

Kapitel 2. Sensorik

1. Zum Einstieg: Worum geht es?

2. **Sensorik**

3. Sensordatenverarbeitung

4. Fortbewegung

5. Lokalisierung in der Umgebung

6. Kartierung

7. Navigation

8. Umgebungsdateninterpretation

9. Roboterkontrollarchitekturen

Ausblick

2.1 Allgemeines

2.2 Bewegungsmessung

2.3 Ausrichtungsmessung

2.4 Globale Positionsbestimmung

2.5 Entfernungsmessung

2.6 Kameras und Kameramodelle

2.1 Allgemeines

„Nihil est in intellectu quod non prius fuerit in sensu.“
John Locke (u.a.)

- „Robotik“ in dieser Vorlesung betont die algorithmische, KI- und symbol-orientierte Seite von AMRn
- Auch wenn das der Schwerpunkt ist — Wissen über Sensoren, Aktuatoren, Prozessoren, Systemprogrammierung ist erforderlich!
- Ceterum censeo: So einfach wie Locke dachte, ist es auch nicht!

„Roboter gibt es nur am Stück!“
Rolf Pfeiffer

Grobklassifikation

- **propriozeptiv** vs. **exterozeptiv** („nach innen“–„nach außen“)
 - propriozeptiv: Miss Aspekte des Roboterzustands
 - z.B. Batterieladung, Gelenkwinkel, Radumdrehungen
 - exterozeptiv: Miss Aspekte der Umgebung oder des Verhältnisses Roboter/Umgebung
 - z.B. Außentemperatur, Fahrgeschwindigkeit, Wandabstand
 - keine scharfe Unterscheidung
 - z.B. Radumdrehung/s x Radumfang ~ Fahrgeschwindigkeit
- **aktiv** vs. **passiv**
 - aktiv: Miss Umgebungsantwort auf gesendete „Energie“
 - z.B. Laserscanner, Ultraschallsensoren
 - passiv: Miss Signale/Werte, die „von allein“ kommen
 - z.B. Kamera, Mikrofon
 - praktisch ebenfalls unscharfe Unterscheidung
 - z.B. „Anregung“ der Umgebung durch Blitzlicht

Sensorklassen

Sensor	propriozeptive (P) vs. exterozeptive (E)	aktive (A) vs. passive (P)
Kontaktsensor	E	P
Inkrementalgeber	P	P
Gyroskop	P	P
Kompass	E	P
Gps	E	P
Sonar	E	A
Infrarotsensoren	E	A
Laserscanner	E	A
Kamera	E	P

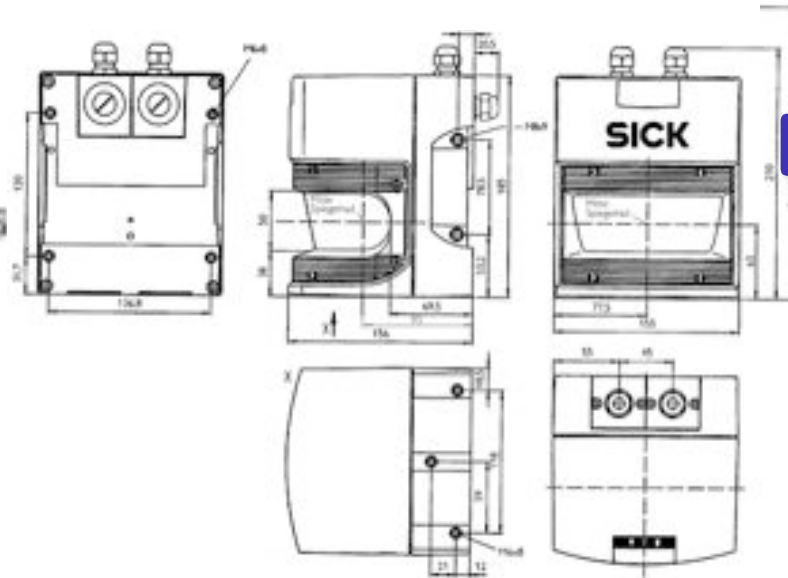
Bspl.1: Ultra- schallsensor (Baumer UNDK 30U6103)



