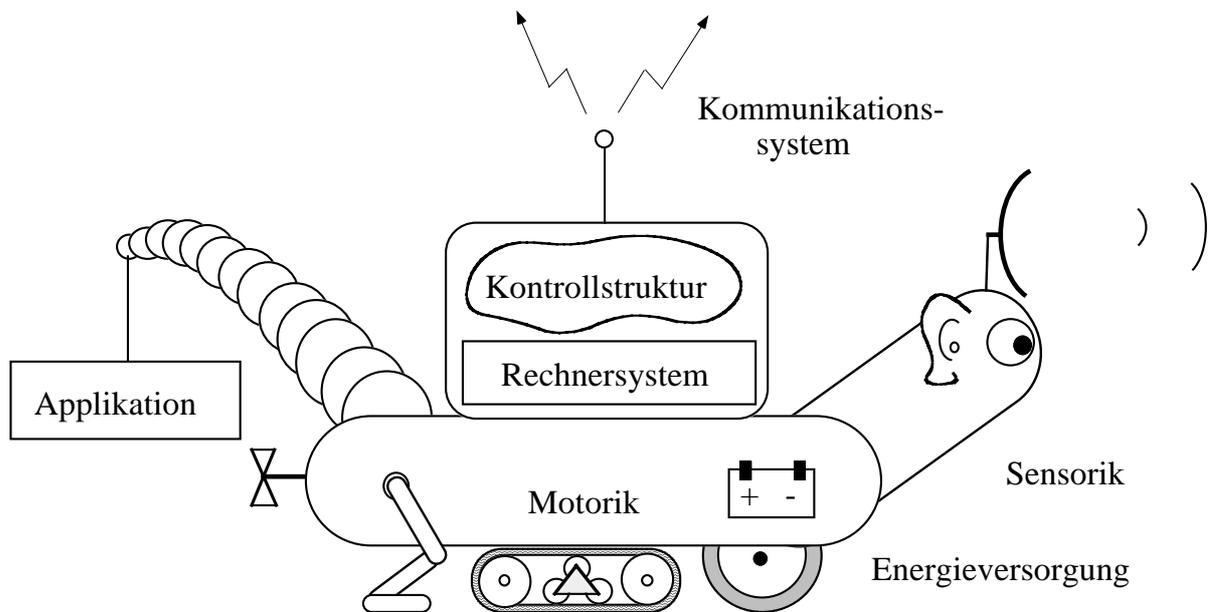


Kapitel 2

Komponenten eines AMR



2.1.	Motorik	20
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 , ω) - 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
2.2.	Sensorik	32
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
2.3.	Energieversorgung	70
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
2.4.	Rechnersystem	74
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
2.5.	Kontrollstruktur	82
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
2.6.	Kommunikation nach außen	96
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
2.7.	Applikation	98
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 (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

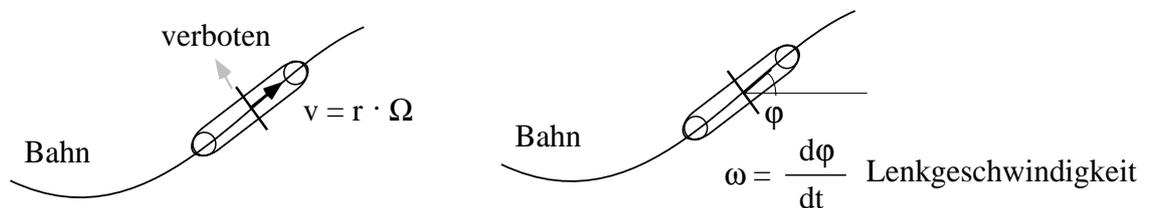
Antrieb durch Räder oder Kettenantrieb

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

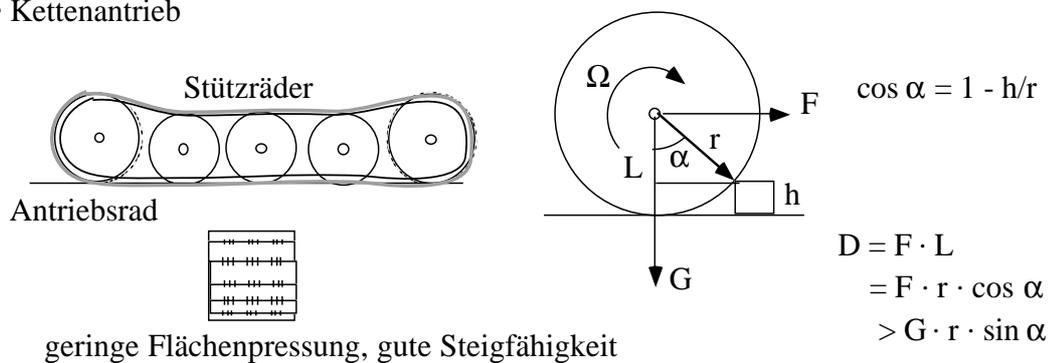
abrollendes Rad ==> Zwangsbedingung: nur Bewegung senkrecht zur Achse erlaubt

