

## 2.3 Ausrichtungsmessung

- **Kompass** (Flux-Gate, Hall-Effekt):
  - Misst globale N-Richtung (Erdmagnetfeld)
  - Auflösung ab  $\sim 0,1^\circ$  (Flux-G.),  $\sim 1^\circ$  (Hall); kontinuierlich; verfügbar in vielen Bauvarianten; Preis  $\geq 50\text{€}$  (Hall ist billiger und leichter als Flux-Gate)
  - ☺ Billig, energiesparend, beliebig hohe Messfrequenz
  - ☹ Hoch störanfällig: in Gebäuden oft unnütz (Achtung: Roboter enthalten Elektromotoren!)

# Neigungsmessung

- **Inklinometer** (z.B. Quecksilber)
  - Misst Neigung bzgl. Gravitationsvektor (Nick-/Rollwinkel)
  - Auflösung ab  $0,5^\circ$ ; kontinuierliche Messung; verfügbar in vielen Bauvarianten; Preis  $\geq 3\text{€}$
  - ☺ Billig, energiesparend, beliebig hohe Messfrequenz
  - ☹ Billige Varianten meist unpräzise & träge
  - ☺ Auch das haben Sie oft in Ihrem Händi

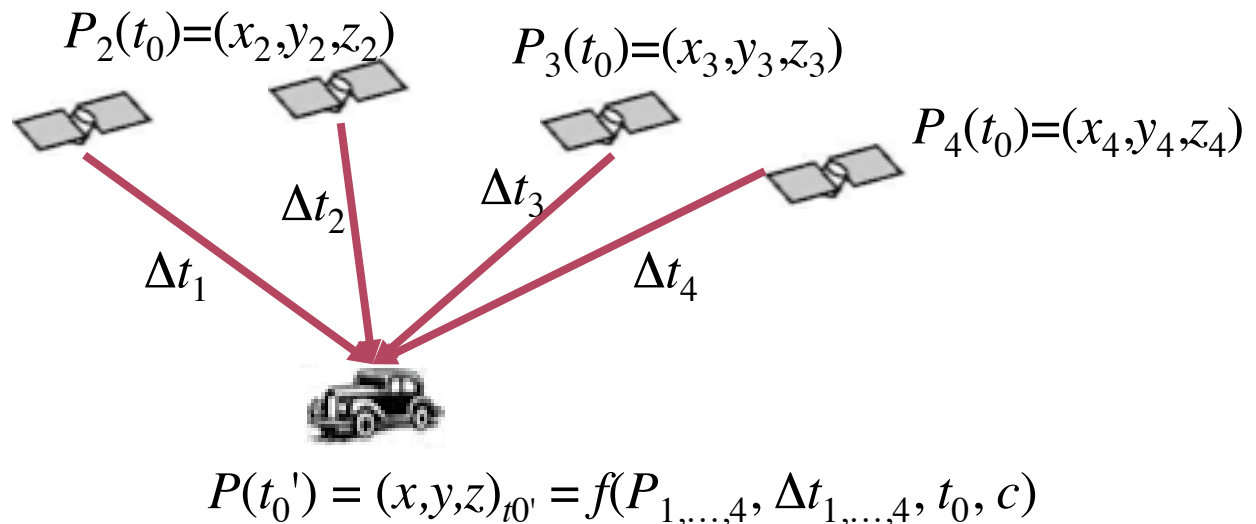
## 2.4 Globale Positionsbestimmung

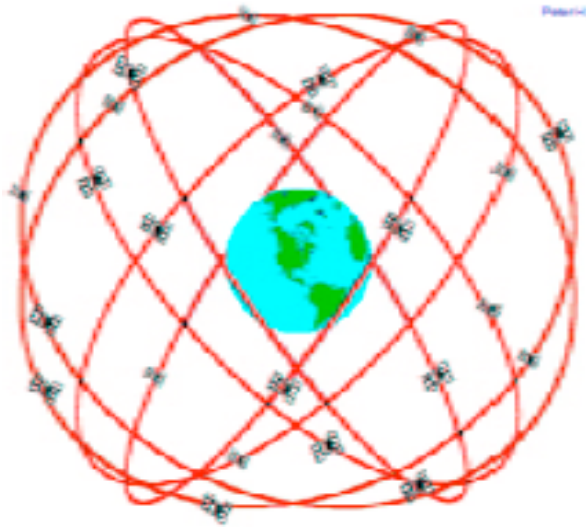
- Viele (21+3) Satelliten senden synchron (initial synchronis. Atomuhren mit Update) ihre aktuelle Position zur Erde
- Mobile Einheit („Rover“) ermittelt aus Laufzeitdifferenzen von mindestens drei Signalen seine  $(x,y,z)$ -Position (3 Gleichungen mit 3 Unbekannten – wegen ungenauer Zeitsynchronisation des Rovers praktisch immer 4 Signale nötig)

### NAVSTAR GPS

(*Nav*igational *Sat*ellite *T*iming and *R*anging – *G*lobal *P*ositioning *S*ystem)

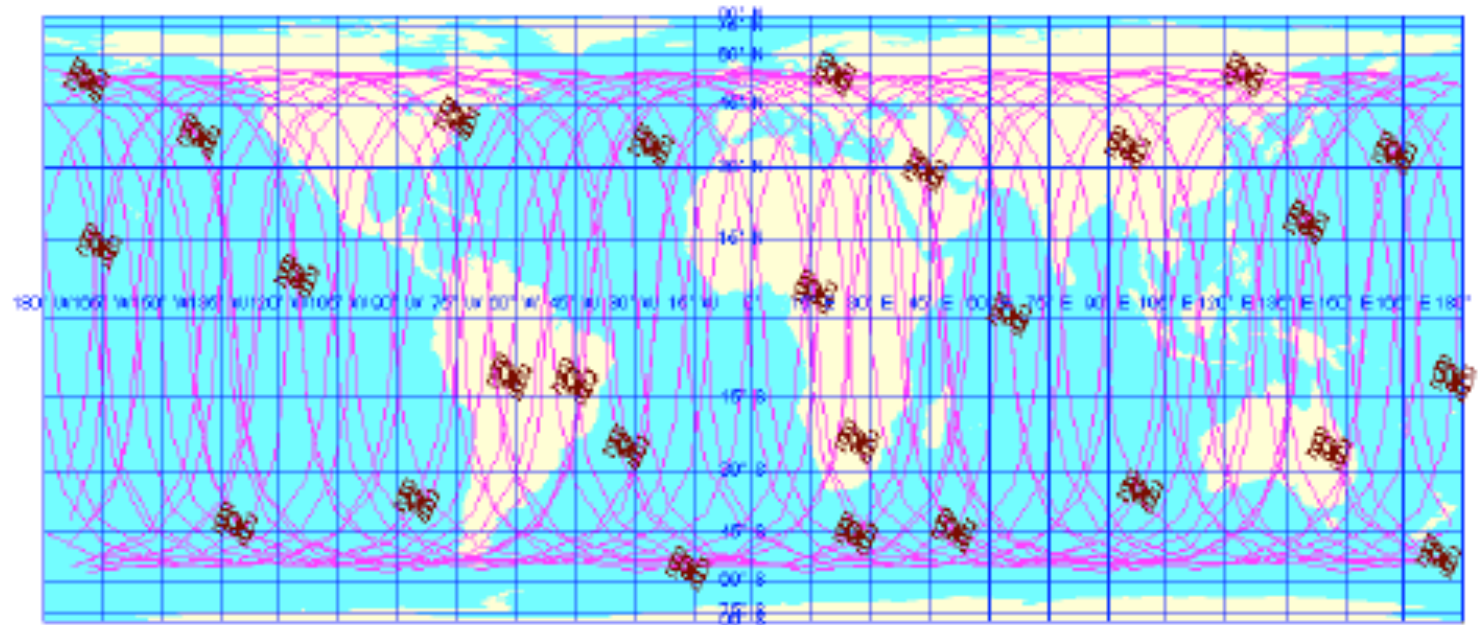
- läuft seit 07/1995
- ohne künstl. Störung seit 05/00





