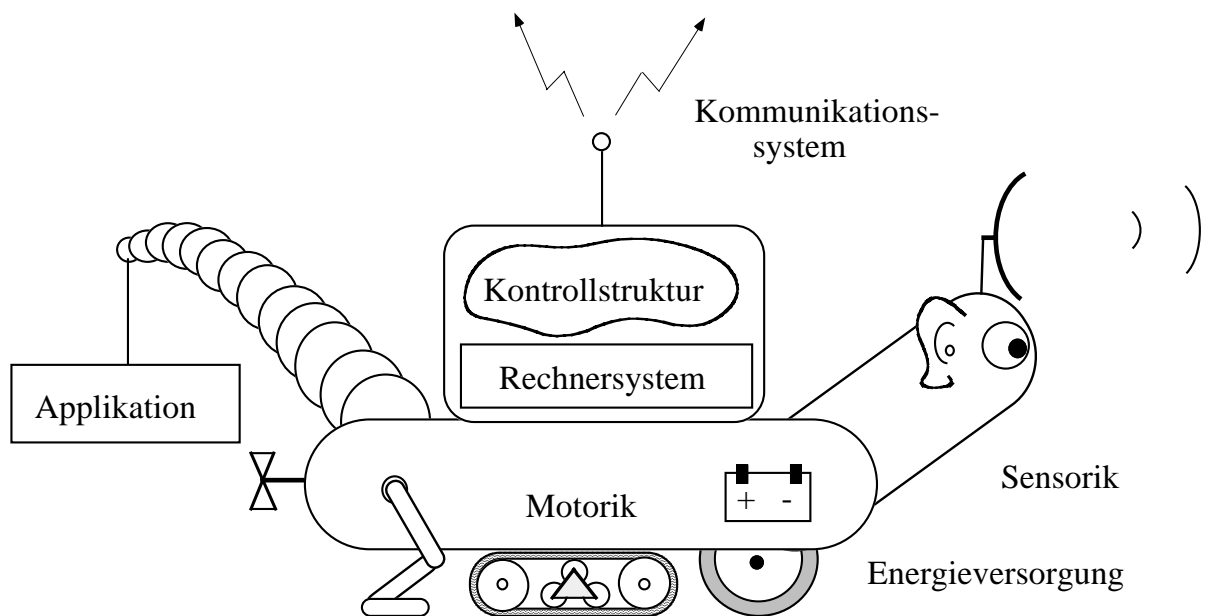


# Kapitel 2

## Komponenten eines AMR



|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| <b>2.1.</b> | <b>Motorik</b>                                  | <b>20</b> |
| 2.1.1.      | Fahrzeuge                                       | 20        |
| 2.1.1.1.    | Radanordnungen                                  | 20        |
| 2.1.1.2.    | Radantriebe                                     | 22        |
| 2.1.1.3.    | Motore  | 24        |
| 2.1.1.4.    | ( $v$ , $\omega$ ) - Schnittstelle              | 26        |
| 2.1.2.      | Gehmaschinen                                    | 27        |
| 2.1.2.1.    | Beinanordnungen                                 | 27        |
| 2.1.2.2.    | Arten der Gelenke                               | 28        |
| 2.1.2.3.    | Beinantriebe                                    | 29        |
| 2.1.2.4.    | Antriebe der Gelenke                            | 30        |
| <b>2.2.</b> | <b>Sensorik</b>                                 | <b>32</b> |
| 2.2.1.      | Aufgaben und Begrenzungen                       | 32        |
| 2.2.2.      | Interne Sensoren                                | 32        |
| 2.2.2.1.    | Neigungsmesser (Inklinometer)                   | 33        |
| 2.2.2.2.    | Orientierungsmesser                             | 33        |
| 2.2.2.2.1.  | Messung der Richtung des Erdmagnetfeldes        | 33        |
| 2.2.2.2.2.  | Mechanischer Kreisel                            | 34        |
| 2.2.2.2.3.  | Murata-Kreisel                                  | 34        |
| 2.2.2.2.4.  | Laserkreisel (Faserkreisel)                     | 35        |
| 2.2.2.3.    | Beschleunigungsmesser                           | 36        |
| 2.2.2.4.    | Inertialsysteme (inertial guidance system, IGS) | 36        |
| 2.2.2.5.    | Auto-Navigationssysteme                         | 37        |
| 2.2.2.6.    | GPS (global positioning system)                 | 37        |
| 2.2.2.7.    | Funkgestützte Systeme (Loran)                   | 38        |
| 2.2.2.8.    | Encoder   | 38        |
| 2.2.2.8.1.  | Messung von Wegstrecken                         | 39        |
| 2.2.2.8.2.  | Messung von Winkeln                             | 39        |
| 2.2.2.8.3.  | Tachogeneratoren                                | 40        |
| 2.2.2.9.    | Überwachung interner Zustände                   | 40        |
| 2.2.3.      | Externe aktive Sensoren                         | 40        |
| 2.2.3.1.    | Entfernungsgebende aktive Sensoren              | 40        |
| 2.2.3.2.    | Ultraschall                                     | 41        |
| 2.2.3.2.1.  | Prinzip   | 41        |
| 2.2.3.2.2.  | Fehlerquellen                                   | 42        |
| 2.2.3.2.3.  | Korrelationen                                   | 43        |
| 2.2.3.2.4.  | Korrelation von US-Signalen                     | 44        |
| 2.2.3.3.    | Laser-Entfernungsmesser                         | 48        |
| 2.2.3.3.1.  | Triangulationsverfahren                         | 48        |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| 2.2.3.3.2.   | Lichtschnittverfahren .....                                      | 51        |
| 2.2.3.3.3.   | Laufzeitmessung .....  | 51        |
| 2.2.3.3.4.   | Phasenmessverfahren .....  | 53        |
| 2.2.3.3.5.   | Aufnahme einer Radarkarte von einer bewegten Plattform aus ..... | 55        |
| 2.2.3.3.5.1. | Extrapolation der Roboterbahn .....                              | 56        |
| 2.2.3.3.5.2. | Extrapolation auf dem Kreis .....                                | 56        |
| 2.2.3.3.5.3. | Umrechnung des gemessenen Entfernungspunktes .....               | 57        |
| 2.2.3.4.     | mm-Wellen-Radar .....  | 58        |
| 2.2.3.5.     | Kamera mit schnellem Shutter .....                               | 59        |
| 2.2.3.6.     | Kamera mit Phasenmessung .....                                   | 60        |
| 2.2.3.7.     | Reflexsensoren .....   | 60        |
| 2.2.3.8.     | Andere aktive Sensoren .....                                     | 61        |
| 2.2.3.8.1.   | Laser-Reflexsensoren (Barcodescanner) .....                      | 61        |
| 2.2.3.8.2.   | Metalldetektoren .....   | 62        |
| 2.2.4.       | Externe passive Sensoren .....                                   | 62        |
| 2.2.4.1.     | Kameras .....  | 62        |
| 2.2.4.1.1.   | CCD-Kameras .....  | 62        |
| 2.2.4.1.2.   | CMOS-Kameras .....   | 62        |
| 2.2.4.1.3.   | Rundumüberwachung .....  | 63        |
| 2.2.4.1.4.   | Bildverarbeitung .....   | 64        |
| 2.2.4.1.5.   | Separierbare Filter .....  | 64        |
| 2.2.4.2.     | Tastsensoren .....   | 65        |
| 2.2.4.3.     | Mikrophone .....   | 67        |
| 2.2.4.4.     | IR-Bewegungsmelder .....   | 68        |
| 2.2.4.5.     | Andere Bewegungsmelder .....                                     | 68        |
| 2.2.4.6.     | Photodektoren .....  | 68        |
| <b>2.3.</b>  | <b>Energieversorgung .....</b>                                   | <b>70</b> |
| 2.3.1.       | Probleme der Energieversorgung .....                             | 70        |
| 2.3.2.       | Batterien und Akkumulatoren .....                                | 71        |
| 2.3.3.       | Verbrennungsmotore .....   | 71        |
| 2.3.4.       | Energiewandler .....   | 72        |
| 2.3.5.       | Notversorgung .....  | 72        |
| 2.3.6.       | Schleppkabel .....   | 73        |
| 2.3.7.       | Permanente Energiequellen .....                                  | 73        |
| <b>2.4.</b>  | <b>Rechnersystem .....</b>                                       | <b>74</b> |
| 2.4.1.       | Zeitverhalten .....  | 74        |
| 2.4.2.       | Einzelrechner .....  | 75        |
| 2.4.2.1.     | Betriebssystem .....   | 75        |
| 2.4.2.2.     | Einzelrechner mit Peripherie an Bord .....                       | 76        |