Technische Daten	
Erfassungsbereich Sd	100 - 1000 mm
Auflösung	0,3 mm
Ausgangsschaltung	Analog Spannungsausgang
Baudform	quadrantförmig
Breite / Durchmesser	30 mm
Höhe	65 mm
Tiefe	31 mm
Gehäusematerial	Polyester / Zink Druckguss
Anschlussart	Stecker
Erfassungsbereich Startwert Sdc (Teach-in)	100 - 1000 mm
Erfassungsbereich Endwert Sde (Teach-in)	100 - 1000 mm
Öffnungswinkel typ.	10°
Schallfrequenz	240 kHz
Betriebsspannungsbereich +Vs	15 - 30 VDC
Restwertigkeit	< 10 % Vs
Stromaufnahme	< 35 mA
max. Laststrom	< 20 mA
Ausgang	0 - 10 V / 10 - 0 V
Lastwiderstand +Vs>15V	-
Lastwiderstand +Vs>24V	-
kurzschlussfest	ja
verpolungsfest	ja
Reaktionszeit ton / toff	< 80 ms
Linearität L	-
Wiederholgenauigkeit	< 0,5 mm
Temperaturdrift	< 2% von Objektdistanz So
Arbeitstemperaturbereich	-10 ... +60 °C
Schutzklasse	IP 67
Empfangsanzeige	LED gelb/ LED rot
Einstellung	Teach-in
Einstellhilfe	Objektanzeige blinkt
Anschlussoption	-
mögl. Kabel Dosen	ESW 33, ESG 34

Bspl.2: Laserscanner (SICK LMS 200)

Typ: LMS 200-30106
Bestell-Nr.: 1015850



Technische Daten

Öffnungswinkel:	180 °
Winkelauflösung:	1 ... 0,25 °
Ansprechzeit:	13 ... 53 ms
Auflösung:	10 mm
Systematischer Fehler:	+/- 15 mm
Statistischer Fehler (1 Sigma):	5 mm
Laserkategorie:	1
Schutzart:	IP 65
Betriebstemperatur:	0 °C ... +50 °C

Reichweite:	80 m
Datenschnittstelle:	RS-232, RS-422
Datenübertragungsrate:	9,6 / 19,2 / 38,4 / 500 kBaud
Schaltausgänge:	3 x PNP
Versorgungsspannung:	24 V DC +/- 15%
Leistungsaufnahme:	20 W
Lagertemperatur:	-30 °C ... +70 °C
Gewicht:	4,5 kg
Abmessungen (L x B x H):	156 x 155 x 210 mm

Sensoreigenschaften nach Datenblatt (1/3)

Messbereich (*range*)

Untere und obere Grenze valider Messwerte

- z.B. Entfernungsmessung: Baumer US: 100-1000mm; SICK 5cm-80m

Dynamik (*dynamic range*)

Verhältnis von Ober- zu Untergrenze des Messwerts

- z.B. Baumer US: 10; SICK: 1600

Zuweilen in logarithmischer Form als dB (relativ)

angegeben, z.B. $10\log_{10}\left(\frac{\text{Obergrenze}}{\text{Untergrenze}}\right) = \text{Dynamik [dB]}$

- z.B. Baumer US 10, SICK ~32

Sensoreigenschaften nach Datenblatt (2/3)

Auflösung (*resolution*)

Eigentlich: Minimalunterschied zweier Messwerte.

- z.B. (lt. Datenblatt): Baumer US: 0,3mm; SICK 10mm;
Webcams 640x480 Pixel

Manchmal: Aufl. = Untergrenze des Messbereichs

Manchmal: Aufl. = Diskretisierungsfehler bei A/D-Wandlung

- z.B. Spannungsmesser 0-5V 8-bit → $5V/255=19,6mV$

Linearität (*linearity*)

Abhängigkeit von tatsächlicher Messgröße und Messwert.

Bei vorverarbeiteten Messwerten meist „mit gekauft“

- z.B. Abstandssensoren

Aber: Je nach Messprinzip nichtlineare Überlagerungen durch systematische Fehler!