# GPS-Satelliten

21 Satelliten (+ 3 Ersatz) umkreisen die Erde in 20.200 km alle 12 h,  
Bahnneigung je  $55^\circ$  gegen Äquatorebene



Bilder: Thomas Röfer  
„Kognitive Robotik“  
Univ. Bremen, 2002

# Grenzen des GPS für präzise Lokalisierung

- schwache Satellitensignale (Abschirmung durch Mauern, Bäume, ...)
  - ↳ unmöglich in Gebäuden, zwischen Bebauung, Wald etc.
- Signalreflexion an Wänden
  - ↳ Messfehler neben Gebäuden
- Laufzeitunterschiede durch lokale Atmosphäreneffekte
  - ↳ systematische Messfehler
- Positionsungenauigkeiten der Satelliten
  - ↳ systematische Messfehler
- Interferenzen mit anderen Signalen
  - ↳ zufällige Messfehler
- Präzise Zeitauflösung  $< \text{ns}$  erforderlich (Licht läuft ca.  $0,3\text{m}/1\text{ns}$ )
  - ↳ zufällige Messfehler (individuell beim Empfänger)

# GPS zur Lokalisierung

... ist dennoch sinnvoll, vorausgesetzt

- Einsatz im Außenbereich
- Positionen bei Ausfall der GPS-Messung werden interpoliert („Auto fährt in einen Tunnel“)
- wenn möglich verwende Differenzielles GPS (DGPS)  
(Stationärer Sender mit bekannter Position in der Nähe (= gleiche Satelliten, gleiche Störeinflüsse) sendet aktuelles Korrektursignal, das regional relevante Fehler kompensiert)
- erzielbare Positionsgenauigkeiten (Angaben differieren!)
  - Basis-GPS Fehler Größenordnung 15m
  - DGPS Fehler Größenordnung 1m
- Latenzzeit ~250ms ➔ ~4Hz Messfrequenz
- mäßig aufwändiger Sensor (Kosten, Energie, Baugröße)  
(vorausgesetzt, man abstrahiert lokal von 24 Satelliten im Orbit ...)

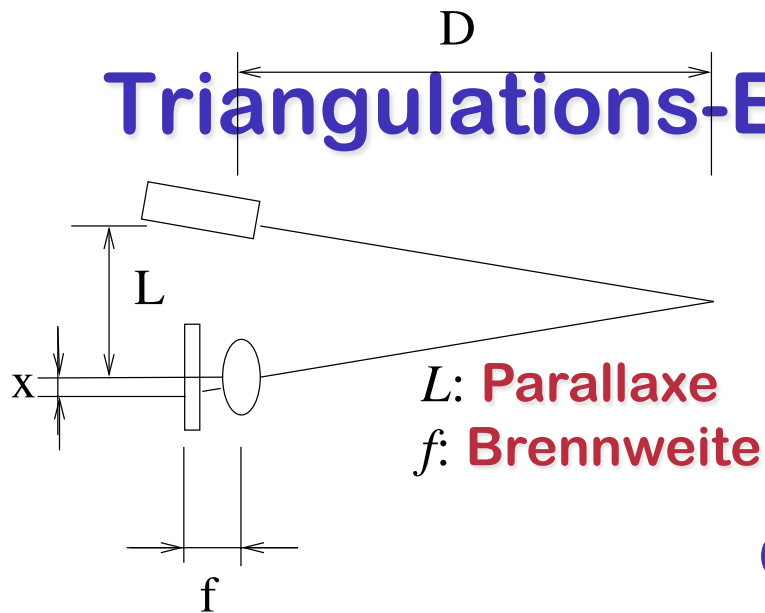
## 2.5 Entfernungsmessung

- **Laufzeitmessung** eines Signals (Hin- und Rückweg)  
 $d = vt/2$  ( $d$  Distanz,  $v$  Ausbreitungsgeschwindigkeit,  $t$  Laufzeit)
  - Schall; in Luft, aber auch anderen (homogenen) Medien
  - elektromagnetische Wellen (IR) in Luft
- **Phasendifferenzmessung** modulierter Trägerfrequenzen
- **Triangulation**  
(Entfernung über Winkelmessung eines Echos)
  - funktioniert nur mit scharf gebündelten Signalen (Laser)

# Triangulations-Entfernungsmessung

Sender

Empfänger



$L$ : **Parallaxe**  
 $f$ : **Brennweite**

nach Strahlensatz:

$$\frac{D}{f} = \frac{L}{x} \Leftrightarrow D = f \frac{L}{x}$$

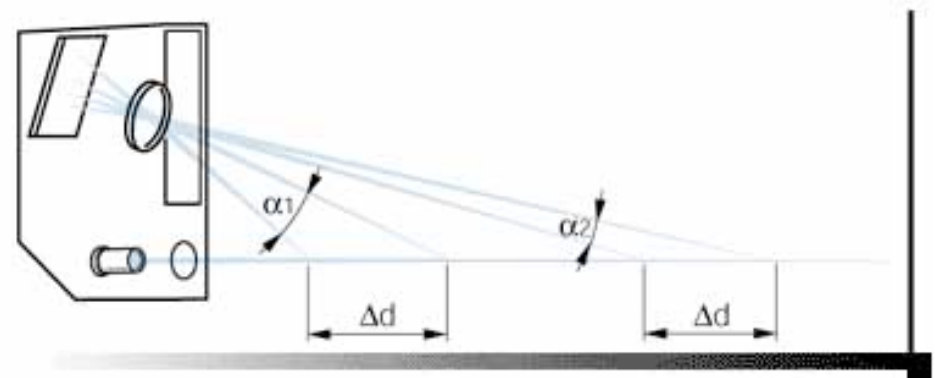
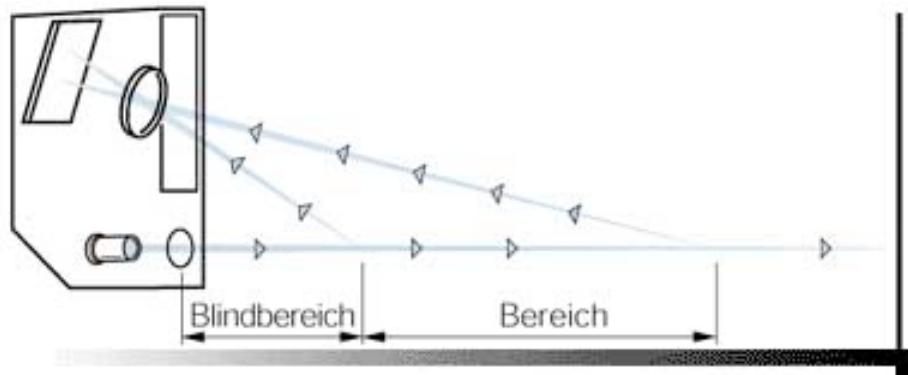
Messprinzip bedingt zwei  
**Grenzen des Messbereichs:**