Kennzeichnung der Bewegung durch Linear- und Lenkgeschwindigkeit v und ω

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

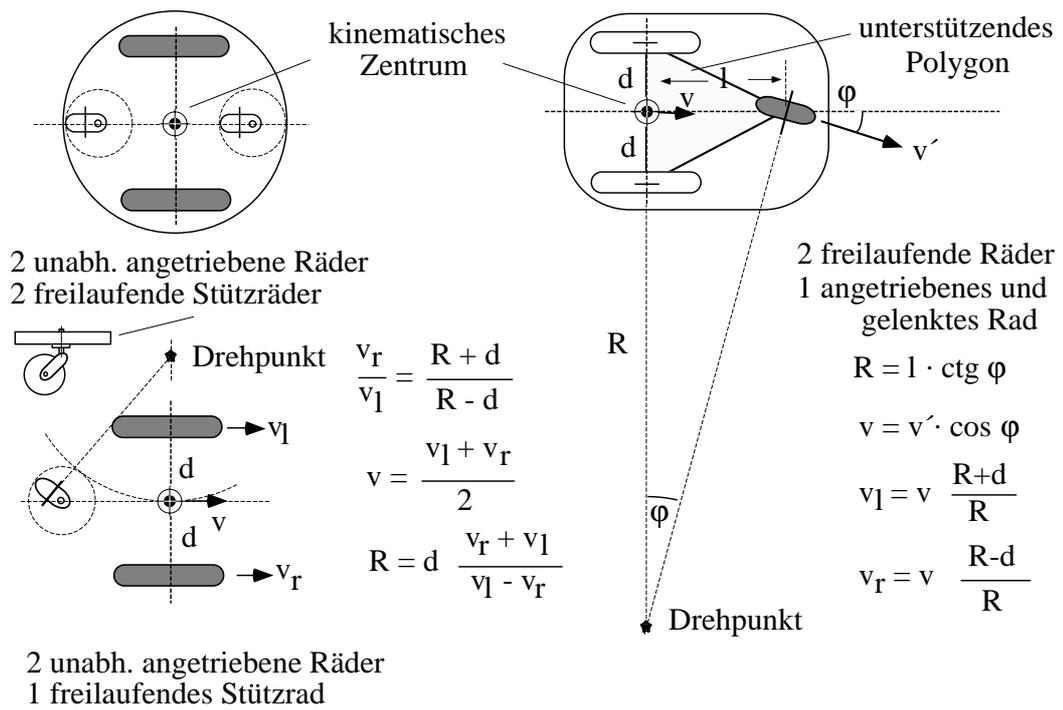
Kettenantriebe sind für unebenes Gelände geeignet; Spezialkonstruktionen können Treppen steigen.

