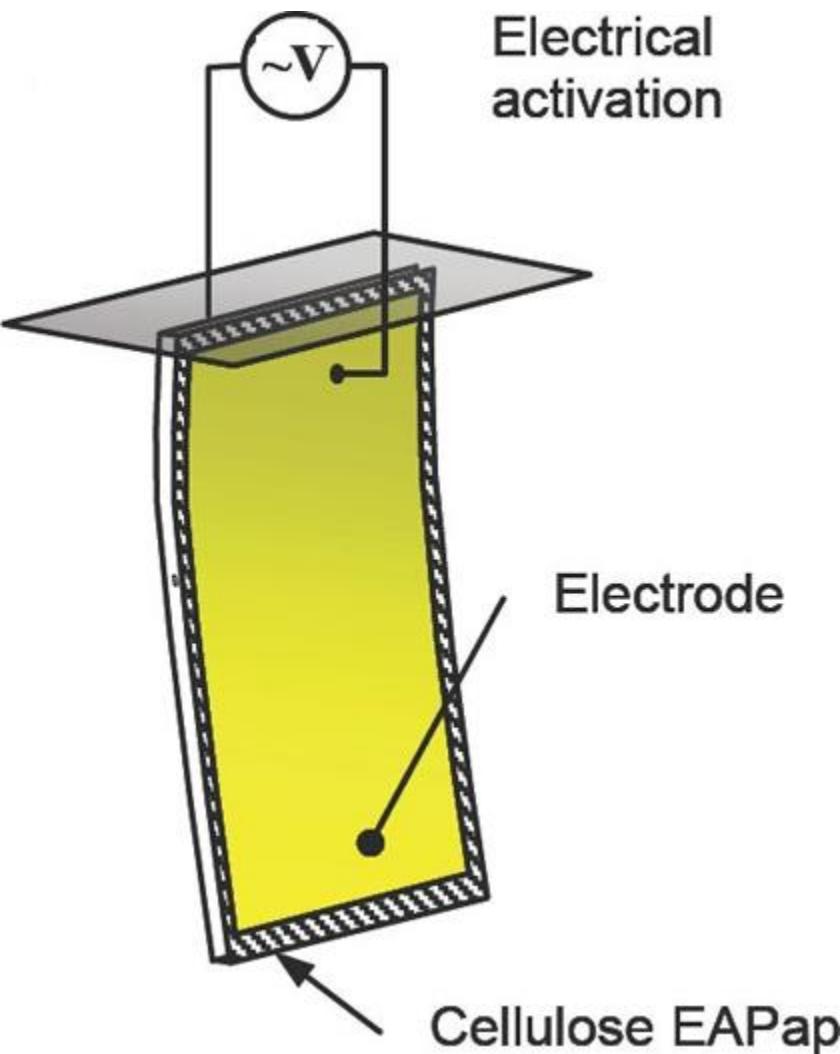
Tintenstrahl-Drucker

Gedächtnismetalle

- Verkürzung (bis zu 4%) bei Erwärmung
- Leicht, hohe Kräfte
- Bei Abkühlung Rückkehr zur ursprünglichen Länge
- Hysterese, geringe Energieeffizienz