**Blindbereich**

$f, L$  müssten klein gewählt sein

**Fernauflösung**

$f, L$  müssten groß gewählt sein



von [www.baumerelectric.com/](http://www.baumerelectric.com/)



# IR Triang. in KURT2: SHARP GP2D12

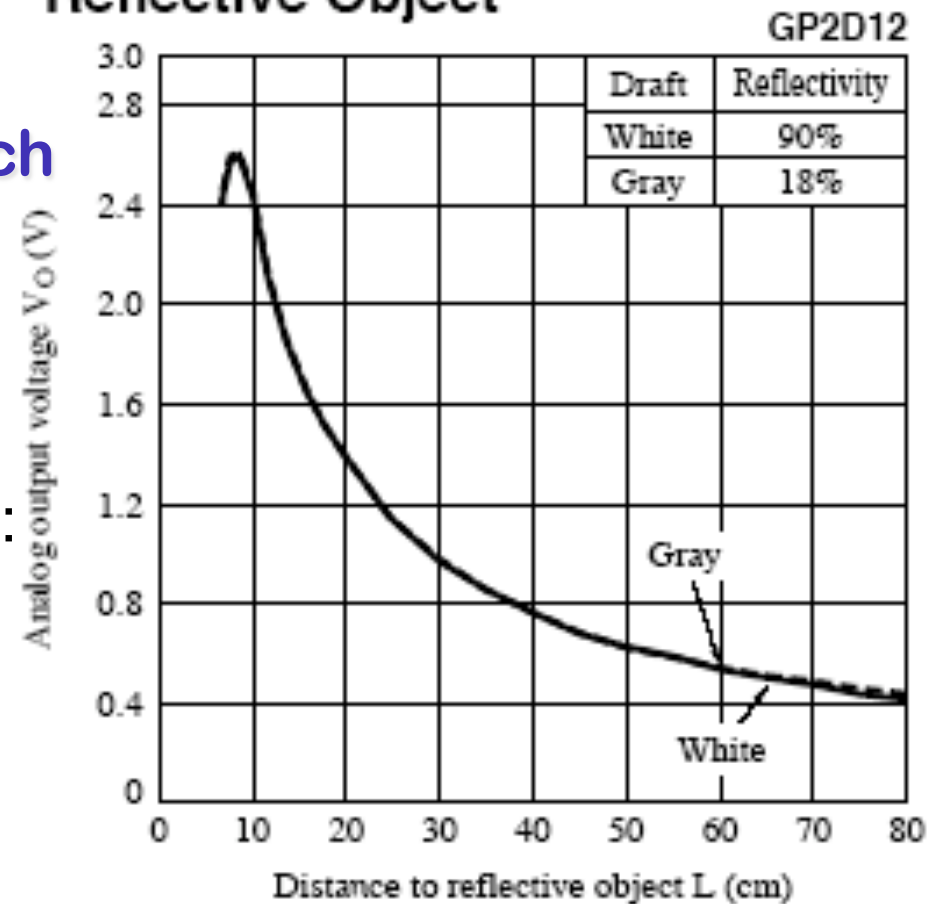


**Messbereich**  
10–80cm

IR-Triangulations-  
Abstandsmesser allgemein:

- in kurzen Messbereichen sehr präzise
- billig (ab ~15€)
- kompakt

**Fig.6 Analog Output Voltage vs.Distance to Reflective Object**



# Laufzeit-Entfernungsmessung, Grundsätzlich

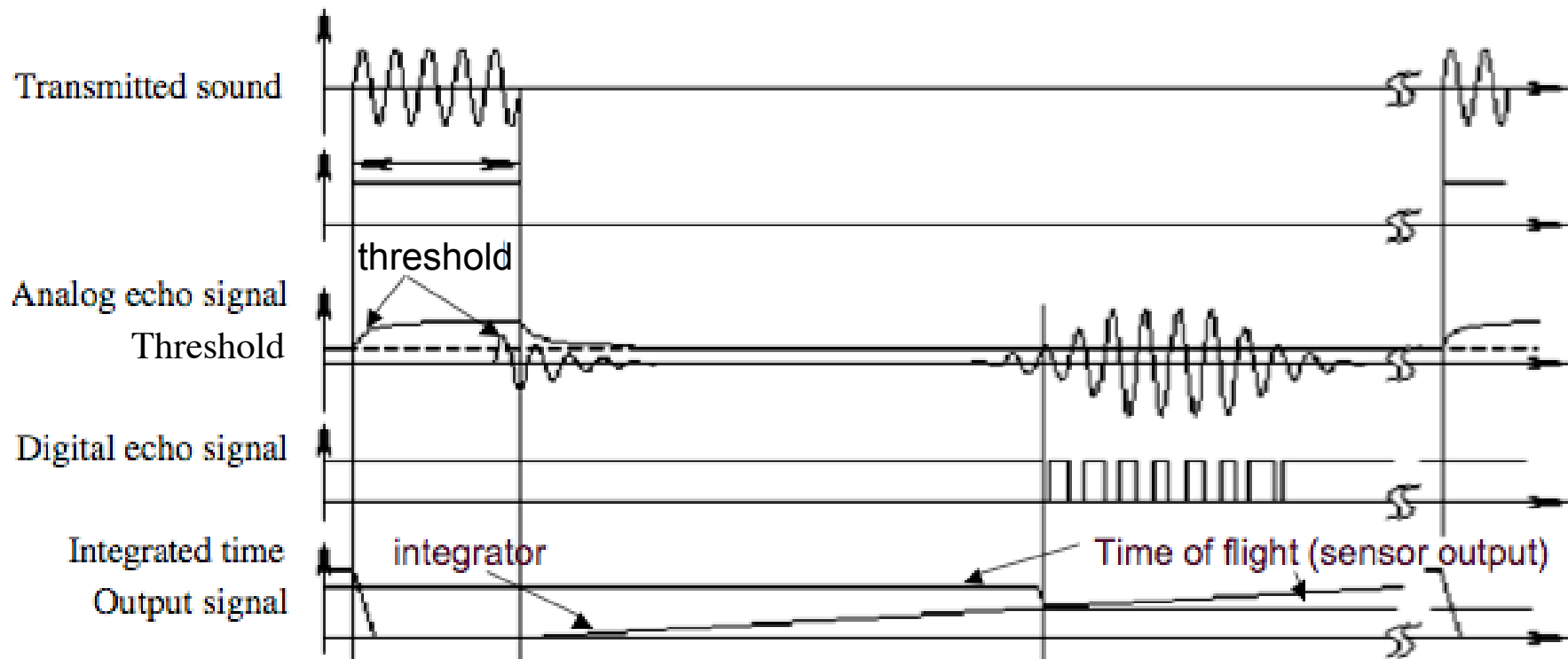
- Lichtgeschwindigkeit (Laserstrahl) ca.  $0,3\text{m/ns}$ ;  
Schallgeschwindigkeit in Luft ca.  $0,3\text{m/ms}$
- Laserstrahl stark gebündelt; Schallsignal „läuft auseinander“ (beides hat Vor- und Nachteile!)
- Schall eher im Nahbereich (bis ca.  $1\text{m}$ );  
Laser eher im mittleren Bereich (bis ca.  $20\text{m}$  oder weiter)
- beide brauchen homogenes Medium  
(kein Nebel, Regen, Wind etc.)
- im Prinzip Probleme mit
  - Totalreflexion, „Echo“ (beide)
  - „matten“ Oberflächen (beide)
  - „durchsichtigen“ Oberflächen (Glas etc.: Laser)
- beides robuste, wohl erprobte Technologien