- z.B. Schall-/Laserstrahl-„Keulen“

Sensoreigenschaften nach Datenblatt (3/3)

Frequenz/Zyklus-/Ansprechzeit (*frequency/cycle time*)

Zahl valider Messungen pro Zeiteinheit/Sekunde [Hz]

In der Regel abhängig von Messprinzip, ggf. von Datenraten

- z.B. Baumer US ~13 Hz (80ms);
SICK ~77–19 Hz (13–53ms, abh. v. Winkelauflösung&Ü-Protokoll);
Webcam 30 Hz (fps)

... und dann sind da noch

- Baugröße
- Gewicht
- Spannungsversorgung
- Leistungsaufnahme
- Kosten
- Verarbeitungsaufwand
- ...

Sensorfehler (1/2)

Empfindlichkeit (*sensitivity*, $\frac{\text{Messwertänderung}}{\text{Parameteränderung}}$)

ist wünschenswert. Geht meist einher mit **Störanfälligkeit**
($\frac{\text{Messwertänderung}}{\text{Umgebungseinflüsse}}$) – unerwünscht!

- z.B. Elektromagnetischer (Flux-Gate) Kompass: Auflösung $0,1^\circ$ – $0,5^\circ$ erzielbar (empfindlich!)
Messfehler durch Umgebung (Stahlkonstruktionen, Roboter-Motorströme) praktisch unbegrenzt (störanfällig!)
- z.B. Laserscanner relativ stör-unanfällig,
da Messung monochromatischen Lichts

Sensorfehler (2/2)

Messfehler/Genauigkeit (*error/accuracy*)

v : tatsächlicher Wert

m : gemessener Wert

$$\text{Genauigkeit} = 1 - \frac{|m - v|}{v} \quad \text{Messfehler}$$

Systematische Messfehler (*systematic errors*)

ist deterministischer Messfehler, d.h. im Prinzip modellierbar und daher behandelbar (auch wenn praktisch toleriert)

- z.B. Temperaturdrift in US-Sensoren (s. Baumer); Linsenverzerrung; SICK-Datenblatt: „Syst. Fehler $\pm 15\text{mm}$ “)

Zufällige M.-Fehler (*random errors*), Reproduzierbarkeit

Rauschen – tritt in allen technischen Sensoren auf!

Modelliert durch Gaußverteilung (μ, σ).

Dann gilt (*precision*) $\text{Reproduzierbarkeit} = \frac{\text{Messbereich}}{\sigma}$

- z.B. SICK-Datenblatt: „Stat. Fehler σ : 5mm“

Leben mit Sensorfehlern

Aus Sicht des Roboters

- Systematische und zufällige Fehler oft ununterscheidbar
→ arbeite mit 1 Fehlermodell!
- Dieses Fehlermodell ist i.d.R. monomodal und symmetrisch (\sim Gaußverteilung, genauer: Normalverteilung um ν);
die tatsächlichen Fehler sind multimodal und asymmetrisch (Bewegung vs. Stillstand, Reflexionen, Übersprechen, ...)
→ Sensorfehler sind praktisch unvermeidbar!

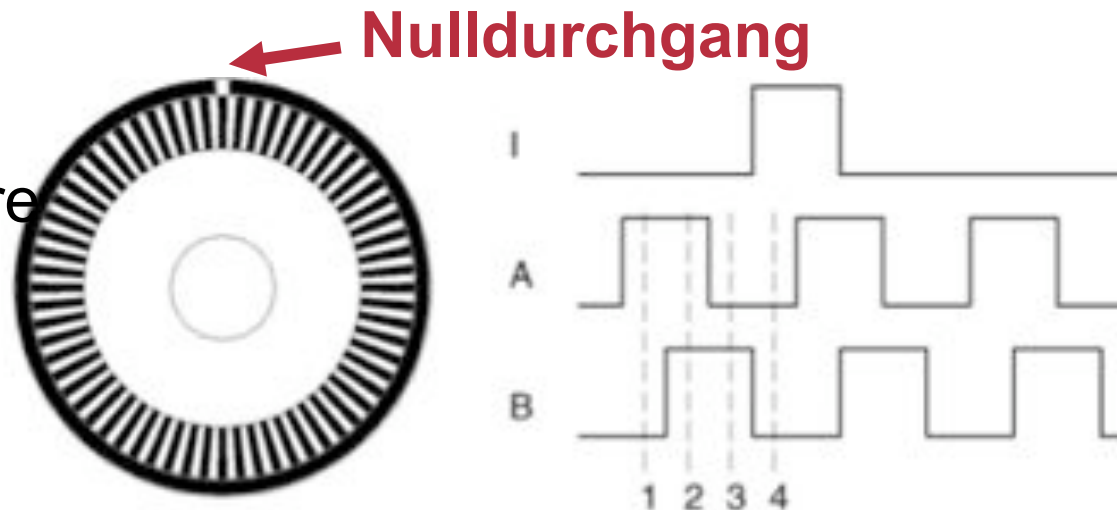
Reduziere Sensorfehler so gut wie technisch möglich!