2.1.1.1. Radanordnungen

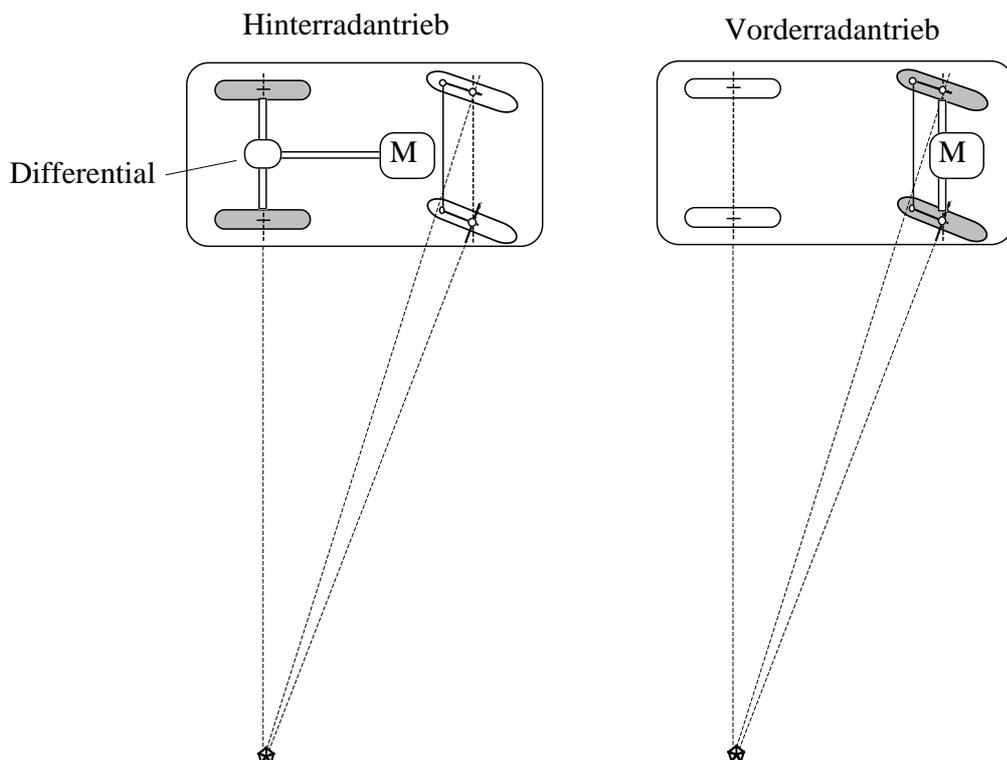
Für statisch stabile Fahrzeuge braucht man mindestens drei Räder.

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.

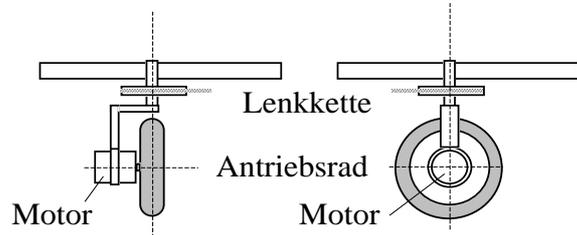
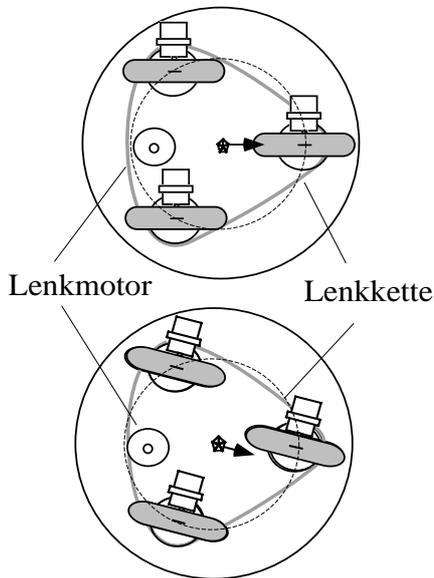


- Zwei starre angetriebene (Hinter)Räder und zwei parallel geführte Lenkräder. Bei Kurvenfahrten muss der Antrieb der Hinterräder über ein Differential geführt sein. Damit wird der Ausgleich der Geschwindigkeiten erzwungen (Hinterradantrieb).
- Zwei angetriebene und gelenkte parallel geführte Räder (Vorderradantrieb)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



2.1.1.2. Radantriebe

Synchrodrive: drei oder mehr angetriebene Räder, synchron gelenkt

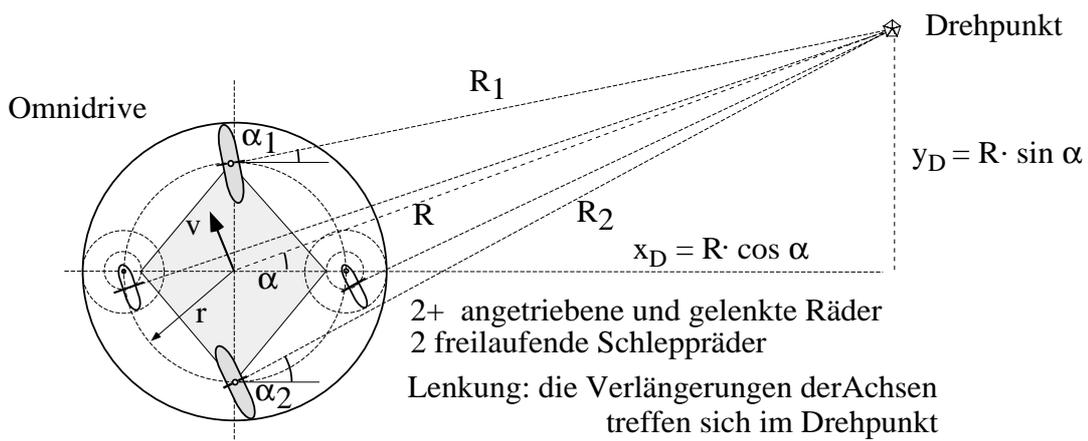


die Antriebsmotore sind synchronisiert
 die Räder über eine Kette (Zahnriemen) synchron gelenkt
 ==> das Chassis dreht sich nicht mit
 Fahrzeug kann in jede Richtung fahren

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.