# Ultraschall-Entfernungsmessung

$c = 343 \text{ m/s}$  in Luft (Zimmertemperatur  $20^\circ\text{C}$ )

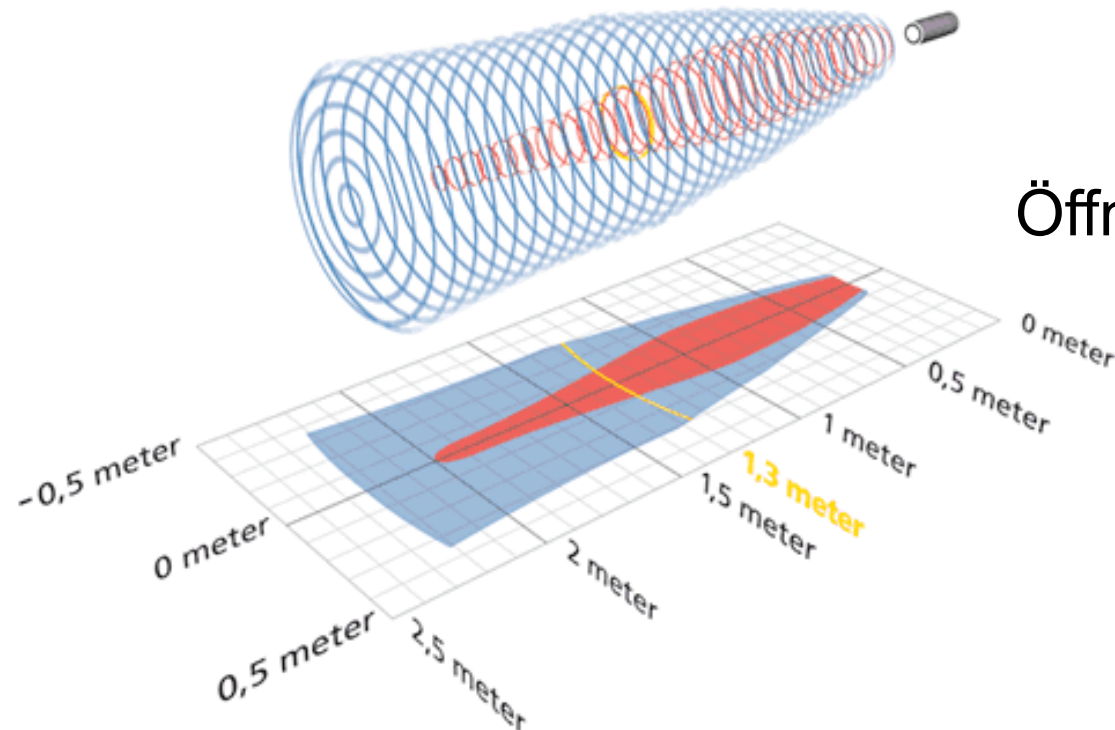
also  $d = 343\text{m/s} \times t/2$  ( $d$  Distanz[m],  $t$  Laufzeit[s])

Wave packet



Messprinzip einfach → relativ billiger Sensor (10er–100er €)

# Die Ultraschall-Keule



Öffnungswinkel ca.  $20^\circ$

Gemessener Abstand = Abstand zum nächsten Reflexionspunkt innerhalb der Schallkeule

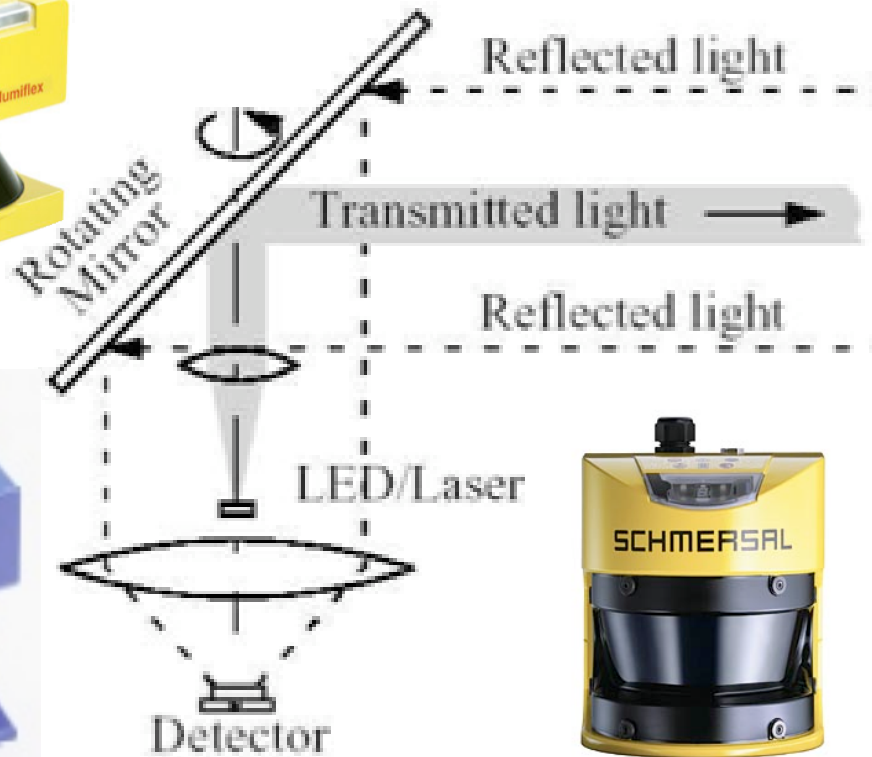
**US eignet sich gut zur Kollisionsvermeidung,  
aber schlecht zur Aufnahme der Umgebungsgeometrie**

# Entfernungsmessung mit Laserscanner



$c = 299.792.458 \text{ m/s}$  (Vakuum), also

$d = 299.792.458 \text{ m/s} \times t/2$  ( $d$  Distanz[m],  $t$  Laufzeit[s])



Abtastung (gepulster Laserstrahl) in einer **Scan-Ebene!**

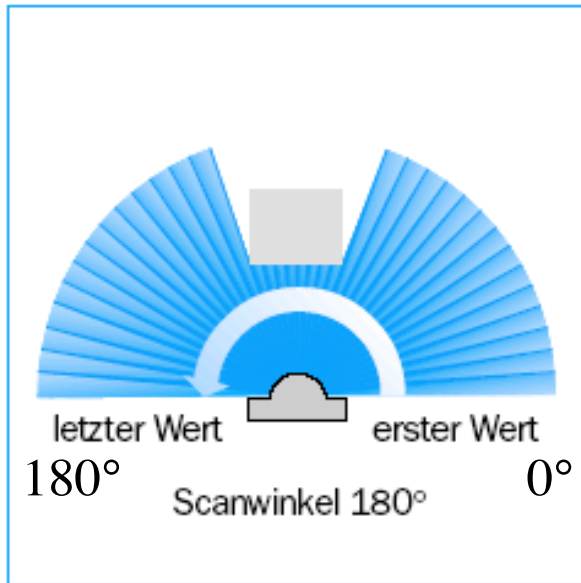
$c \approx 0,3\text{mm/ps}$

→ Bei Auflösung von 10mm: Präzision der Laufzeitmessung im Bereich pico-Sek. ( $10^{-12}\text{s}$ ) erforderlich!