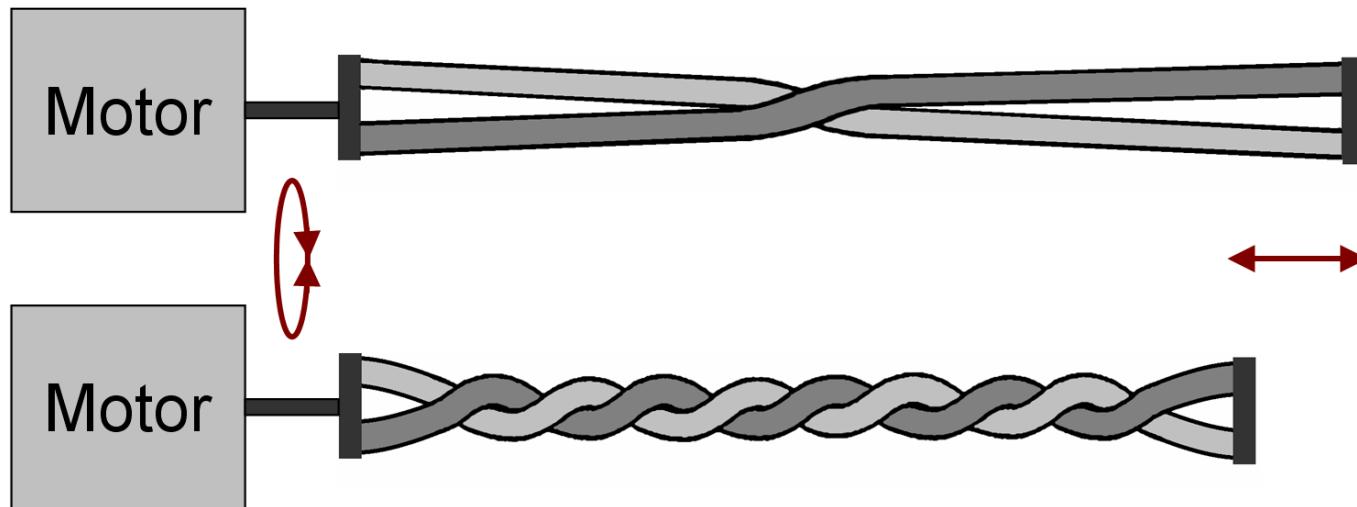


Elektroaktive Polymere

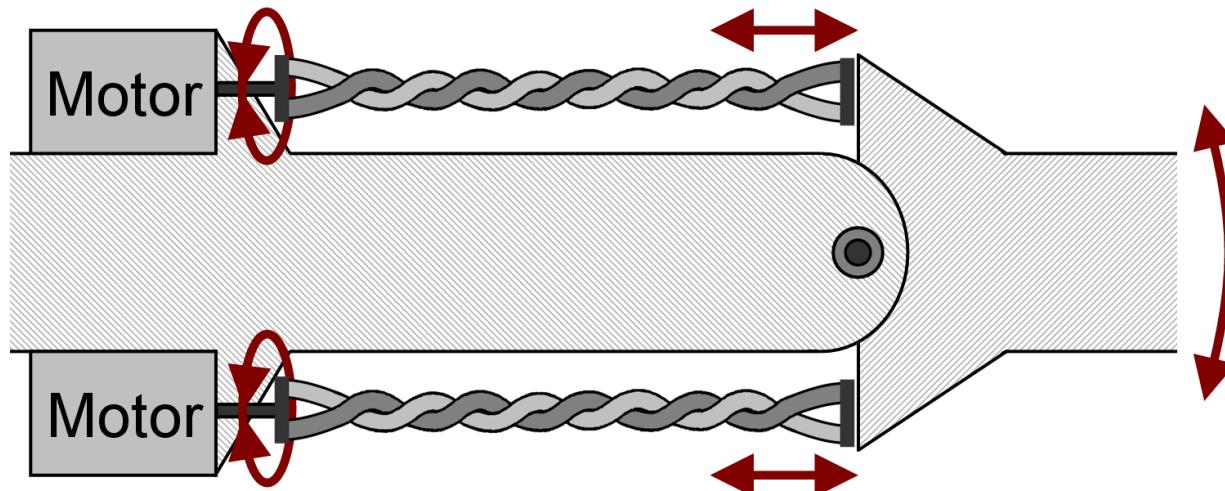


Verdrillungsantrieb

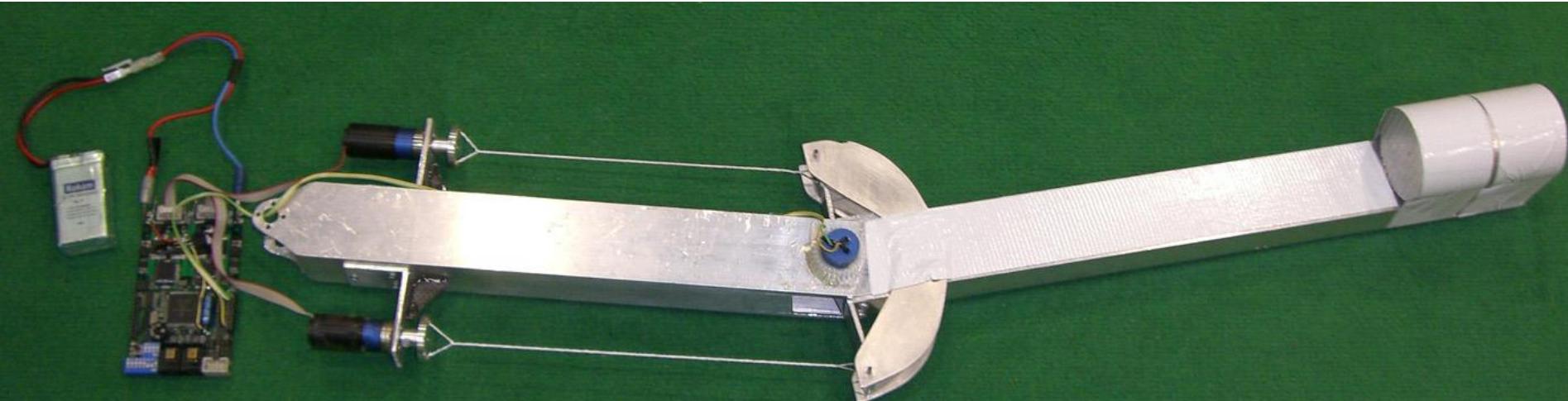
- Schnelle Drehbewegung wird in langsame Zugbewegung umgewandelt
- Elastisch