Die Roboterprogrammierung muss aber dennoch davon ausgehen, dass die Sensordaten fehlerbehaftet sind!

2.2 Bewegungsmessung

Grundidee: Mit den Achsen rotieren Messscheiben, die optisch ausgelesen werden. Typische Auflösung: Mobile Robotik ~2000 CPR; Industrieroboter ~10.000 CPR (*counts per revolution*).

Viele Ablesepunkte
phasenversetzt (höhere
Auflösung,
Drehrichtung)



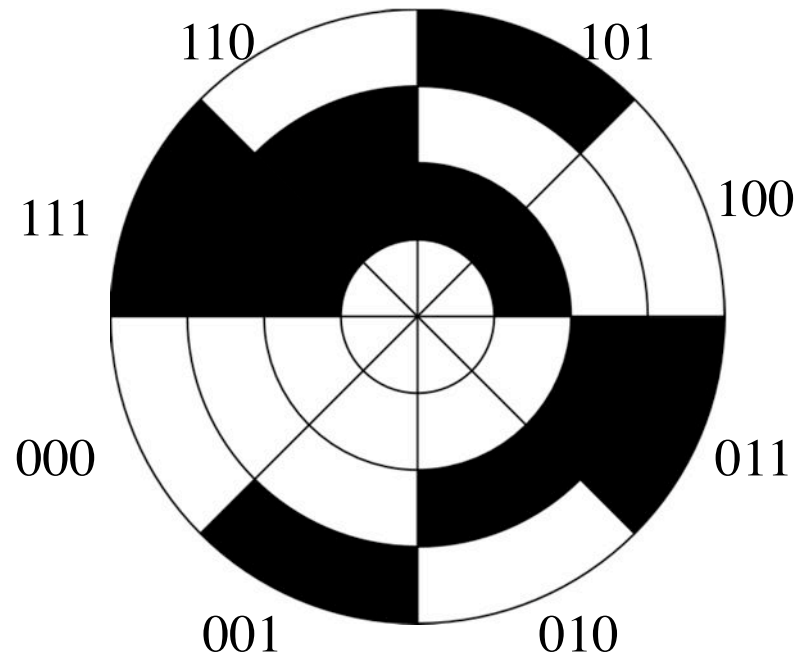
Inkrementalgeber

Nachteil: Absolute Gelenkstellung nicht messbar

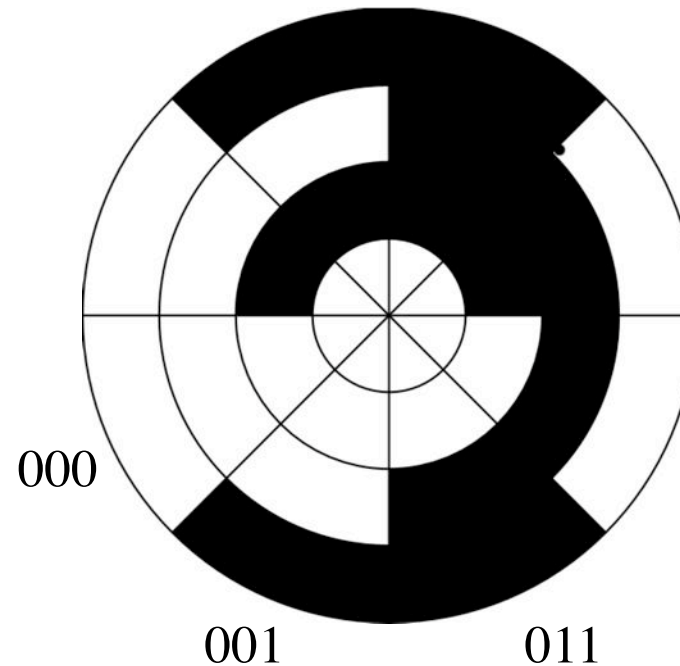
↳ Beim Einschalten erst „Räkeln“ bis zu einer Absolut-Marke