Robustheit → Gewicht! (SICK LMS 200: 4,5kg)

→ Kosten in 1000er €

# Laserscanner-Rohdaten

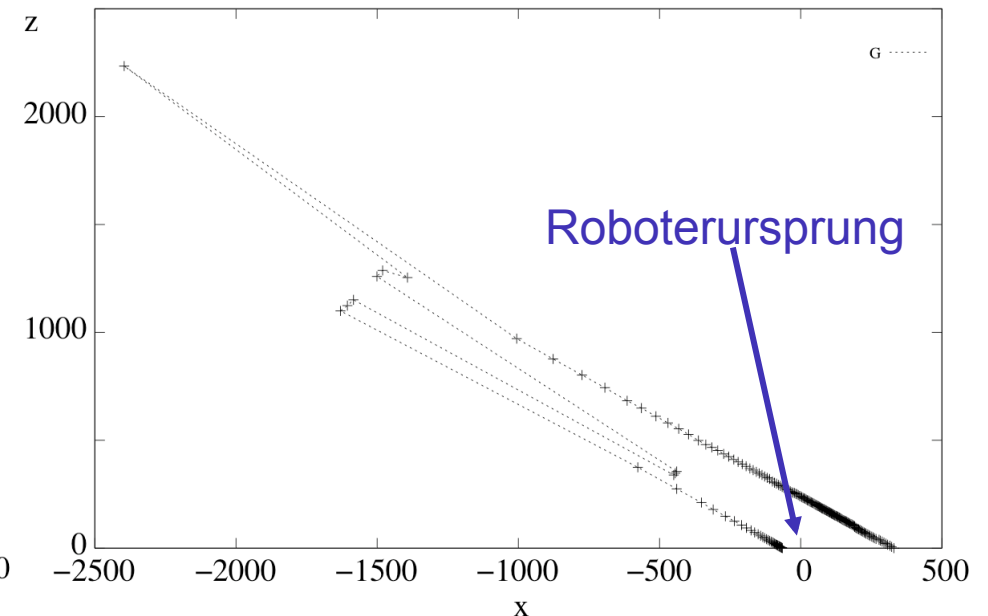
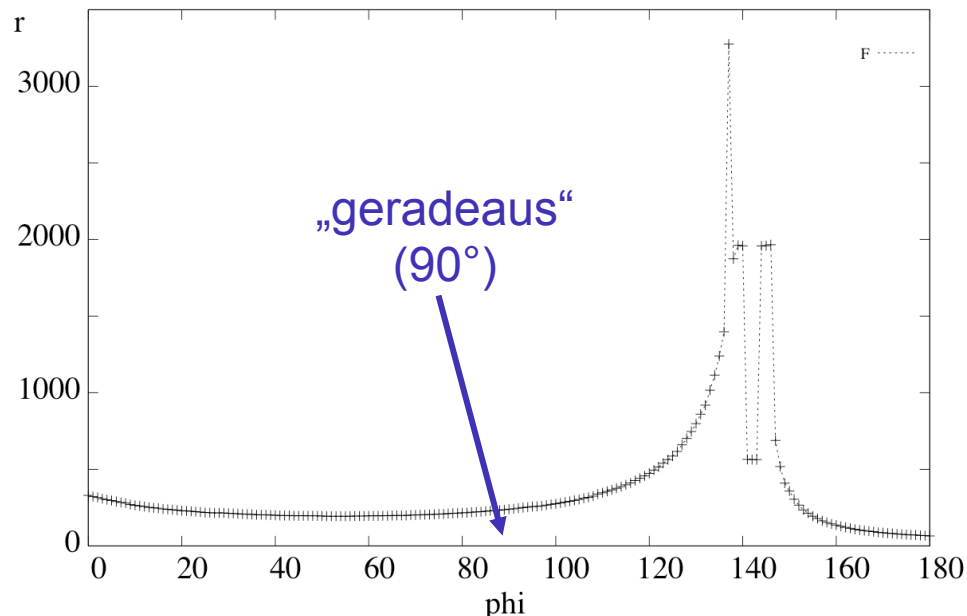


Je nach Winkelauflösung  
(SICK: 0,25°, 0,5°, 1° einstellbar)

$(180^\circ / \text{Auflösung}) + 1$  Paare (Polardarstellung)  
⟨Winkel, Entfernung⟩

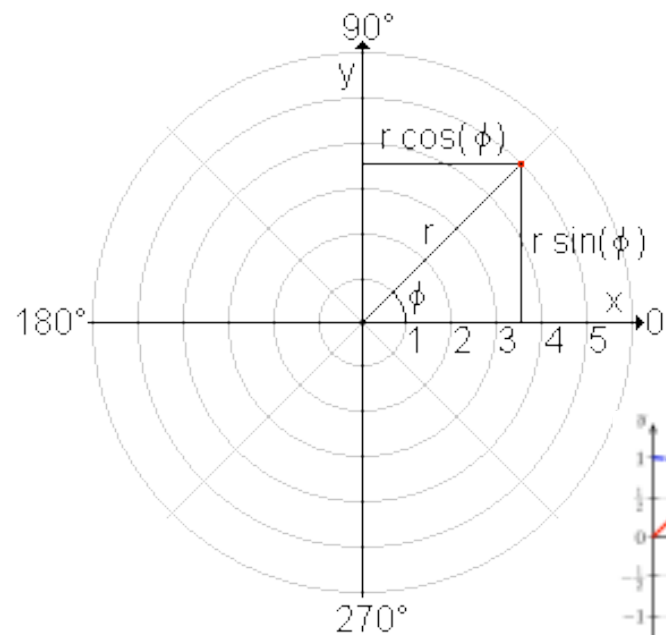
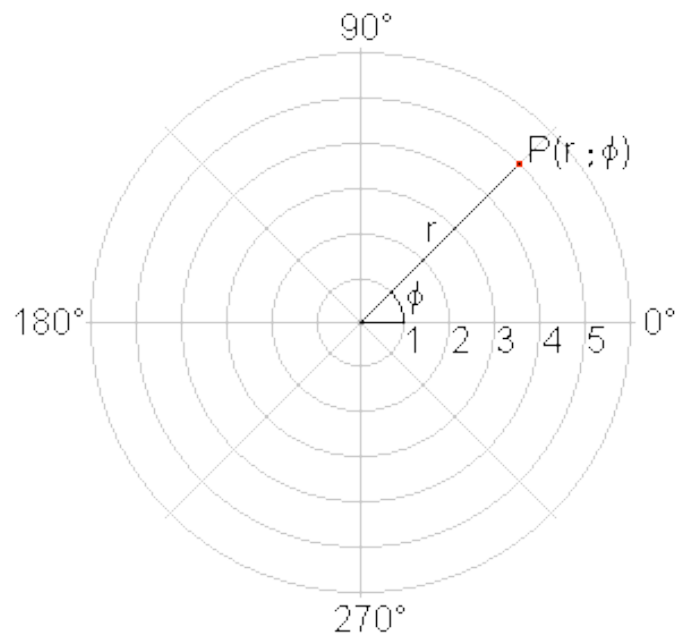
(zusätzlich jeweils **Remissionswert** erhältlich)