|             |  |           |
|-------------|--|-----------|
| 2.4.2.3.    | Blackboard .....   | 76        |
| 2.4.2.4.    | PC auf einem AMR .....   | 77        |
| 2.4.3.      | Mehrrechnersystem .....  | 78        |
| 2.4.3.1.    | Zeitverhalten .....  | 78        |
| 2.4.3.2.    | Verteiler für Daten (Kommunikationscontroller) .....               | 78        |
| 2.4.3.2.1.  | CAN-Bus .....  | 79        |
| 2.4.3.2.2.  | Ethernet .....   | 80        |
| 2.4.3.2.3.  | Kommunikation über Bus mit Controller .....                        | 80        |
| 2.4.3.2.4.  | Testbarkeit .....  | 81        |
| <b>2.5.</b> | <b>Kontrollstruktur .....</b>                                      | <b>82</b> |
| 2.5.1.      | Horizontale (hierarchische) Kontrollstruktur .....                 | 82        |
| 2.5.1.1.    | Funktionale Gliederung der Steuerung des Robots .....              | 83        |
| 2.5.1.2.    | Schichtenstruktur des KAMRO .....                                  | 84        |
| 2.5.1.3.    | Hierarchische Kontrollstruktur nach Isik & Meystel .....           | 85        |
| 2.5.2.      | Vertikale (verhaltensorientierte) Kontrollstruktur                 |           |
|             | Rodney A. Brooks, MIT, 1985/86 .....                               | 87        |
| 2.5.2.1.    | Forderungen an einen AMR .....                                     | 87        |
| 2.5.2.2.    | Verhaltensorientierte Kontrollstruktur nach Brooks .....           | 88        |
| 2.5.2.2.1.  | Rechnersystem zur Realisierung der Schichtenstruktur .....         | 88        |
| 2.5.2.2.2.  | Module .....   | 88        |
| 2.5.2.2.3.  | Struktur eines Moduls .....  | 89        |
| 2.5.2.2.4.  | Verhalten der Ebene 0 .....  | 90        |
| 2.5.2.2.5.  | Verhalten der Ebene 1 .....  | 91        |
| 2.5.2.2.6.  | Verhalten der Ebene 2 .....  | 92        |
| 2.5.3.      | Orthogonale Kontrollstruktur .....                                 | 93        |
| <b>2.6.</b> | <b>Kommunikation nach außen .....</b>                              | <b>96</b> |
| 2.6.1.      | Aufgaben .....   | 96        |
| 2.6.2.      | Mensch-Maschine-Schnittstelle .....                                | 96        |
| 2.6.2.1.    | Anzeigen .....   | 96        |
| 2.6.2.2.    | Input über die MMI zum AMR .....                                   | 96        |
| 2.6.2.3.    | Kommunikationscontroller .....                                     | 97        |
| 2.6.2.4.    | Blackboard-System .....  | 97        |
| 2.6.3.      | Fehlermeldungen und Testmöglichkeiten .....                        | 97        |
| <b>2.7.</b> | <b>Applikation .....</b>   | <b>98</b> |
| 2.7.1.      | Serviceroboter .....   | 98        |
| 2.7.1.1.    | Art des Service in Bezug auf Menschen .....                        | 98        |
| 2.7.1.1.1.  | Service aus Platzgründen nicht von Menschen erbringbar .....       | 98        |
| 2.7.1.1.2.  | Service durch Menschen aber nur mit Zusatzaufwand erbringbar ..... | 98        |
| 2.7.1.1.3.  | Service erfordert spezielle Ausrüstung .....                       | 99        |

---

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| 2.7.1.1.4. | Service durch Menschen erbringbar, aber gefährlich .....                                     | 99  |
| 2.7.1.1.5. | Service erbringbar, aber aus Sondergründen abgelehnt .....                                   | 99  |
| 2.7.1.1.6. | Service wird von Menschen erbracht, aber der Roboter kann's billiger<br>(nicht besser) ..... | 100 |
| 2.7.1.2.   | Umwelt des Roboters .....  | 100 |
| 2.7.1.3.   | Voraussetzung zur autonomen Erfüllung der Serviceaufgabe .....                               | 100 |
| 2.7.1.3.1. | Hinderniserkennung zur Vermeidung von Kollisionen .....                                      | 100 |
| 2.7.1.3.2. | Erkennen von Landmarken zur Orientierung in der Umwelt .....                                 | 100 |
| 2.7.1.3.3. | Aufgabenbezogene Objekterkennung zum zielgerichteten Manipulieren .....                      | 101 |
| 2.7.1.3.4. | Tastensorik zum Erfassen von Gegenständen .....  | 101 |
| 2.7.1.4.   | Ausblick .....   | 101 |
| 2.7.2.     | Montagegeräte .....  | 101 |
| 2.7.3.     | Unterwassersysteme .....   | 102 |
| 2.7.4.     | Autonome Raumfahrzeuge .....   | 102 |
| 2.7.5.     | Luftfahrzeuge .....  | 102 |

## 2.1. Motorik

### 2.1.1. Fahrzeuge

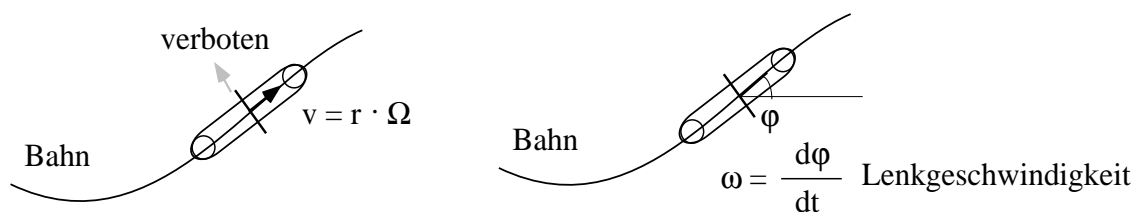
Antrieb durch Räder oder Kettenantrieb

Rad:  $r$  = Radius des Rades,  $\Omega$  = Winkelgeschwindigkeit =  $2\pi \cdot \text{\#Umdrehungen/s}$