Absolutgeber

... erlauben direktes Ablesen des Gelenkwinkels
(auch bei Stillstand)



Binärer Absolutgeber (3 Bit)



Graycode-Absolutgeber (3 Bit)
robuster gegen Ablesefehler bei
Sektorübergang

Radumdrehungsmessung auf KURT2

- Umdrehungsmessung an den Motorachsen!
- **Vorteil:** Einfach und robust: Umdrehungsmessung wird mit dem Motor eingekauft
- **Nachteil:** Zwischen Motor und Rad ist noch eine Übersetzung (Getriebe, Zahnriemen), die Fehler verursacht (z.B. Durchrutschen des Zahnriemens)
- CPR-Werte bei KURT2: ~5.500–20.000 je nach Getriebe

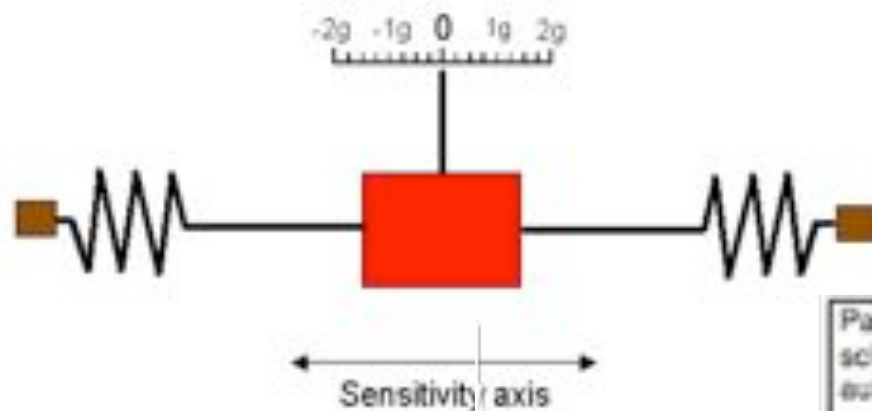
Beschleunigungssensoren

Zuweilen mit Bewegungssensoren identifiziert, da Richtung und Betrag über Integral der Beschleunigungen ermittelbar.

- Richtung, Geschwindigkeit: eher exterozeptiv;
Beschleunigung: eher propriozeptiv!
- Dreh- und Linearbeschleunigung messbar

Accelerometer/Linearbeschleunigungsmesser

Idee: Nutze Massenträgheit aus, um Beschleunigung in definierten Richtungen in direkt messbare Größen (z.B. Druck, Kapazitätsänderung, Magnetfeldänderung) zu messen.



www.rotoview.com/accelerometer_schematic.jpg

Vorsicht systematischer Fehler!

Um g rauszurechnen, muss Winkel zur Gravitationsachse recht genau bekannt sein!

	Passiver Beschleunigungsaufnehmer	Aktiver Beschleunigungsaufnehmer	Schwingstab-Aufnehmer	Servo-Beschleunigungsaufnehmer
Messbereich	$\pm 2000 \text{ g}$	$\pm 500 \text{ g}$	$\pm 70 \text{ g}$	$\pm 25 \text{ g}$
Auflösung	$0,1 \text{ g}$	$0,01 \text{ g}$	$10 \mu\text{g}$	$< 1 \mu\text{g}$
Bandbreite	$0 \dots 5.000 \text{ Hz}$	$1 \dots 10.000 \text{ Hz}$	$0 \dots 400 \text{ Hz}$	$0 \dots 800 \text{ Hz}$
Linearitätsfehler	$< 1 \%$	$< 1 \%$	$< 175 \text{ ppm}^{(1)}$	$< 60\text{-}125 \text{ ppm}^{(1)}$
Bias	$< 50 \text{ g}$	---	$< 2 \text{ mg}^{(1)}$	$< 10\text{-}100 \mu\text{g}^{(1)}$
Schock	10.000 g	5.000 g	250 g	150 g
Gesamt-Masse	1 gr	25 gr	10 gr	80 gr

Gyroskope/Gyrometer/Gyros

... gibt es mechanisch, elektromechanisch oder optisch:

- Miss Beschleunigung relativ zu Drehachse
- Auflösung preisabhängig bis $<0,01^\circ$; kontinuierliche Messung; verfügbar in vielen Bauvarianten; Preis 50-50.000€
- ☺ Energiesparend, beliebig hohe Messfrequenz, erlaubt Bewegung quasi propriozeptiv zu messen
- ☹ Gute Gyroskope sind teuer
- ☹ Achtung Drift durch Erdrotation (s. Foucaultsches Pendel)
- ☺ Viele von Ihnen haben ein ordentliches Gyro in der Tasche (normalerweise telefonieren und simsen Sie damit)

Prinzip des mechanischen Gyroskops

τ : *torque* (Drehmoment)

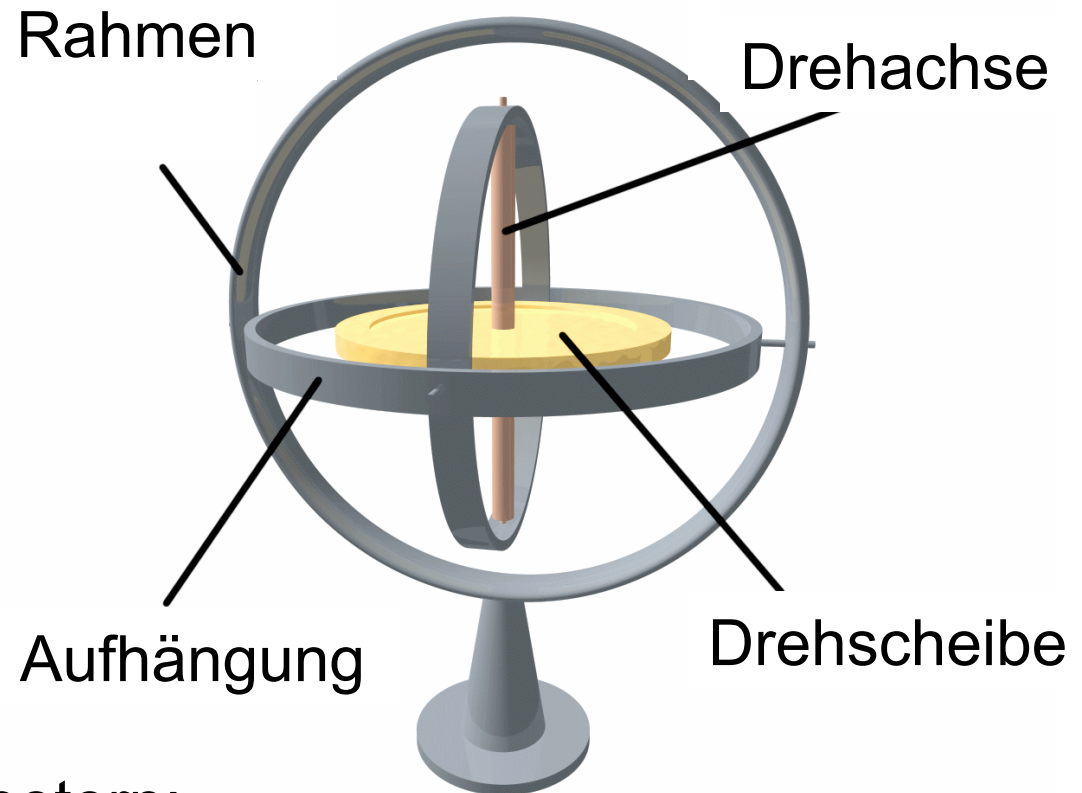
I : *inertia* (Trägheit)

ω : Drehgeschwindigkeit

Ω : Präzession

Präzession: Lageveränderung der Achse eines rotierenden Kreisels, wenn äußere Kräfte auf ihn einwirken.

$$\tau = I\omega\Omega$$



Gyros auf bezahlbaren Robotern:

MEMS (Micro Electronic Mechanical Systems) oder **piezoelektrisch**

Faseroptische Gyroskope ersetzen Messung d. mechanischen Auslenkung durch Messung d. Phasendifferenz v. Laserstrahlen