## Polarkoordinaten-Darstellung    Kartesische $(x,z)$ Darstellung



# Zur Erinnerung: Umrechnung polar/Kartesisch

Wikipedia:  
Polarkoordinaten



$$x = r \cos \varphi$$
$$y \text{ bzw. } z = r \sin \varphi$$

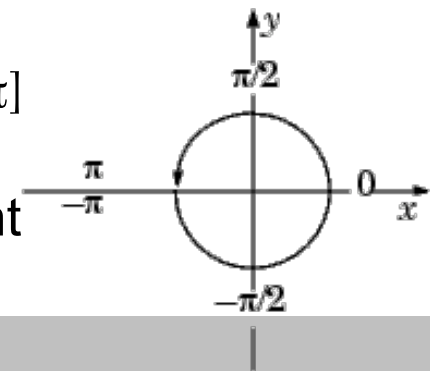


## Kartesisch nach Polar

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

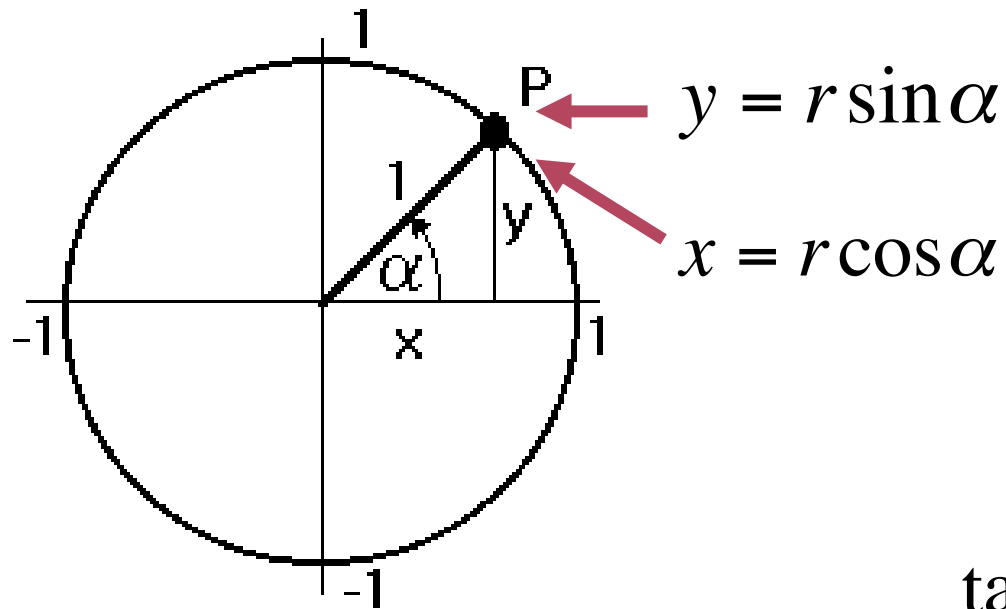
$$\varphi = \arctan \frac{y}{x}$$

**atan2** ergibt den Winkel in  $[-\pi, \pi]$   
des 2-Vektors  $(x, y)^T$   
(Fallunterscheidung pro Quadrant  
über die arctan-Funktion)





# Zur Erinnerung: Basis-Trigonometrie



$$\sin = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Hypotenuse}}$$

$$\cos = \frac{\text{Ankathete}}{\text{Hypotenuse}}$$

$$\tan = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}} = \frac{\sin}{\cos}$$

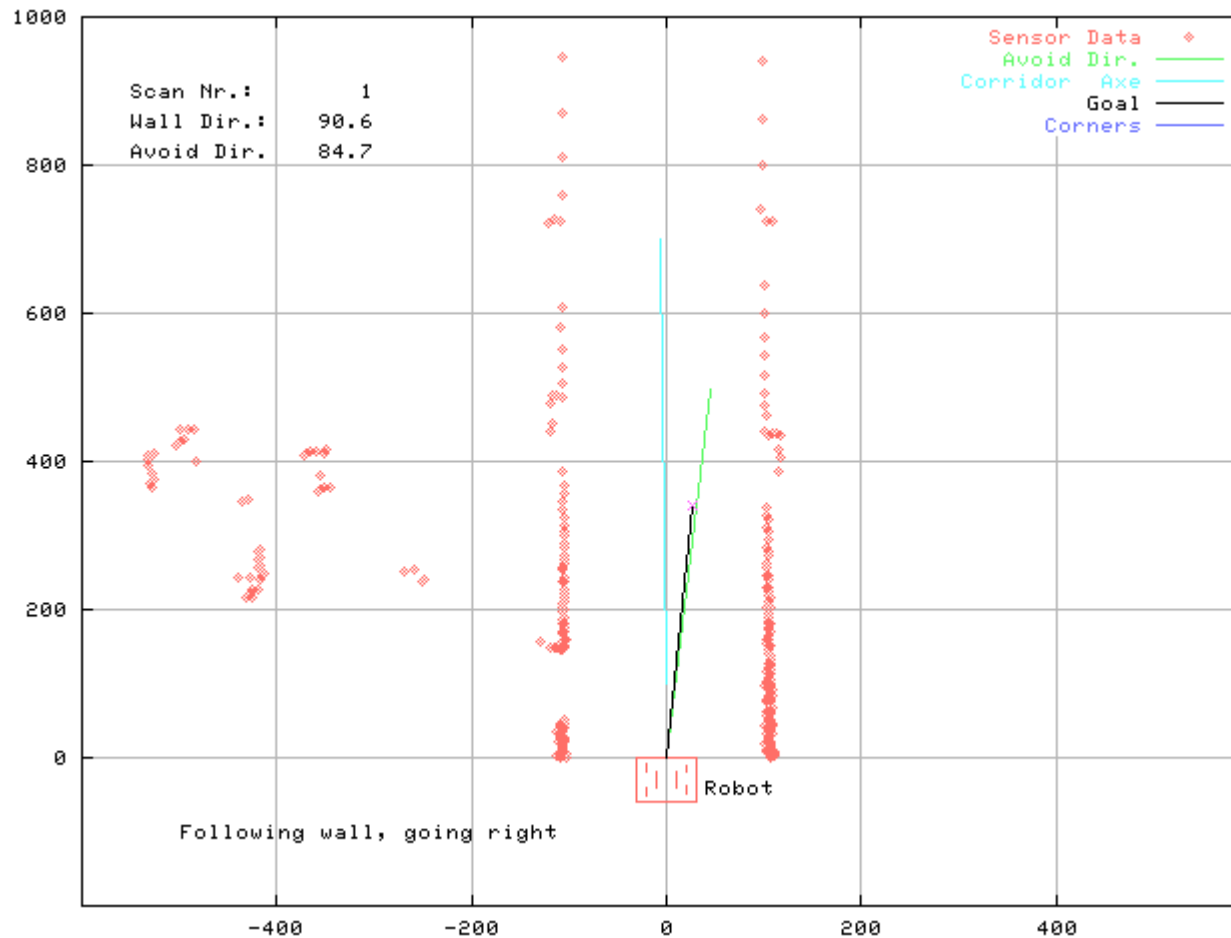
... mit inversen Funktionen arcsin etc.:  $x = \sin \alpha \Rightarrow \alpha = \arcsin x$