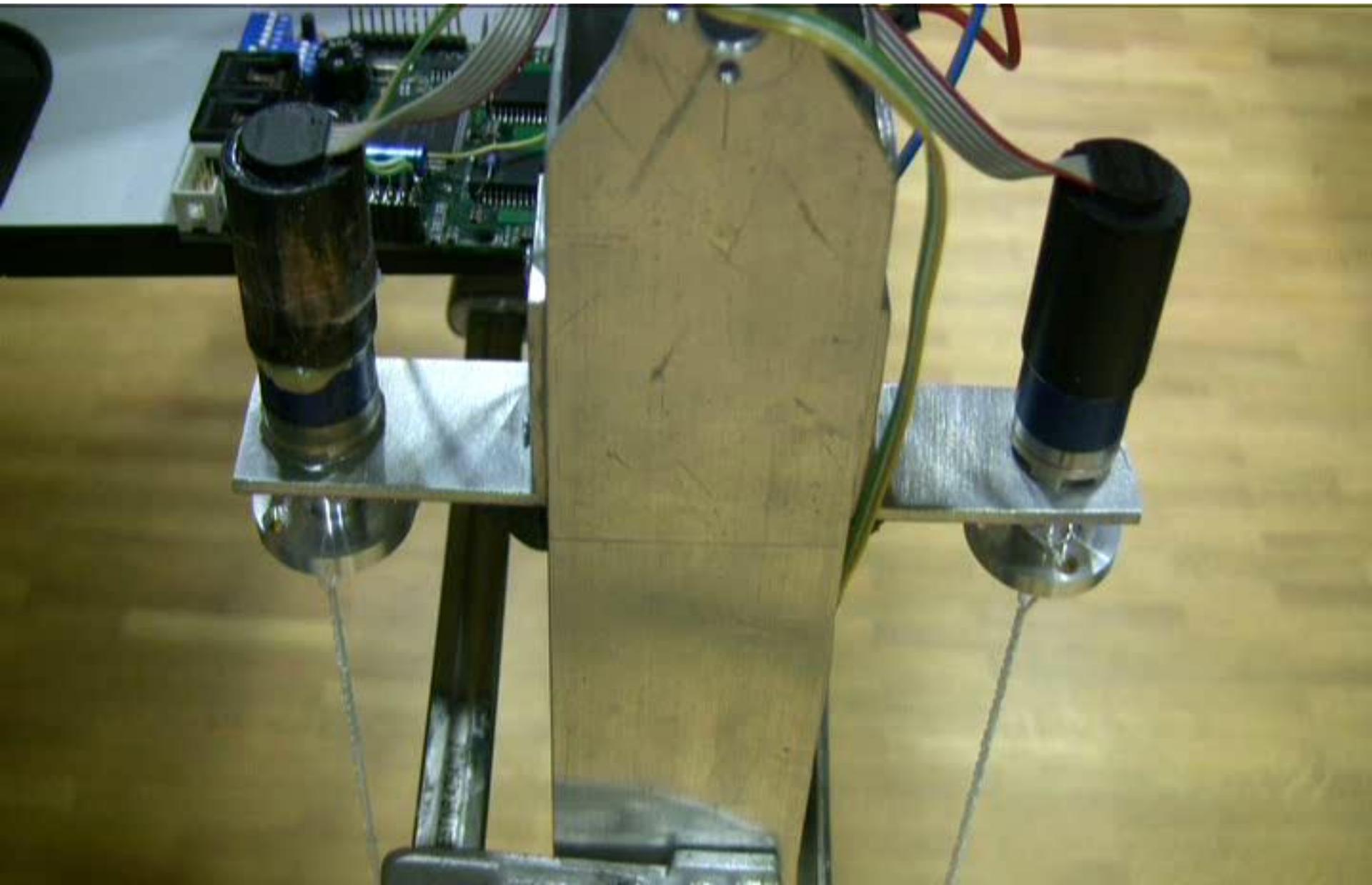
Antagonistische Verdrillungsantriebe



- Position und Steifigkeit ansteuerbar