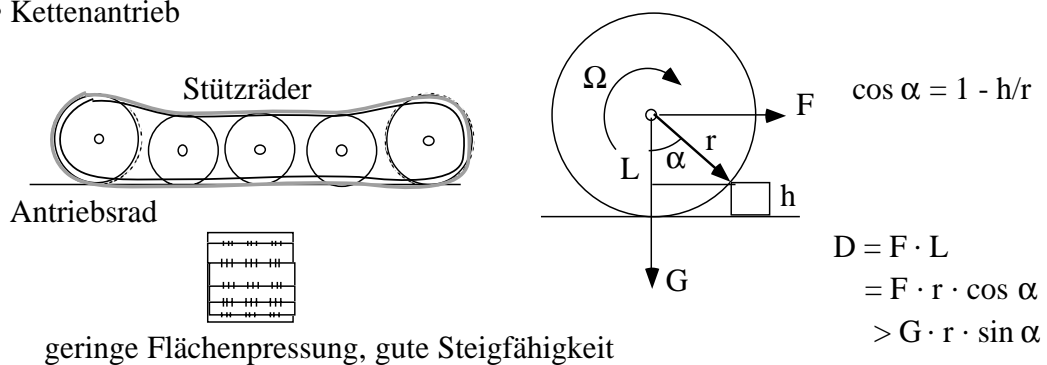
abrollendes Rad ==> Zwangsbedingung: nur Bewegung senkrecht zur Achse erlaubt

Kennzeichnung der Bewegung durch Linear- und Lenkgeschwindigkeit  $v$  und  $\omega$

Um ein Hindernis der Höhe  $h$  zu übersteigen, wird ein Drehmoment  $D = F \cdot r \cdot \cos \alpha$  gebraucht mit  $F$  = Kraft an der Radachse und  $\cos \alpha = (r - h) / r$



#### • Kettenantrieb



geringe Flächenpressung, gute Steigfähigkeit

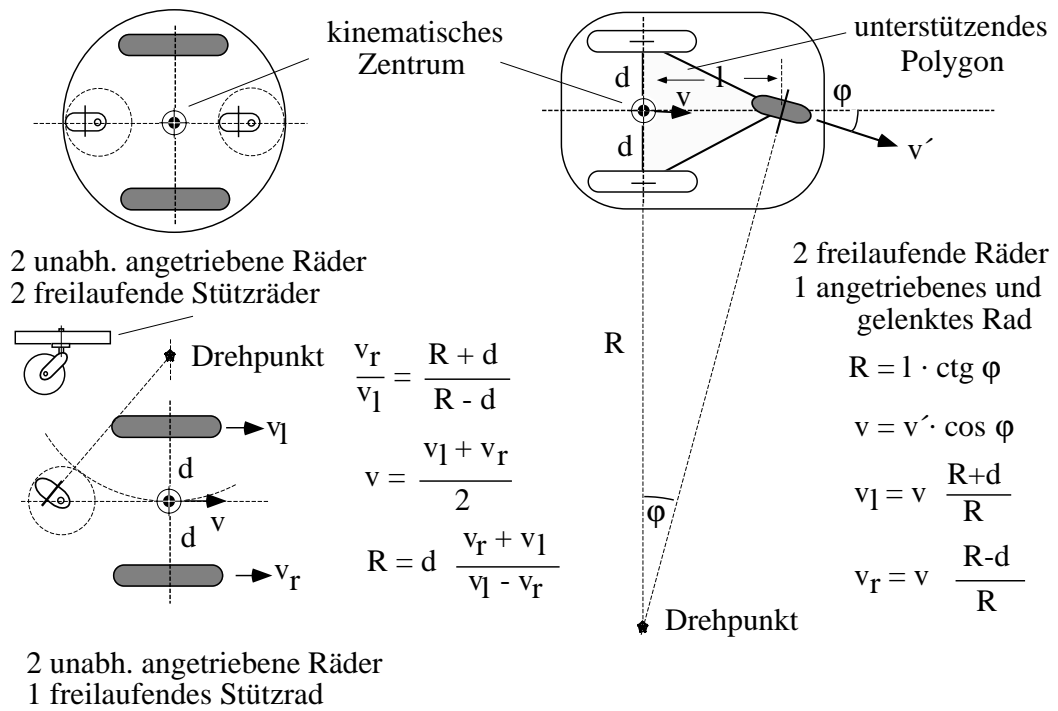
Kettenantriebe sind für unebenes Gelände geeignet; Spezialkonstruktionen können Treppen steigen.

#### 2.1.1.1. Radanordnungen

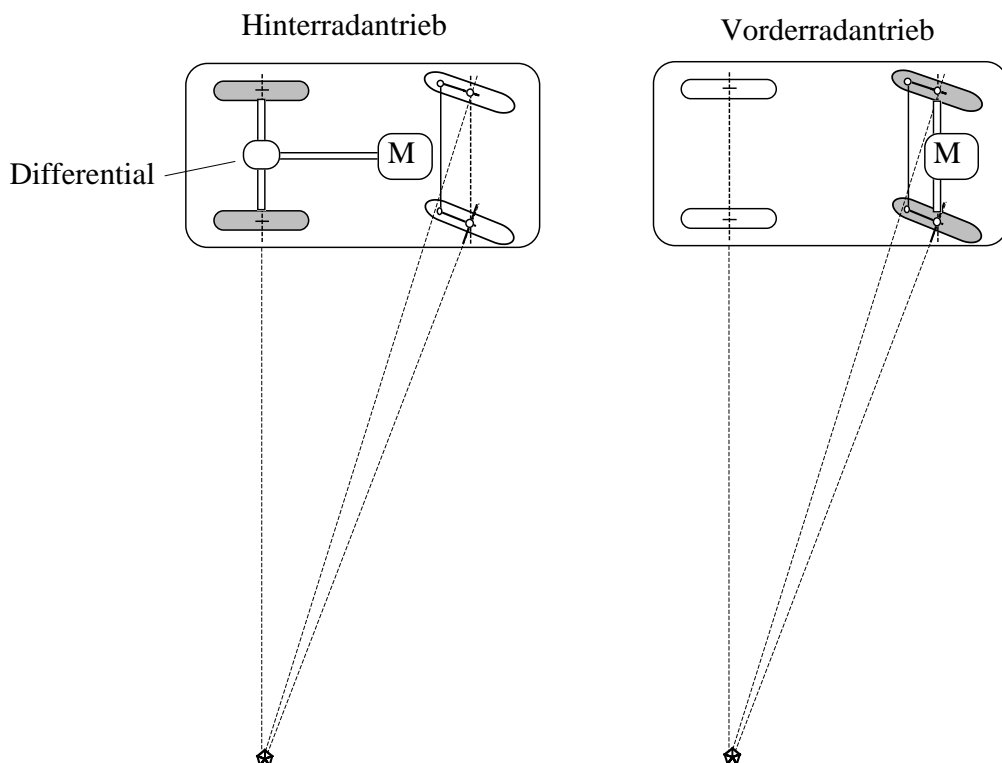
Für statisch stabile Fahrzeuge braucht man mindestens drei Räder.