Koordinatensysteme

Miss Roboterbewegung relativ zu externem Bezugssystem

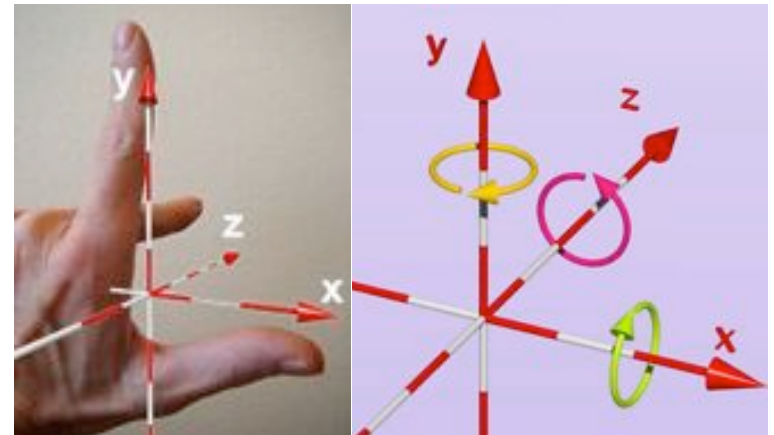
Bezugssysteme für Roboterposen (Position + Orientierung)

Abhängig von Anwendung.

Grundsätzlich in dieser Vorlesung: ein „**linkshändiges Koordinatensystem**“

- 3D: (x, z, θ_y) : Pose auf Ebene (z.B. planer Fußboden)
- 6D: $(x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$

Euler-Winkel $\theta_x, \theta_y, \theta_z$: Nick-, Gier-, Rollw.



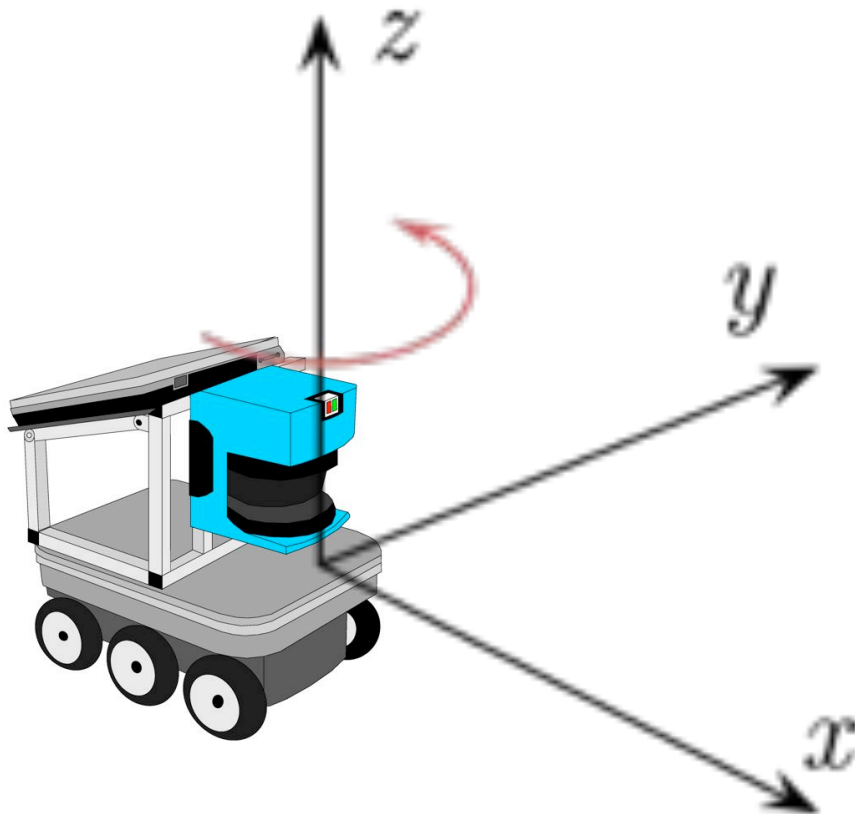
- Beispiele**
- Gauß-Krüger-, UTM-Koordinaten (Freiland) (x -Achse=N/S, Null- x =Äquator)
 - 31/5xz Modell der 5. Etage Geb. 31 (Nullpunkt Flurmitte, x =Flurachse)
 - Luftfahrt NED (North, East, Down)
 - Industrie oft ENU (East, North, Up)

Vorsicht Falle!