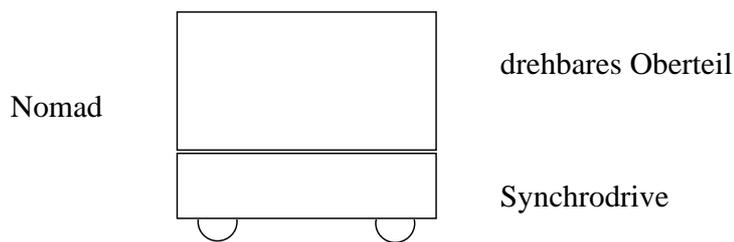
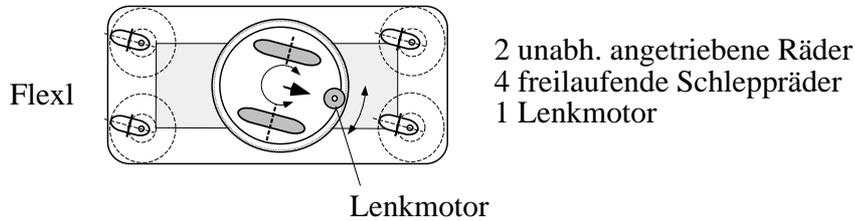


2+ angetriebene und gelenkte Räder
 2 freilaufende Schleppräder
 Lenkung: die Verlängerungen der Achsen treffen sich im Drehpunkt

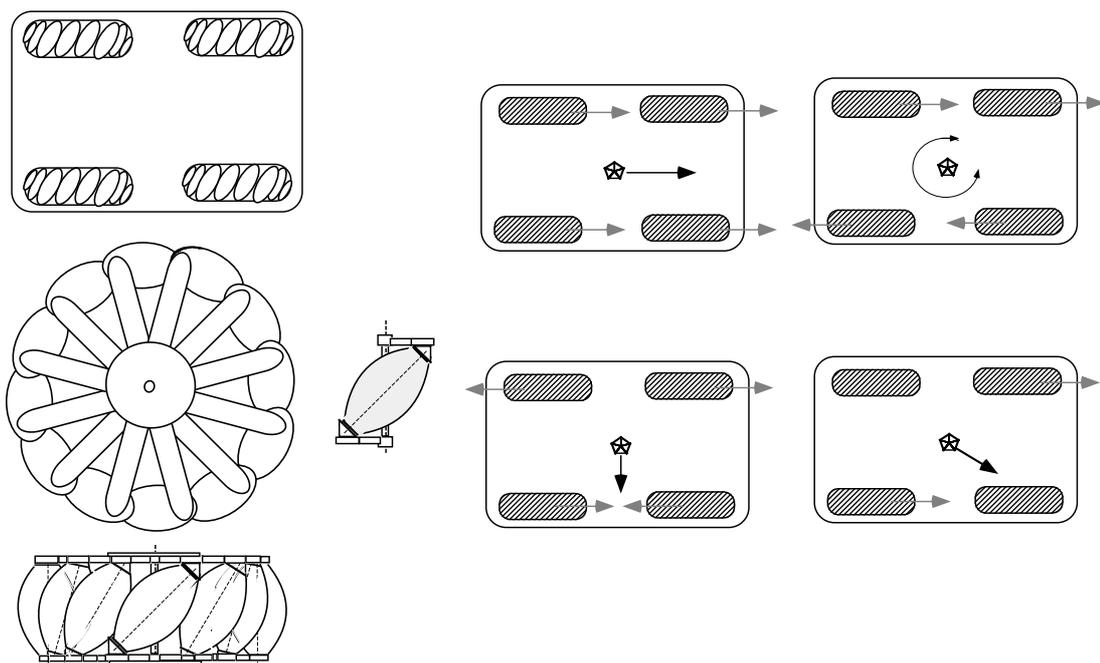
gegeben: R, α, v

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

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.