Häufige Anordnungen:

- Zwei angetriebene Räder auf einer Achse mit dem kinematischen Zentrum in der Mitte mit einem oder zwei passiv mitlaufenden Stützrädern, die sich frei drehen können. Steuerung durch verschiedene Geschwindigkeit der angetriebenen Räder.
- Ein angetriebenes und gelenktes Rad mit zwei passiv mitlaufenden starren Rädern mit dem kinematischen Zentrum in der Mitte der starren Räder.

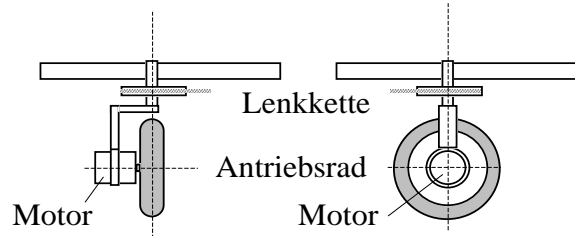
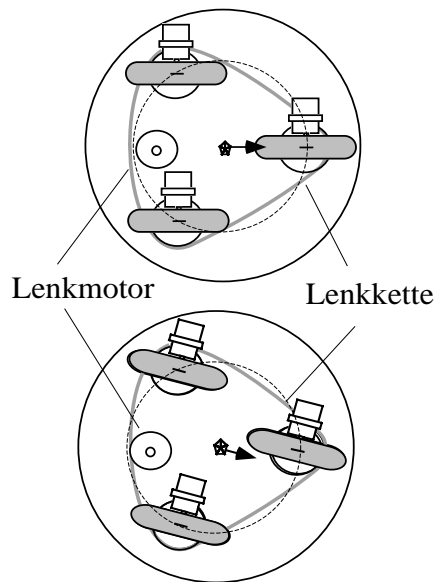


- Zwei starre angetriebene (Hinter)Räder und zwei parallel geführte Lenkräder. Bei Kurvenfahrten muss der Antrieb der Hinterräder über ein Differential geführt sein. Damit wird der Ausgleich der Geschwindigkeiten erzwungen (Hinterradantrieb).
- Zwei angetriebene und gelenkte parallel geführte Räder (Vorderradantrieb) und dazu zwei starre passiv mitlaufende Hinterräder.



2.1.1.2. Radantriebe

**Synchrodrive:** drei oder mehr angetriebene Räder, synchron gelenkt

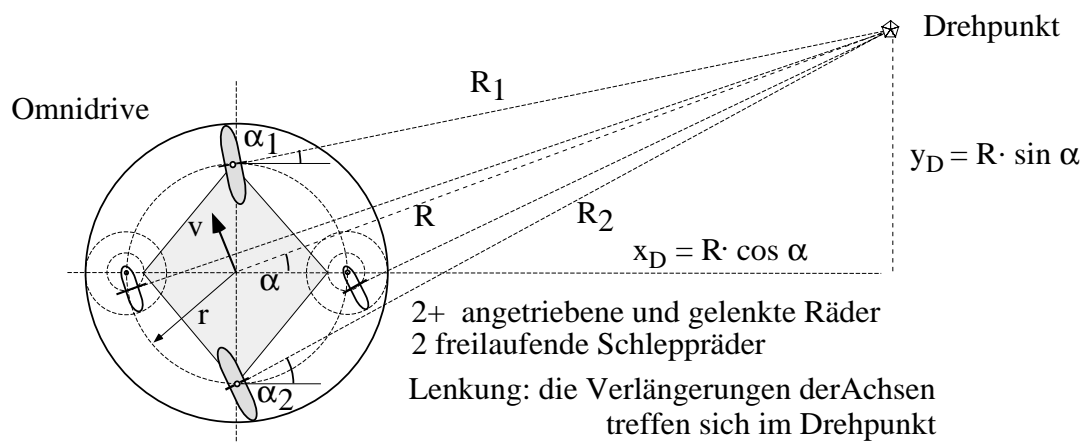


die Antriebsmotore sind synchronisiert  
 die Räder über eine Kette (Zahnriemen) synchron gelenkt  
 ==> das Chassis dreht sich nicht mit  
 Fahrzeug kann in jede Richtung fahren

Viele kommerzielle Plattformen für AMR's haben diese Anordnung (z. B. Nomad) häufig noch mit einem drehbaren Oberteil, um volle drei Freiheitsgrade zu haben.

**Omnidirektionale Fahrzeuge: 3 dof**

Mit mindestens zwei angetriebenen und unabhängig gelenkten Rädern und einem oder mehreren passiv mitlaufenden Stützrädern lässt sich ein omnidirektionales Fahrzeug bauen, das sich in drei Freiheitsgraden in der Ebene bewegen kann.



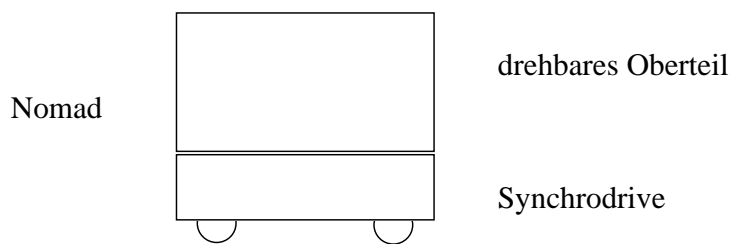
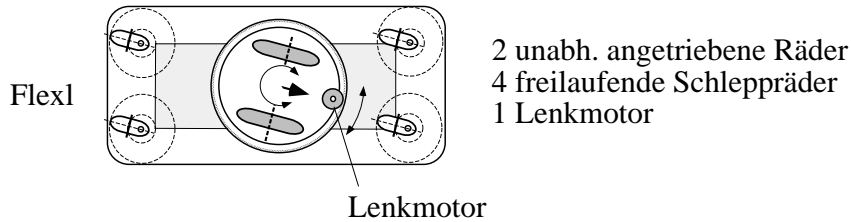
2+ angetriebene und gelenkte Räder  
 2 freilaufende Schleppräder  
 Lenkung: die Verlängerungen der Achsen treffen sich im Drehpunkt