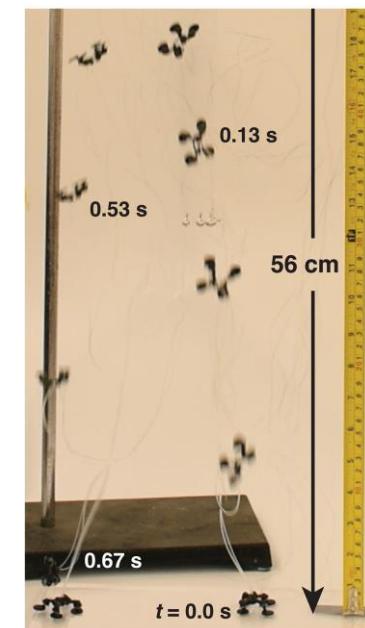
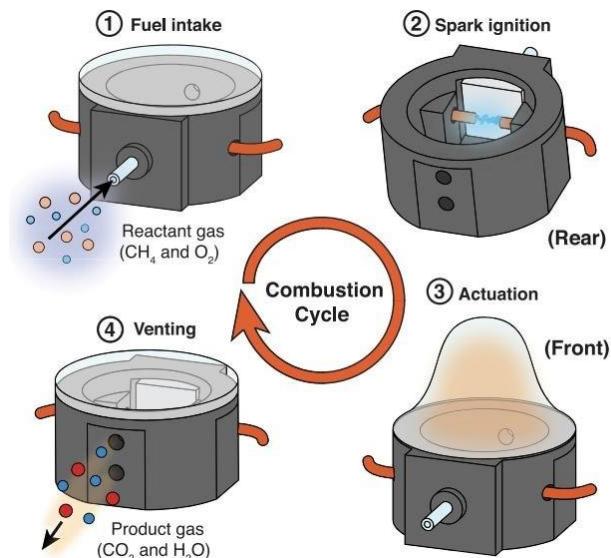
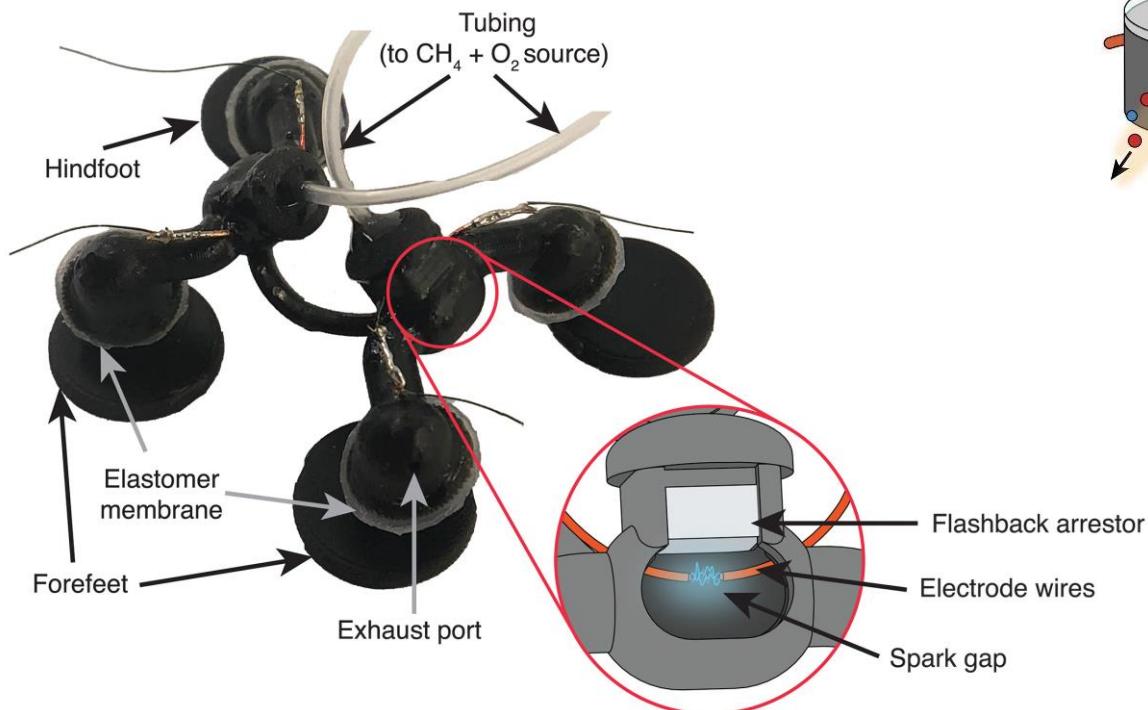