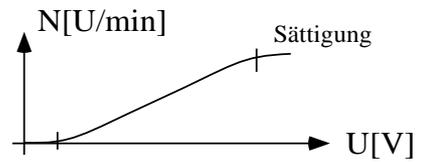
Eine weitere Art des Antriebs für ein omnidirektionales Fahrzeug sind 4 **Mecanumräder**. Es sind dies Räder mit freilaufenden balligen Walzen unter 45° parallel zur Achse auf dem Umfang des Rades. Mit zwei Paaren parallel angeordneten Rädern, die unabhängig angetrieben sind, kann ein Fahrzeug omnidirektional 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).



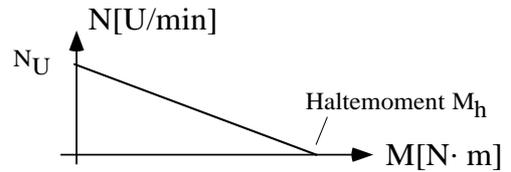
2.1.1.3. Motore

- Gleichstrommotore

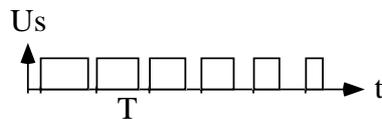
Drehzahl \sim Motorspannung
(Drehmoment konstant)



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

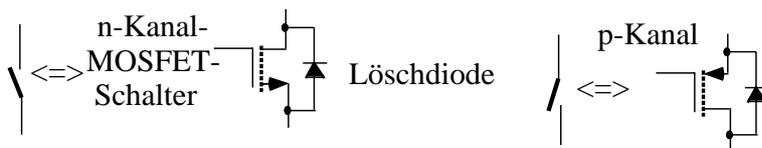
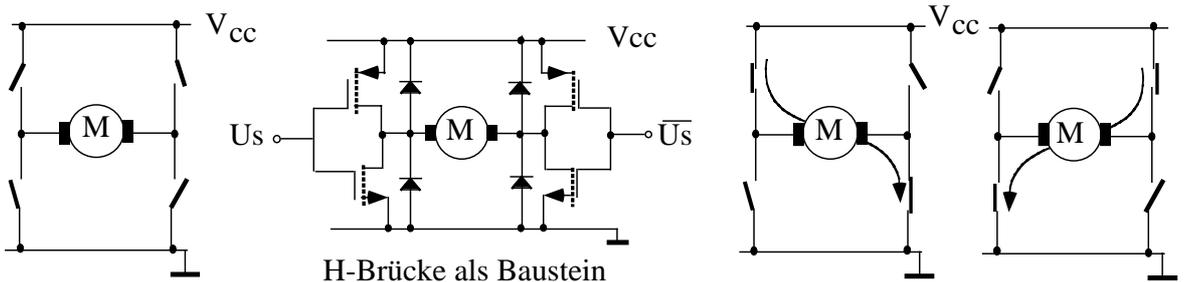
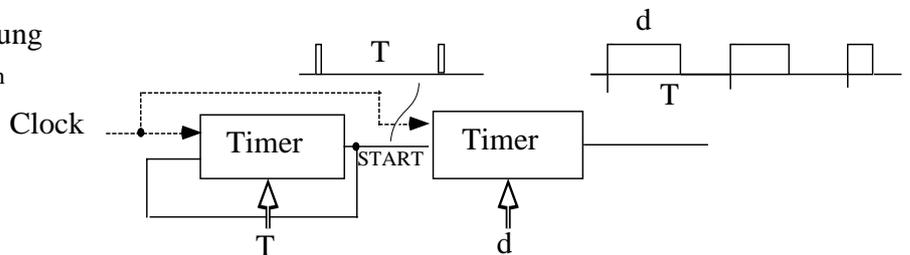
Umdrehungszahl : 3000 - 12.000 U/min (kleine E-Motore, Leerlauf)

50 - 200 U/s

Periode τ 20 - 5 ms

Impulsbreitensteuerung

pulse width modulation
PWM

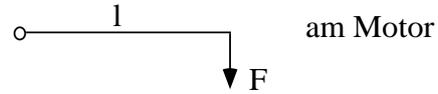


Getriebe für Gleichstrommotore

Drehmoment $M = l \cdot F$ [N· m]

Drehzahl des Motors N [U/min]