gegeben:  $R, \alpha, v$

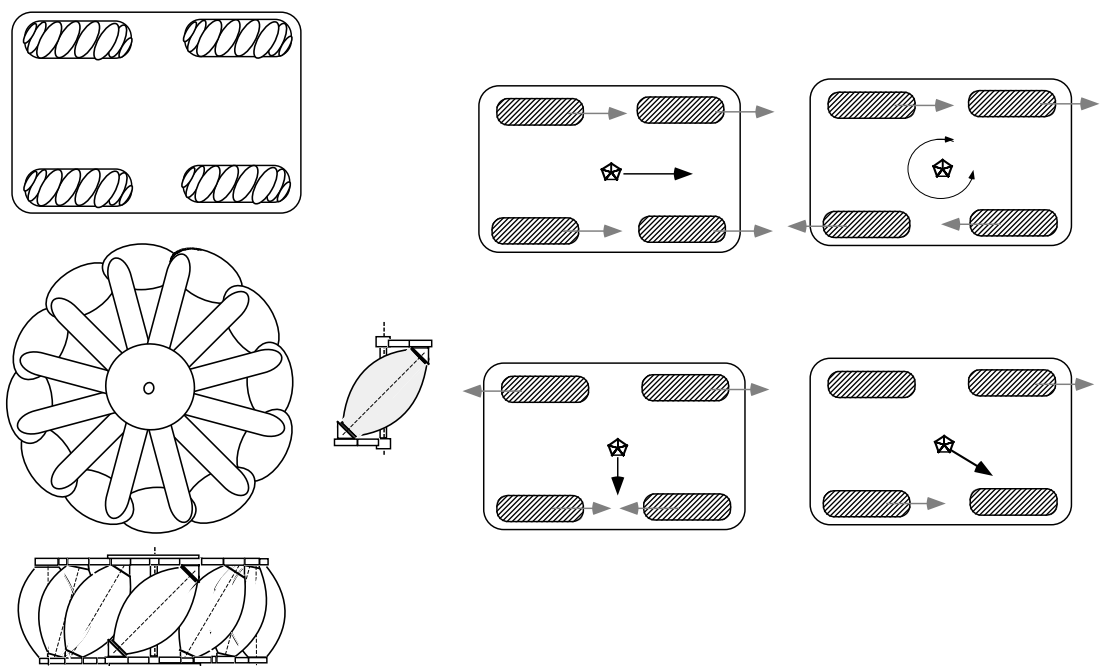
$$\Rightarrow \begin{aligned} \text{tg } \alpha_1 &= \frac{R \cdot \sin \alpha - r}{R \cdot \cos \alpha} = \frac{y_D - r}{x_D} & R_1 &= R \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_1} \\ \text{tg } \alpha_2 &= \frac{R \cdot \sin \alpha + r}{R \cdot \cos \alpha} = \frac{y_D + r}{x_D} & R_2 &= R \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_2} \end{aligned} \quad v_i = v \cdot \frac{R_i}{R}$$



Eine andere Anordnung sieht zwei angetriebene starre Räder vor in einem Drehgestell, das mit einem Lenkmotor gegen den Fahrzeugrahmen gedreht werden kann (z. B. der Flexl, IPA, Stuttgart). Der Fahrzeugrahmen wird von gefederten Stützrädern so getragen, dass das Antriebsradpaar stets Bodenkontakt hat.



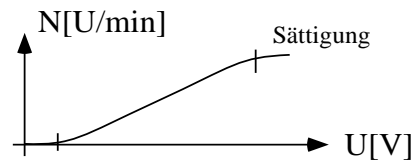
Eine weitere Art des Antriebs für ein omnidirektionales Fahrzeug sind 4 **Mecanumräder**. Es sind dies Räder mit freilaufenden balligen Walzen unter  $45^\circ$  parallel zur Achse auf dem Umfang des Rades. Mit zwei Paaren parallel angeordneten Rädern, die unabhängig angetrieben sind, kann ein Fahrzeug omnidirektional bewegt werden. Wegen der kleinen Durchmesser der Ballen, die die Übersteigfähigkeit begrenzen, muss der Untergrund glatt sein. Beim Seitwärtsfahren reiben die Räder auf dem Boden und beanspruchen den Bodenbelag. Die Anordnung ist günstig für langsame Fahrzeuge (z. B. Priamos, Uni Karlsruhe).



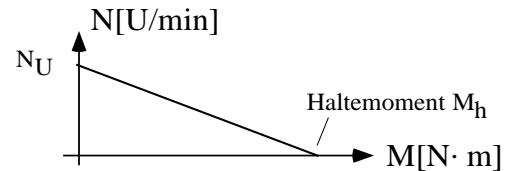
2.1.1.3. Motore

- Gleichstrommotore

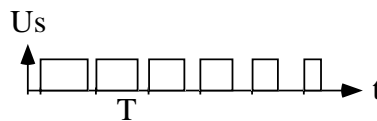
Drehzahl  $\sim$  Motorspannung  
(Drehmoment konstant)



Drehzahl  $\sim$  ( $M_h - M$ )  
(Motorspannung konstant)



Ansteuerung: Pulsbreitenmodulation



zugeführte Leistung  $\sim$  Puls/Pause-Verhältnis

Periodendauer  $T \ll$  Dauer einer Umdrehung  $\implies$  Integration über Impulse

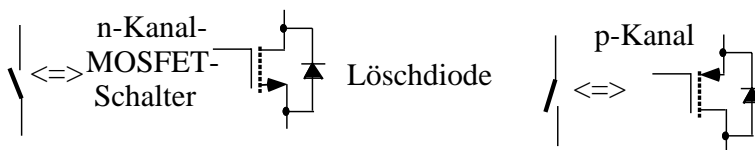
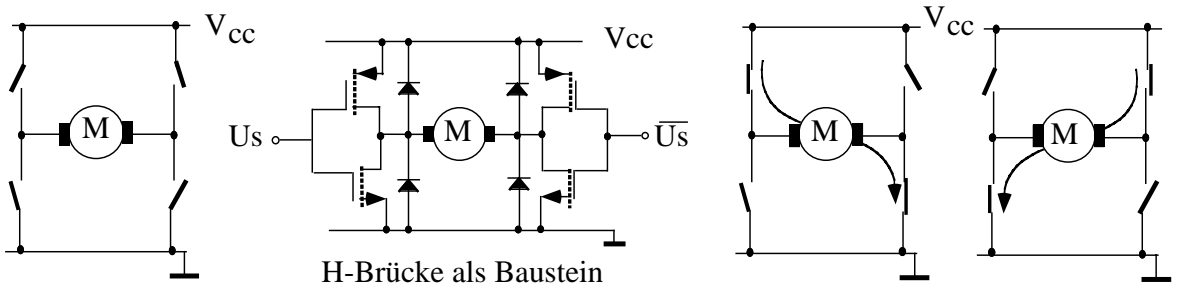
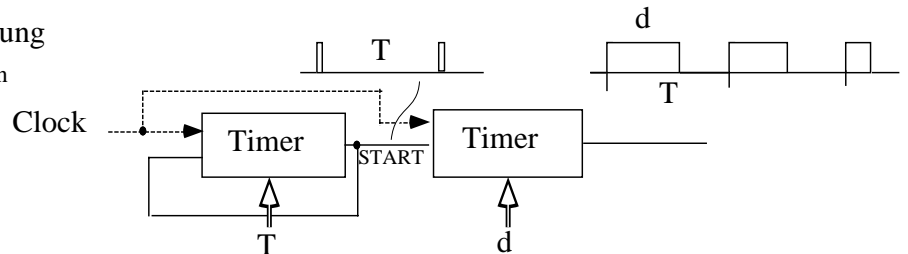
Umdrehungszahl : 3000 - 12.000 U/min ( kleine E-Motore, Leerlauf )