$$\int \sin ax dx = -\frac{1}{a} \cos ax$$

$$\int \cos ax dx = \frac{1}{a} \sin ax$$



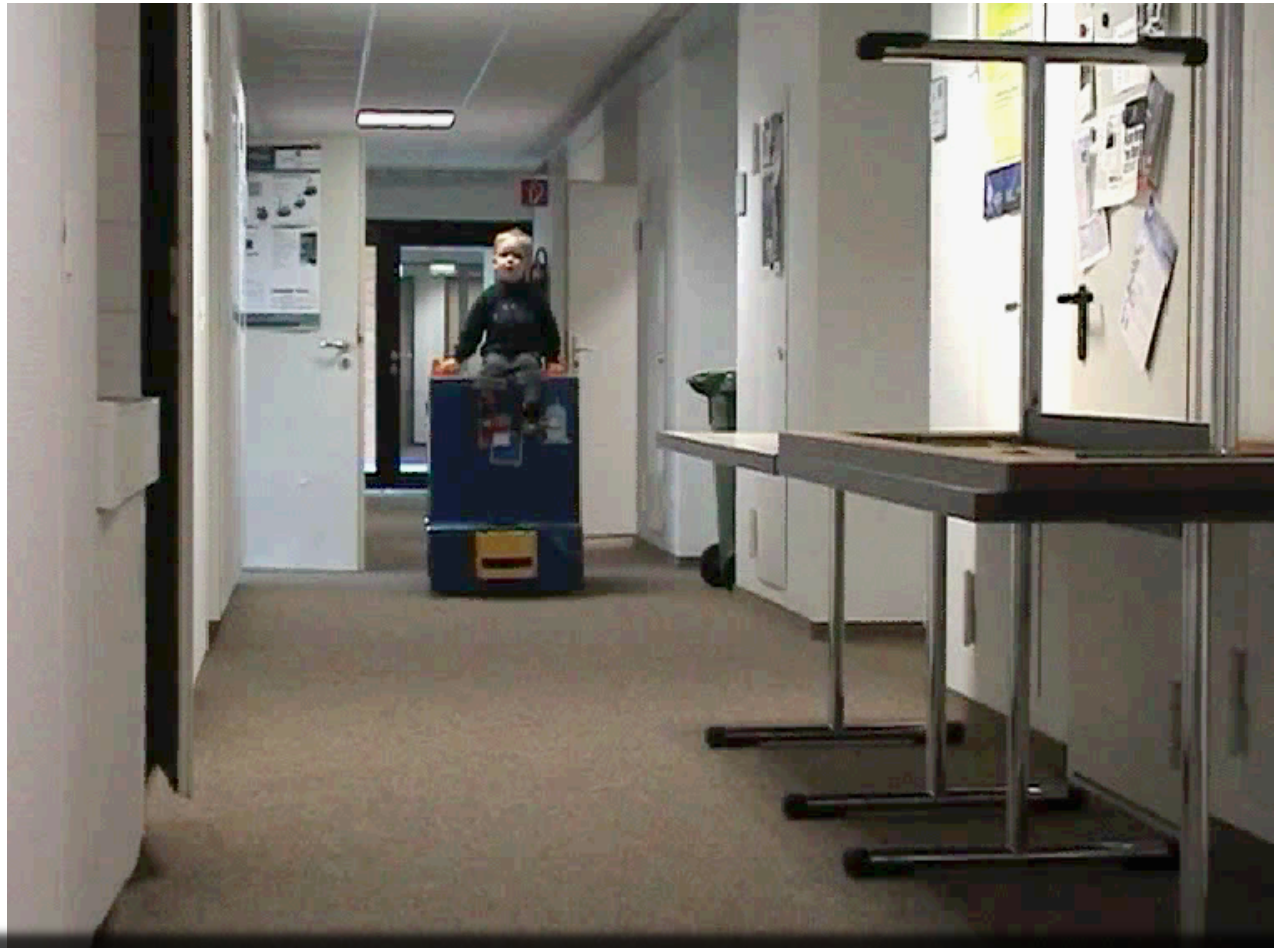
# Flurfahrt aus Sicht eines Laserscanners



638 Scans;  
Zykluszeit 160ms  
(~6,5 Hz);  
online-Auswertung  
der Scandaten mit  
gezeigt

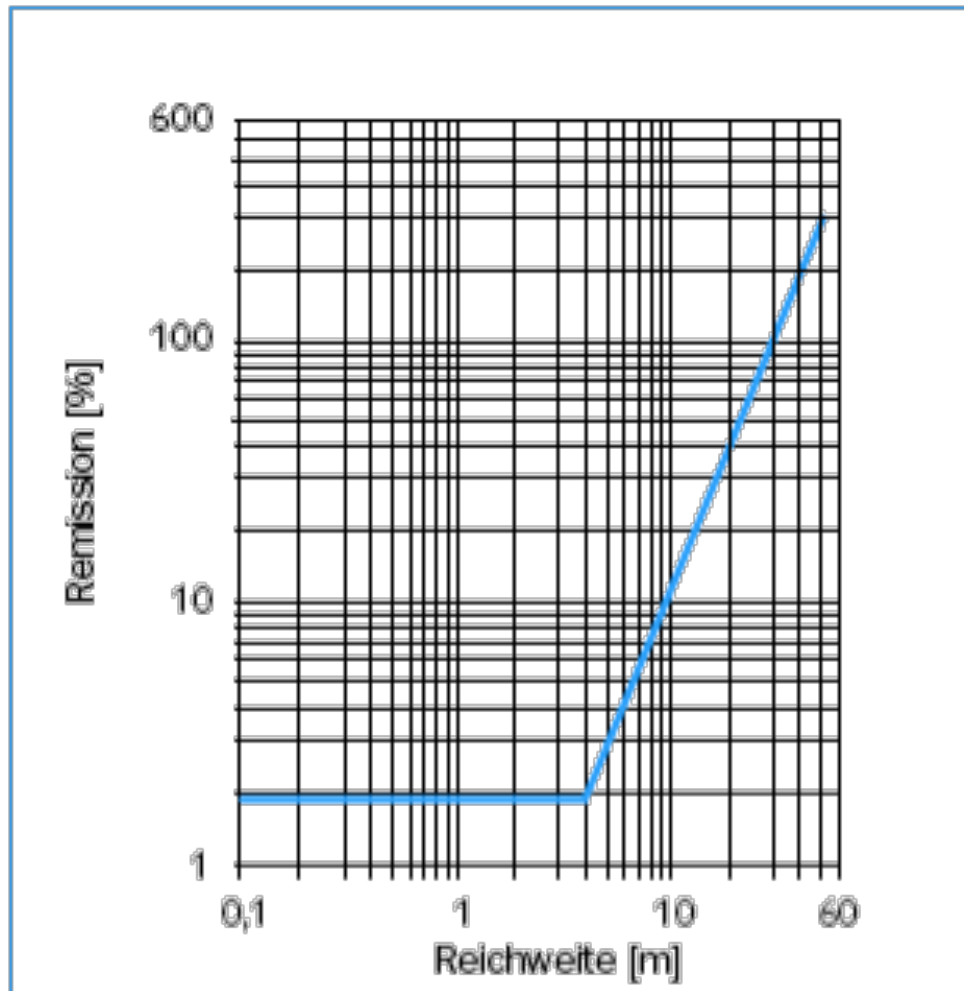
animated GIF von  
Hartmut Surmann,  
Fraunhofer IAIS

# Einsatz auf mobilen Robotern ((Gegen)Beispiel)



**Laserscanner eignen sich bedingt zur Kollisionsvermeidung,  
aber sehr gut zur Aufnahme der 2D-Umgebungsgeometrie**

# Remissionswerte, Bspl. LMS 200



Material	Remission
Photokarton, schwarz matt	10%
Karton, grau	20%
Holz (Tanne roh, verschmutzt)	40%
PVC grau	50%
Papier, weiß matt	80%
Aluminium, schwarz eloxiert	110...150%
Stahl, rostfrei glänzend	120...150%
Stahl, hochglänzend	140...200%
Reflektoren	> 2000%

(100%=KODAK-Standard)






