

2.2. Sensorik

2.2.1. Aufgaben und Begrenzungen

Sensoren sind Grundlage der autonomen Entscheidungsfindung. Nur durch Sensoren kann ein AMR sich in Relation zu seiner Einsatzumgebung setzen und sinnvoll in ihr agieren. Blinde Aktionen verlieren ohne Abgleich mit der umgebenden Realität rasch den Bezug zur Wirklichkeit.

Sensoren erfassen physikalische Größen und wandeln sie um in Signale, die nachgeschaltete Datenverarbeitung umsetzt in verwertbare Informationen. Die physikalischen Größen können am Ort des AMR mit **internen Sensoren** passiv erfassbar sein, oder der AMR erfasst mit **externen Sensoren** physikalische Größen aus seiner Umwelt, sei es durch Einbringen von Energie in die Umwelt und Messung der Reaktion der Umwelt oder durch Messen von rückgestrahlter Energie von Objekten, die extern angestrahlt werden.

Interne Sensoren:

brauchen kaum Kontakt mit der Außenwelt
sammeln Daten über innere Zustände des AMR
erkennen die Lage im Raum

Externe Sensoren:

nehmen Daten aus der Umwelt auf und erkennen mit nachgeschalteter DV

- Position und Orientierung in Bezug auf die Umgebung
- Beschaffenheit der Umwelt (Hindernisse, Objekte, Gefahrensignale)
- Kommandos

Die Messung physikalischer Größen ist unvermeidbar fehlerbehaftet. Jeder Sensor hat so nur einen bestimmten Bereich von Größen, den er gut erfassen kann.

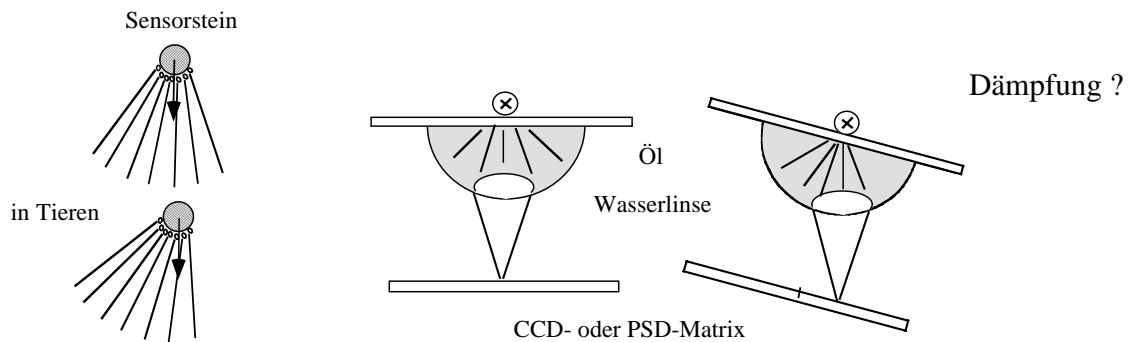
2.2.2. Interne Sensoren

Bestimmung von Lage und Position des AMR durch Messen von Neigung, Orientierung, Drehrichtung, Beschleunigung, Wegen, Lenkwinkel.

Messen intern relevanter Größen wie Temperatur, Füllstand der Batterien, Spannung auf der Stromversorgung.

2.2.2.1. Neigungsmesser (Inklinometer)

Der Sensor erfasst die Richtung der Schwerkraft am Ort des AMR, hier dargestellt für zwei verschiedene Sensoren. Einmal ein Sensorstein, der auf Tastaaren aufliegt, wobei die Verbiegung der Tastaare primär erfasst wird und damit die Richtung der Schwerkraft aus den Verbiegungen eines Bündels von Tastaaren ermittelt wird, und zum anderen eine Wasserlinse in Öl. Die Linse liegt stets am tiefsten Punkt der halbkugeligen Wanne mit Öl. Eine mit der Wanne verbundene Lichtquelle wird durch die Linse auf einen Punkt in einer mit der Wanne verbundenen CCD- oder PSD-Matrix abgebildet. Der Matrixpunkt wird in die Inklinationswinkel umgerechnet. Das System kann Inklinationswinkel bis $\pm 45^\circ$ erfassen.