Verdrillungsantriebe in Aktion



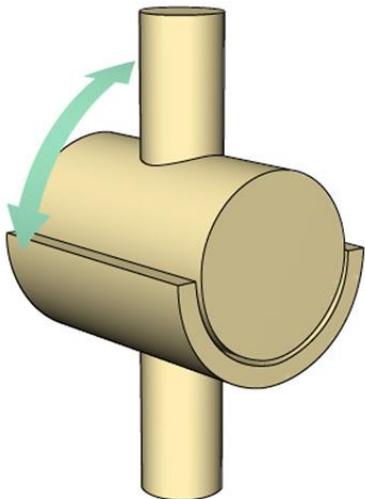
Verbrennungs-Aktuator

- Hohe Energiedichte chemischer Treibstoffe
- Hohe Spitzenleistung
- Beispiel: Springender Roboter

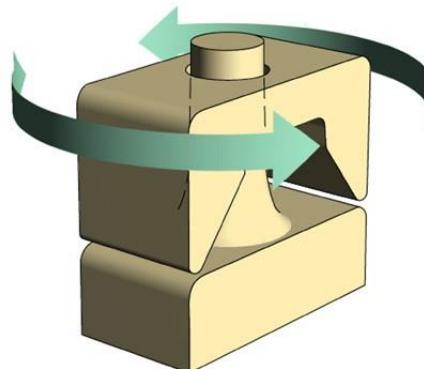


Gelenke

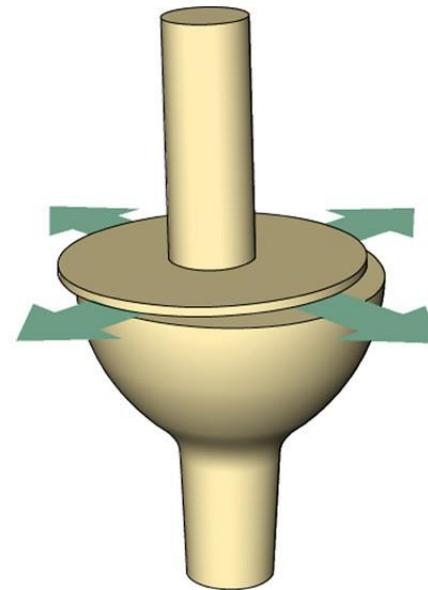
- Verbinden mechanische Glieder
- Schränken Bewegung ein