50 - 200 U/s

Periode  $\tau$  20 - 5 ms

Impulsbreitensteuerung

pulse width modulation  
PWM

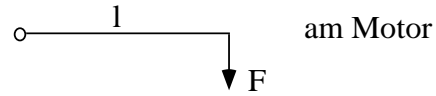


Getriebe für Gleichstrommotore

Drehmoment  $M = l \cdot F$  [N· m]

Drehzahl des Motors  $N$  [U/min]

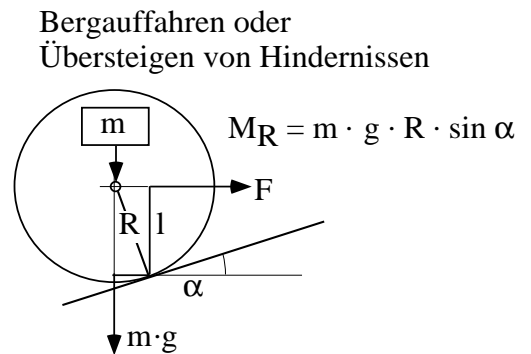
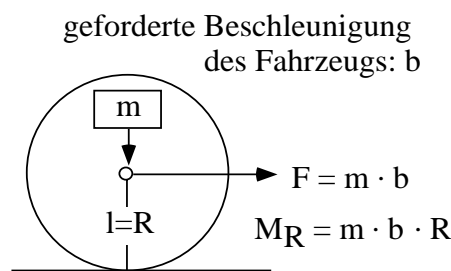
Getriebe mit Untersetzung  $n \implies$  am Rad



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Drehmoment } M_R = n \cdot M \\ \text{Drehzahl } N_R = N/n \end{array} \right.$$

( mehrstufige Planetengetriebe oder harmonische Getriebe ),  $n = 5 \dots 500$

nötiges Drehmoment  $M_R$  am Rad :



- Schrittmotore  
impulsgetrieben, pro Impuls Drehung um festen Winkel  $0,5^\circ - 5^\circ$ , max. 2000 Impulse/s  
Vorteil: präzise Winkeleinstellung der Achse in festen Raststellungen  
Nachteile: komplexe Ansteuerung, hoher Energieverbrauch im Stillstand
- Wechselstrommotore für AMR's nicht unbedingt günstig  
Wechselstrom 220 V (kleinere Motore)  
Drehstrom 3 x 380 V (größere Leistungen)
- Verbrennungsmotore  
nur für Anwendungen im Freien, dann effektiv und günstig (Auto!)

Servomotore

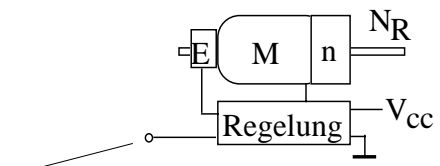
Motor + Getriebe + Encoder + Regelung

$\implies$  Winkel  $\sim$  Steuerspannung

Antriebsblöcke

Motor + Getriebe + Encoder + Regelung

$\implies$  Drehzahl  $\sim$  Steuerspannung unabh. von Last



Probleme bei Servomotoren und Antriebsblöcken:

Aufbringen eines Haltemoments (ungünstigster Fall für E-Motore)

Getriebeispiel: der Motor dreht sich schon, ohne dass das Getriebe sich rührt

Abhilfe: Encoder am Getriebeausgang, sein Ausgang wird auf die Regelung aufgeschaltet

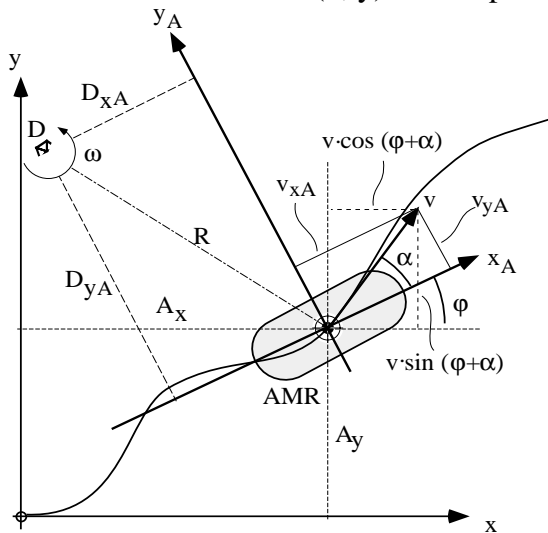
Harmonic Drive Getriebe: hohe Untersetzung, praktisch spielfrei

2.1.1.4.  $(v, \omega)$  - Schnittstelle

gegeben:  $v = (v_x(t), v_y(t))_A$  im roboterfesten Koordinatensystem  $(x_A, y_A)$  und  $\omega(t)$

der Roboter hat Koordinaten  $(A_x, A_y, \varphi)$  in Weltkoordinaten

Bahn  $f(x, y)$  im Zeitpunkt  $t_i$  bestimmt durch



$$\varphi(t_i) = \int_0^{t_i} \omega(t) dt$$

$$x(t_i) = \int_0^{t_i} v(t) \cdot \cos(\varphi(t) + \alpha(t)) dt$$

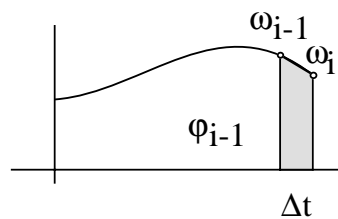
$$y(t_i) = \int_0^{t_i} v(t) \cdot \sin(\varphi(t) + \alpha(t)) dt$$

bei  $t = 0$  sei  $A_x = A_y = 0$  und  $\varphi = \alpha = 0$

$$v(t) = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2} \quad \text{tg } \alpha = \frac{v_y}{v_x}$$

$v(t), \omega(t), \alpha(t)$  alle  $\Delta t$  gemessen  $\implies \{v_i\}, \{\omega_i\}, \{\alpha_i\}$

$\Delta t$  bestimmt durch Abtasttheorem nach oben und Datenrate nach unten  
numerische Integration zur Bestimmung von  $\varphi(t), x(t)$  und  $y(t)$



$\varphi(t_i) \rightarrow \{\varphi_i\}$  mit  $\varphi_i \approx \varphi_{i-1} + (\omega_{i-1} + \omega_i) \cdot 1/2$  (Trapezregel)

$x(t_i) \rightarrow \{x_i\}$  mit  $x_i \approx x_{i-1} + (v_{i-1} \cdot \cos(\varphi_{i-1} + \alpha_{i-1}) + v_i \cdot \cos(\varphi_i + \alpha_i)) \cdot 1/2$

$y(t_i) \rightarrow \{y_i\}$  mit  $y_i \approx y_{i-1} + (v_{i-1} \cdot \sin(\varphi_{i-1} + \alpha_{i-1}) + v_i \cdot \sin(\varphi_i + \alpha_i)) \cdot 1/2$

Gegebenenfalls genauere Interpolationsformeln der numerischen Mathematik verwenden.