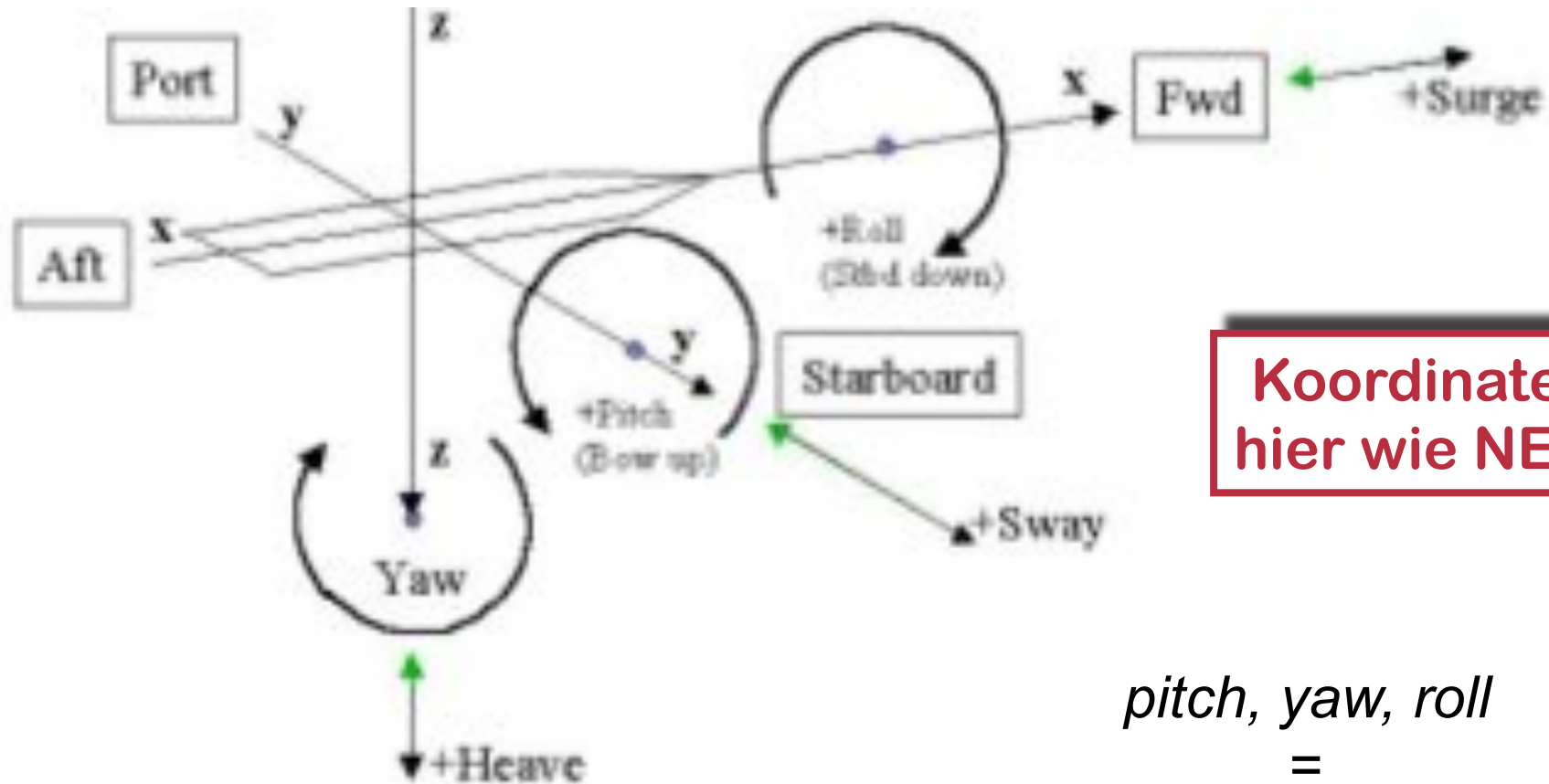
Andere Benennungen in der Literatur (z.B. S/N $z \hookrightarrow y$)

Vorsicht Falle, Teil 2!!!

ROS (s. Übungen) verwendet ein **rechts**händiges Koordinatensystem!



Englische Terminologie



pitch, yaw, roll
=

nicken, gieren, rollen