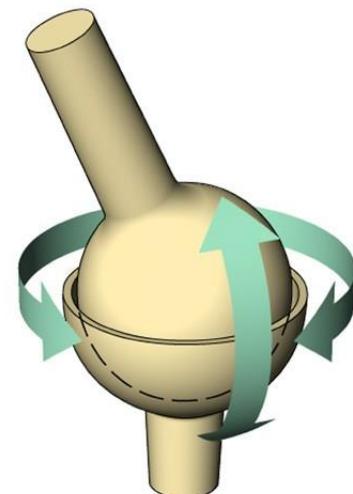
Scharnier



Drehgelenk



Planares Gelenk

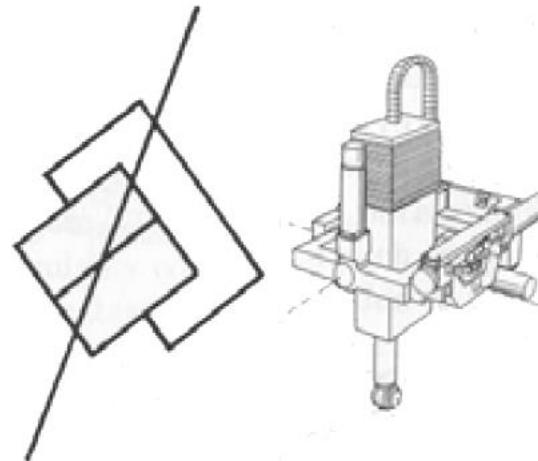


Kugelgelenk

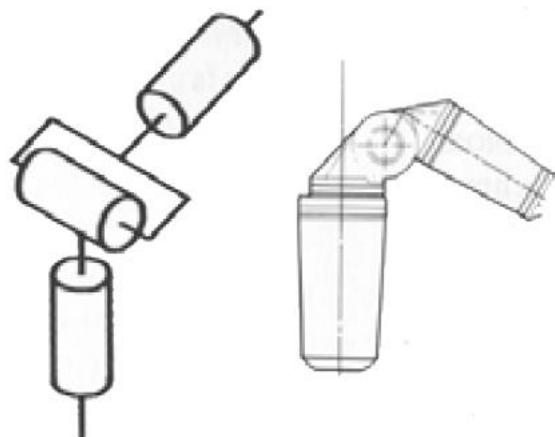
Kombinierte Gelenke



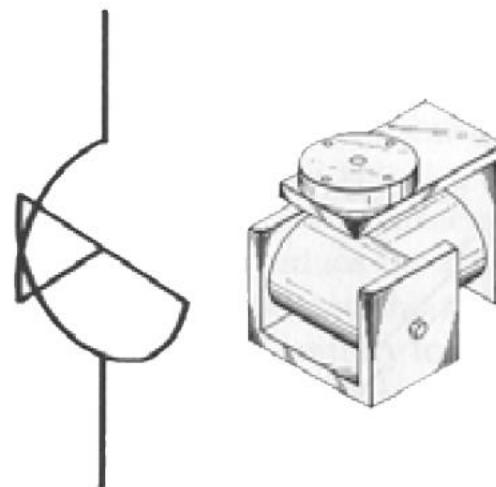
360° Roll –
180° Pitch



90° Pitch –
90° Yaw –
360° Roll



180° Roll –
209° Yaw –
360° Roll



180° Pitch –
90° Yaw –
360° Roll

Kinematik

- Vorwärts
 - Gegeben: Gelenkwinkel
 - Gesucht: Endeffektorpose
- Invers
 - Gegeben: Endeffektorpose
 - Gesucht: Gelenkwinkel
- Nötig: Mathematisches Modell der Roboterbewegung