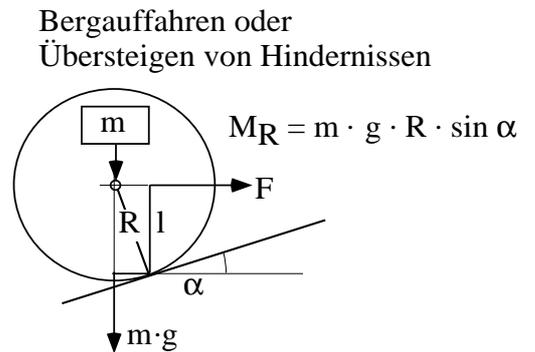
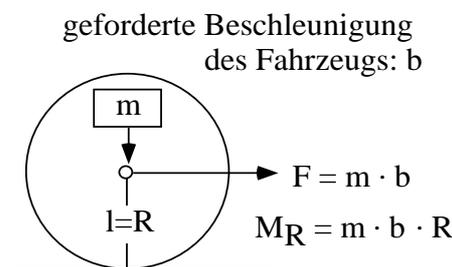
Getriebe mit Untersetzung $n \implies$ am Rad



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

(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

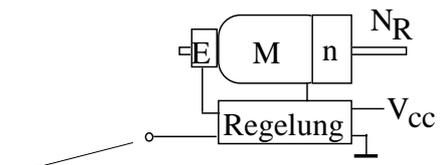
Motor + Getriebe + Encoder + Regelung

\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

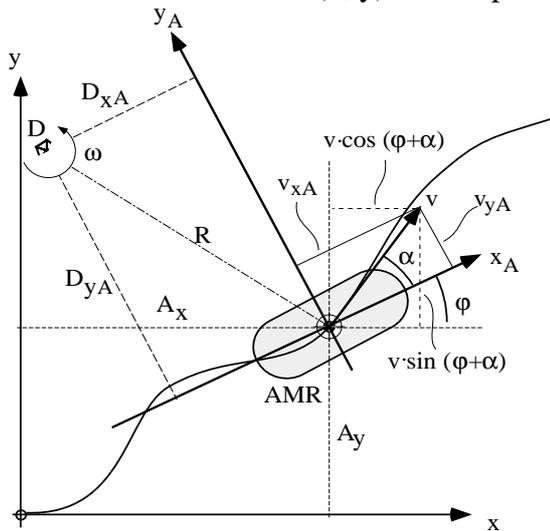
Harmonic Drive Getriebe: hohe Untersetzung, praktisch spielfrei

2.1.1.4. (v, ω) - 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, φ) in Weltkoordinaten

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



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

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

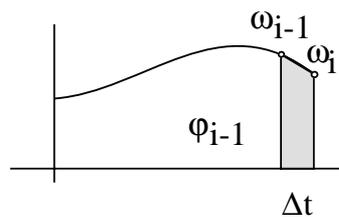
$$y(t_i) = \int_0^{t_i} v(t) \cdot \sin(\varphi(t) + \alpha(t)) dt$$

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 Δt gemessen $\implies \{v_i\}, \{\omega_i\}, \{\alpha_i\}$

Δt 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.

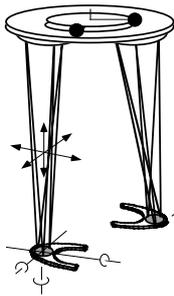
2.1.2. Gehmaschinen

Beinanzahl

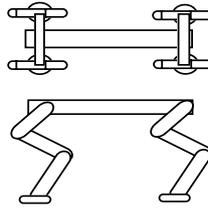
- 1 Hüpfmaschine
- 2 Laufen und Treppensteigen
- 4 Laufen, traben, gallopiere
- 6 Insektenartige Maschinen
- 8 Spinnenartige Maschinen
- 10+ Tausendfüßler, Raupen