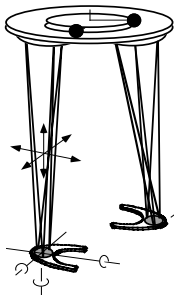
## 2.1.2. Gehmaschinen

Beinanzahl

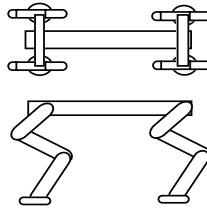
- 1 Hüpfmaschine
- 2 Laufen und Treppensteigen
- 4 Laufen, traben, gallopiere
- 6 Insektenartige Maschinen
- 8 Spinnenartige Maschinen
- 10+ Tausendfüßler, Raupen

### 2.1.2.1. Beinordnungen

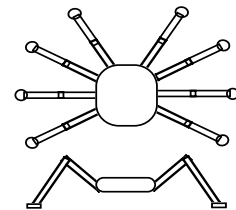
• 2 Beine



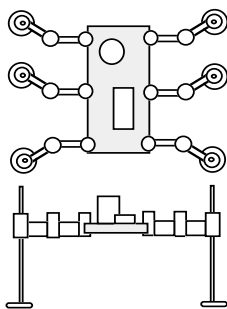
• 4 Beine



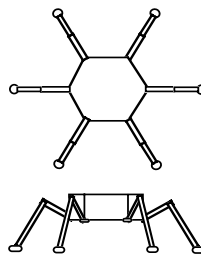
• 8 Beine, Spinnenartig



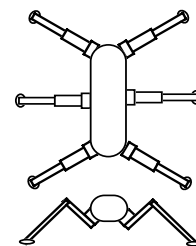
• 6 Beine Scara-Typ



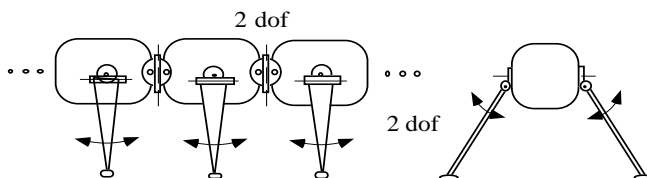
• 6 Beine symmetrisch



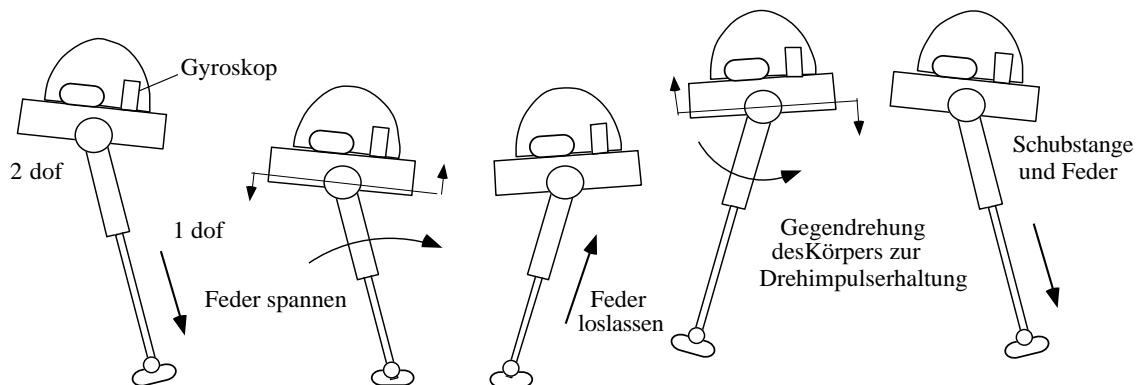
• 6 Beine, Insektenartig



• Tausendfüßler

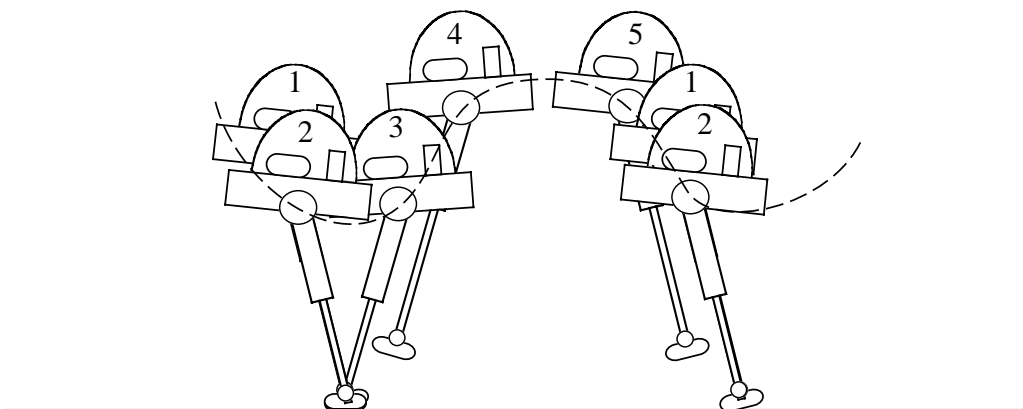


• Hüpfmaschine ( Raibert,1985)



Eine einbeinige Hüpfmaschine braucht ein "Gleichgewichtsorgan" z. B. ein Gyroskop, um die Lage des Körpers im Raum zu erfassen. Die Bewegung wird durch eine Schubstange eingeleitet, die zugleich mit dem Ausfahren eine Feder entriegelt, die beim Auftreffen auf dem Boden teilweise die kinetische Energie aufnimmt. Der Körper wird gegen das Bein so gedreht, dass er praktisch horizontal bleibt. Kleine Kippbewegungen steuern die Richtung des Hüpfens; die Amplitude der Schubstange steuert die Sprungweite.

Überblendung der Bewegung



### 2.1.2.2. Arten der Gelenke

Ein Bein einer Laufmaschine braucht mindestens einen Freiheitsgrad, wenn es sich nur im Kreis bewegt und Kontakt mit dem Boden hat während einer Stemmphase und dann wieder abhebt zum nächsten Schritt (manche Spielzeuge bewegen sich so).