Reichweite in Abhängigkeit von Remission

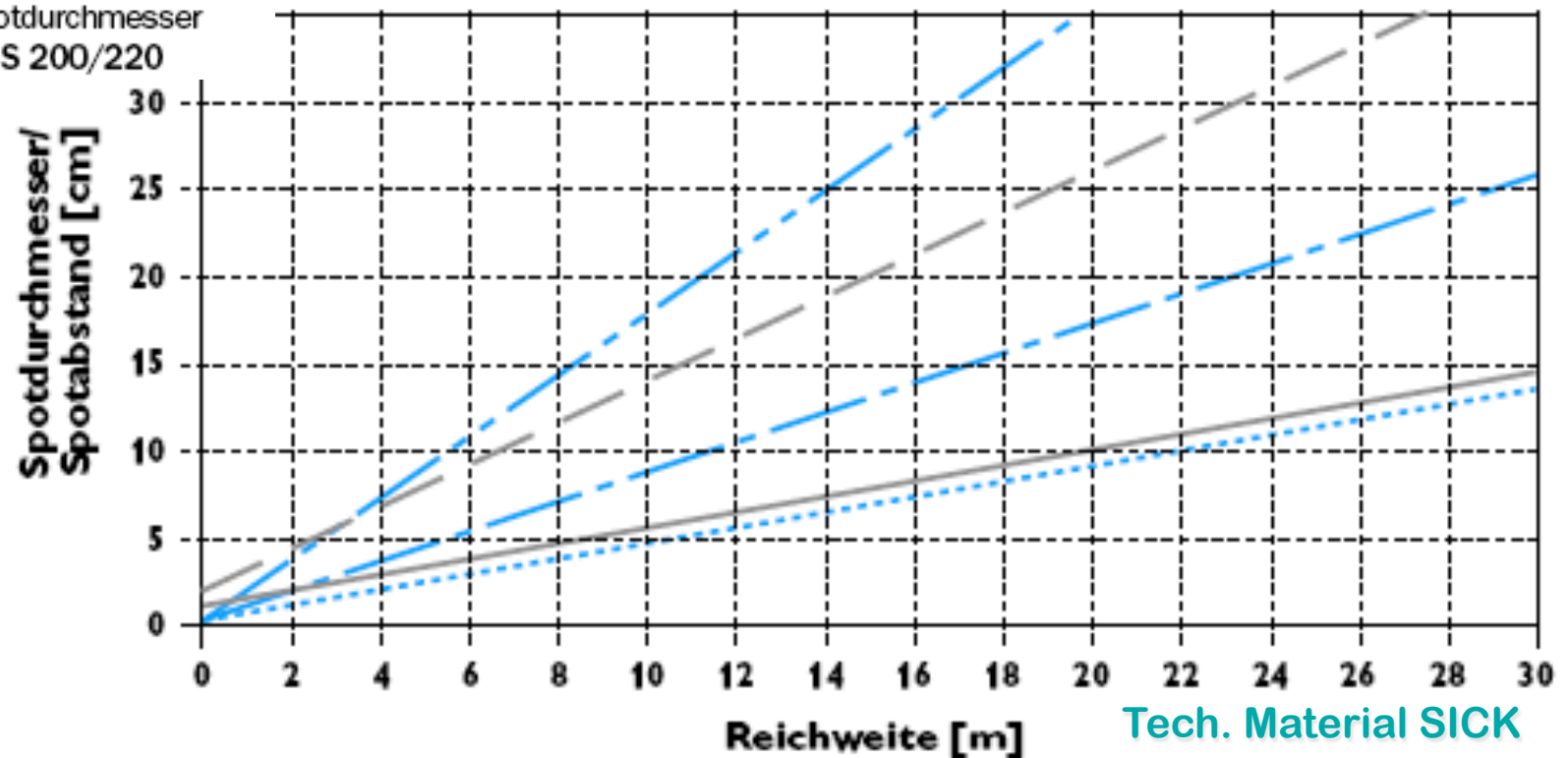
Tech. Material SICK

# Spotdurchmesser, -abstände

Auch Laserstrahlen haben  
einen Öffnungswinkel!

z.B. SICK LMS 200:  $\varnothing 15\text{cm}$  in 30m!

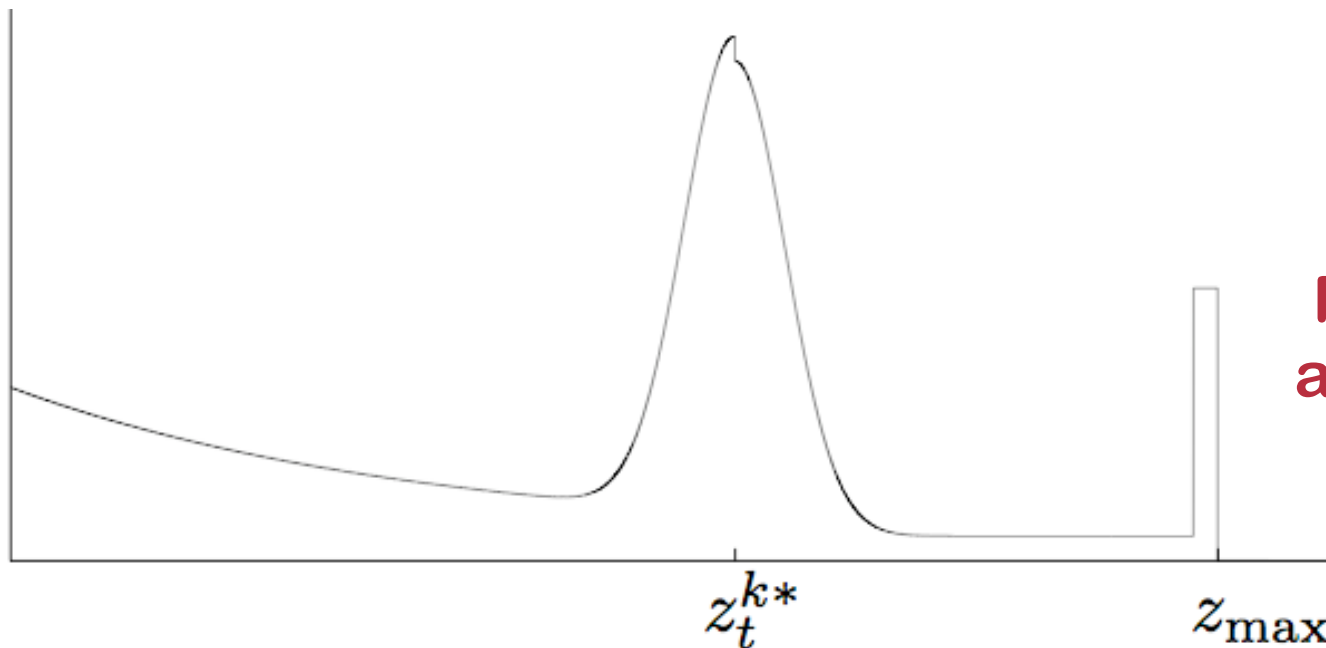
-  Spotabstand bei Winkelauflösung  $1^\circ$
-  Spotabstand bei Winkelauflösung  $0,5^\circ$
-  Spotabstand bei Winkelauflösung  $0,25^\circ$
-  Spotdurchmesser LMS 211/221/291
-  Spotdurchmesser LMS 200/220



# Laserscanner-Fehlermodell

Erwarteter Scanwert ist Addition aus:

- „echtem“ Wert (gaußverteilt)
- Grundrauschen über Messbereich (gleichverteilt)
- dynamische Störungen *vor* echtem Wert (exponentialverteilt)
- Messartefakte in *max. range* (Absorption, Reflexion)



**Meistens trotzdem  
approximiert durch  
Gaußverteilung!**