2.1.2.1. Beinordnungen

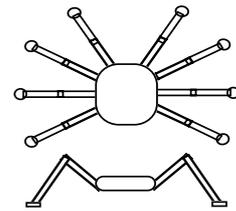
• 2 Beine



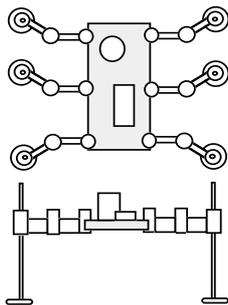
• 4 Beine



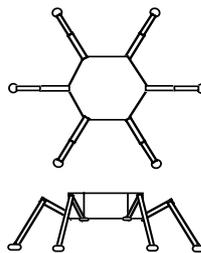
• 8 Beine, Spinnenartig



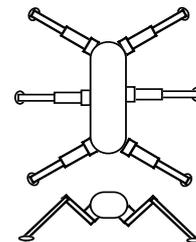
• 6 Beine Scara-Typ



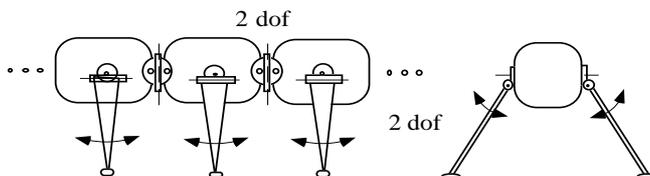
• 6 Beine symmetrisch



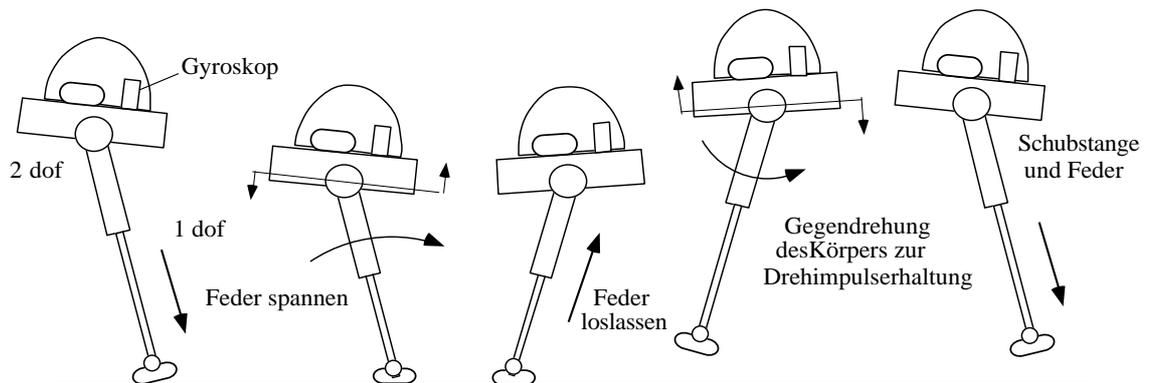
• 6 Beine, Insektenartig



• Tausendfüßler

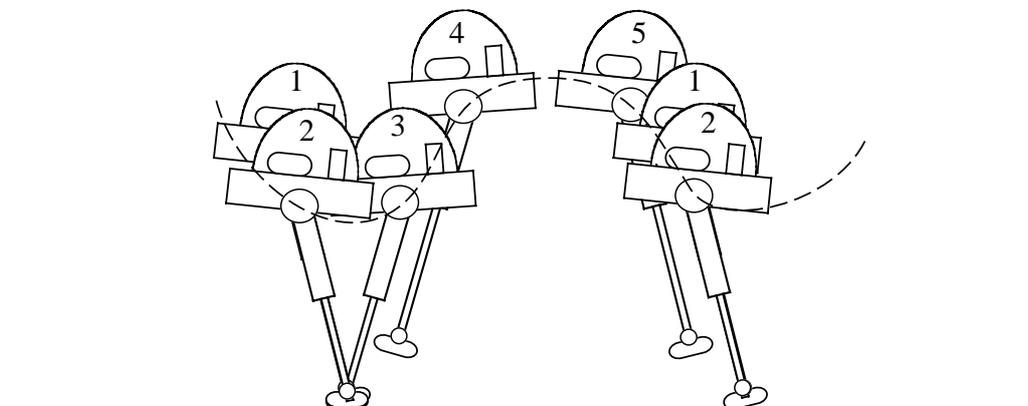


• Hüpfmaschine (Raibert,1985)



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).