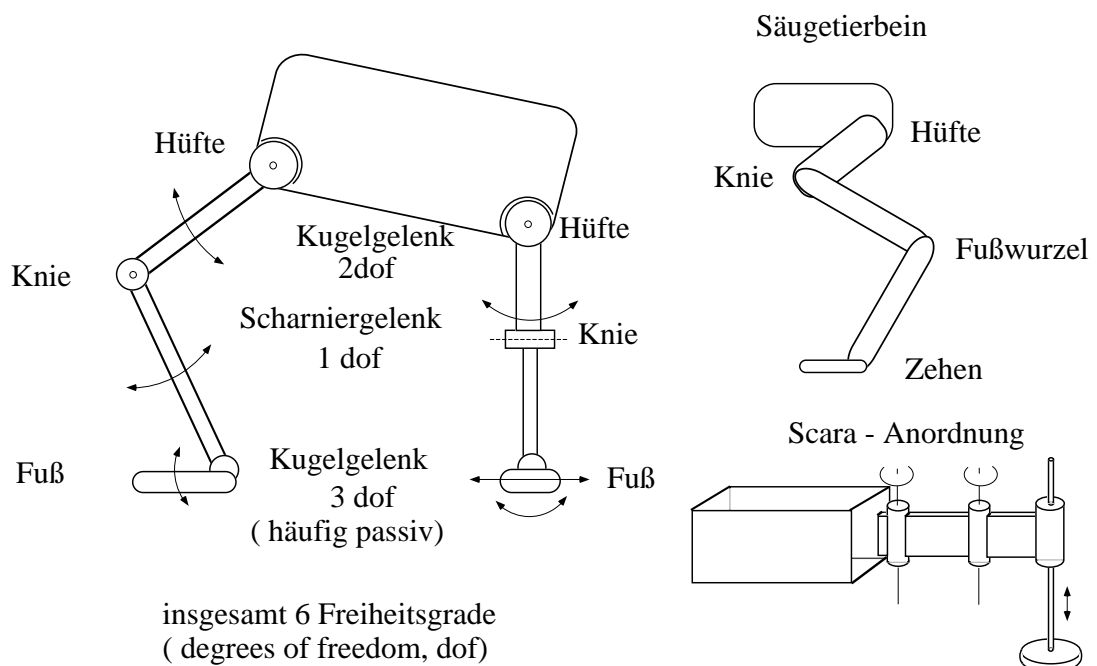
Mit zwei Freiheitsgraden kann ein Bein

- während der Stemmphase gestreckt bleiben und Bodenkontakt halten
- während der Schwingphase vom Boden abheben und zurückbewegt werden.

Mit drei Freiheitsgraden kann ein Bein zusätzlich vom Körper abgespreizt werden (sehr viele Laufmaschinen haben Beine mit drei Freiheitsgraden).

Zusätzliche Freiheitsgrade geben (passive) Gelenke in der Fußwurzel.

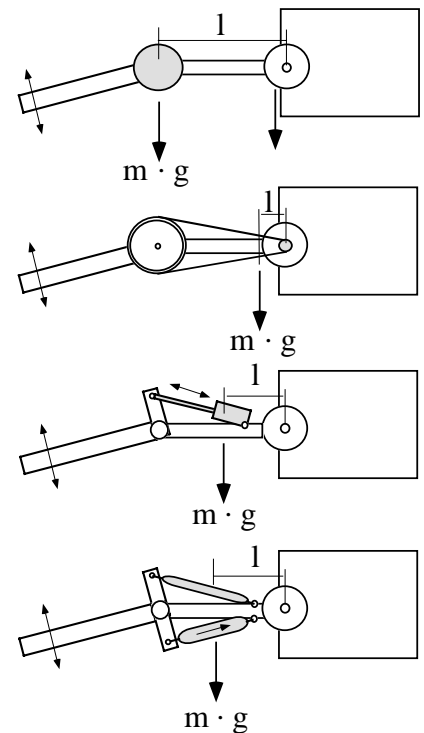
Tiere haben in der Hüfte zwei, im Knie einen und im Fuß drei Freiheitsgrade.



### 2.1.2.3. Beinantriebe

Antrieb der Gelenke durch

- Gleichstrommotore mit harmonischem Getriebe im Gelenk ( Direktantrieb)
  - + präzise;
  - hohe Drehmomente durch Gewicht des Antriebs
- Seilzüge mit Motoren im Körper
  - + geringe Drehmomente durch Gewicht;
  - nicht präzise
- doppelwirkende Schubstange
  - + große Kräfte,
  - + Gewicht des Antriebs nahe Körper
- einfach wirkende Zugantriebe
  - + geringes Gewicht,
  - + große Kräfte,
  - langsam



2.1.2.4. Antriebe der Gelenke

Elektromotor mit harmonischem Getriebe

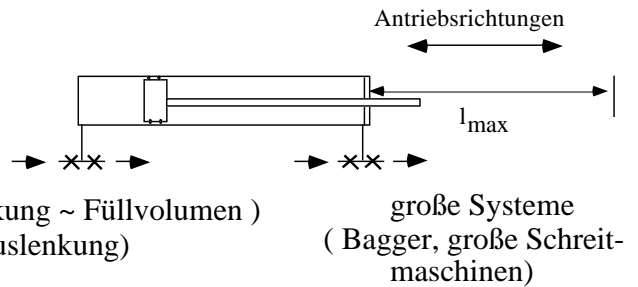
+ präziser, fast spielfreier Direktantrieb: Motor und Getriebe im Gelenk eingebaut

- Gelenke mit hohem Gewicht

Doppelt wirkende Schubstangen

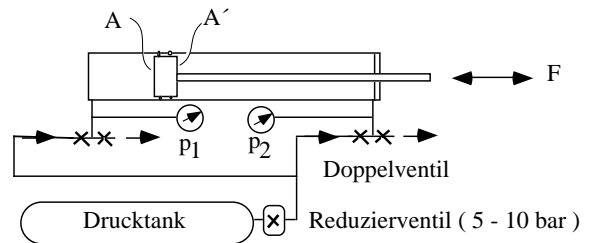
• Hydraulikzylinder

- + sehr kräftig ( kN )
- hohe Drucke ( 100 bar )
- keine Federwirkung ( Auslenkung ~ Füllvolumen )
- o mäßig schnell ( 1 - 10 s Vollausslenkung )



• Pneumatikzylinder

- + federnde Wirkung
- + Federkonstante einstellbar
- + recht schnell ( 0.1 s )
- Kräfte nicht sehr groß
- stark nichtlinear

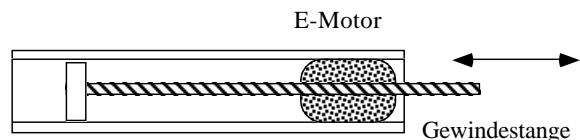


$$F = A \cdot p_1 - A' \cdot p_2 \quad A \approx A' \implies F \approx \Delta p$$

Federkonstante bei  $\Delta p = \text{const}$  durch Absolutdruck einstellbar

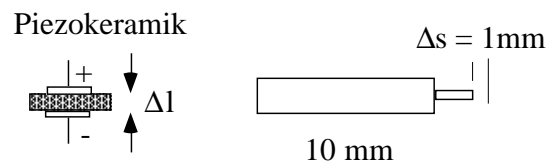
• Schraubenge triebe

- + relativ kräftig
- + präzise ( 100 - 10  $\mu\text{m}$  )
- relativ langsam (  $\sim 1\text{s}$  )
- steif ( Weg  $\sim$  # Umdrehungen des Motors )



• Miniatur-Linearmotor

- + sehr präzise (  $\pm \text{nm}$  )
- + sehr klein
- nicht kräftig
- steif



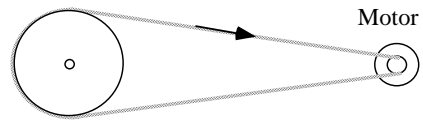
Schrittweiten von  $\sim 1 \text{ nm}$   
Antrieb mit Impulsen



## Zuggetriebe

- Seilzüge

- + einfache Übersetzung
- Durchhängen des Seils
- Totbereich durch Seildehnung



- pneumatische Muskeln

Diagonalgewebe  
auf dünnem Gummischlauch  
Aufblasen ==> Verkürzung

- + leicht
- + relativ kräftig ( $F \sim l \cdot d$ )
- + schnell ( Kontraktion in 0,1 s)
- + nachgiebig
- stark nichtlinear
- paarweise für ein Gelenk nötig  
( Strecker und Beuger )