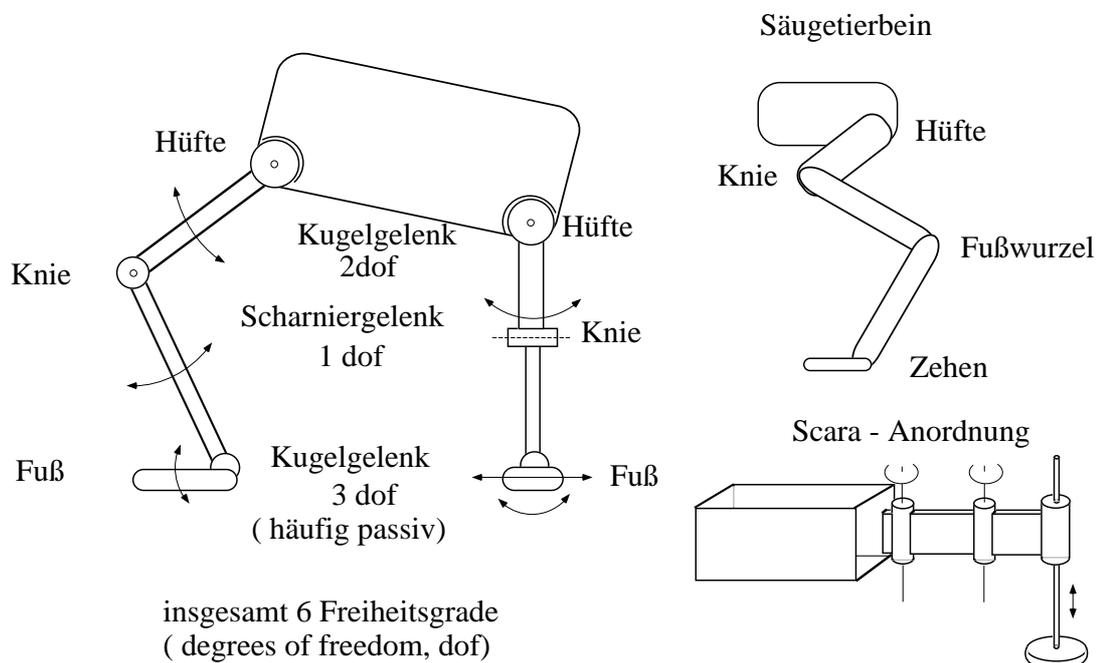
Mit zwei Freiheitsgraden kann ein Bein

- 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.

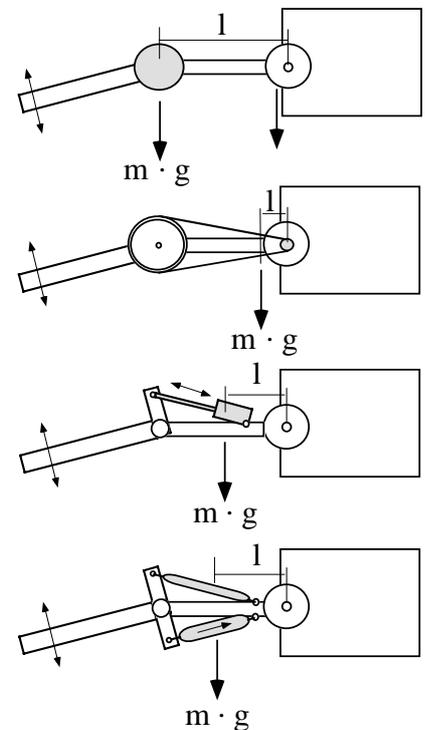
Tiere haben in der Hüfte zwei, im Knie einen und im Fuß drei Freiheitsgrade.



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

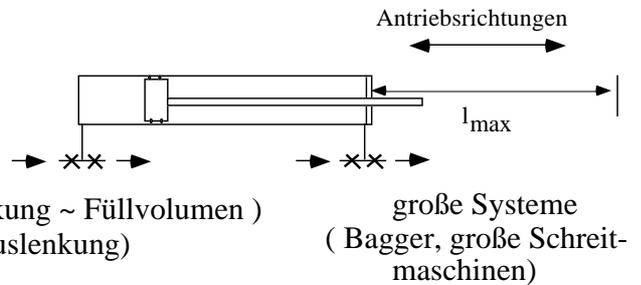
+ präziser, fast spielfreier Direktantrieb: Motor und Getriebe im Gelenk eingebaut

- Gelenke mit hohem Gewicht

Doppelt wirkende Schubstangen

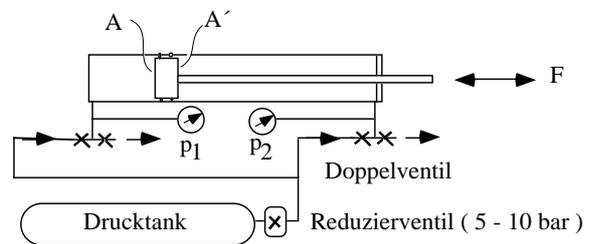
• **Hydraulikzylinder**

- + 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

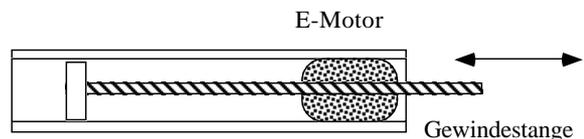


$$F = A \cdot p_1 - A' \cdot p_2 \quad A \approx A' \implies F \approx \Delta p$$

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

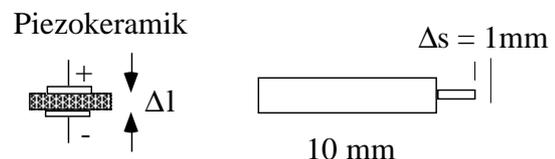
• **Schraubenge triebe**

- + relativ kräftig
- + präzise (100 - 10 μm)
- 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)