2.2.2.2. Orientierungsmesser

Der Sensor erfasst eine raumfeste Richtung und damit die Orientierung des AMR.

2.2.2.2.1. Messung der Richtung des Erdmagnetfeldes

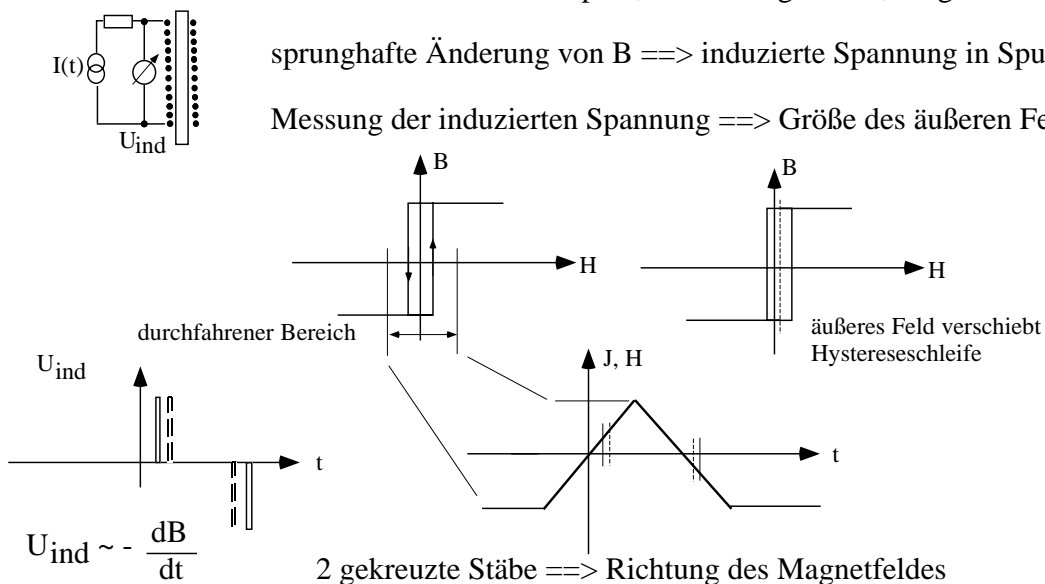
Kompaß: Magnetfeld der Erde wirkt auf drehbaren Stabmagneten

Fluxgate: Magnetfeld wirkt auf Material mit rechteckiger Hystereseschleife

in stromdurchflossener Spule, Strom steigt linear, Magnetfeld auch

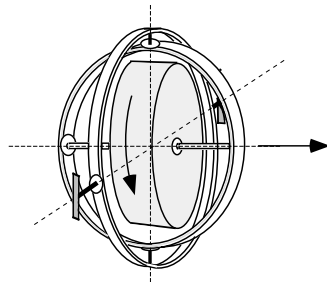
sprunghafte Änderung von $B \implies$ induzierte Spannung in Spule

Messung der induzierten Spannung \implies Größe des äußeren Feldes



2.2.2.2.2. Mechanischer Kreisel

Bei einem rotierenden Körper ist der Drehimpuls konstant in Betrag und Richtung



Kreisel in kardanischer Aufhängung

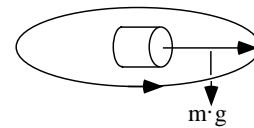
Roboter mit Rahmen dreht sich

==> Kreiselachse bleibt stehen

==> Messung der Drehung

durch äußere Kräfte ==> wirkliche Präzession

durch Richtungsänderung ==> scheinbare Präzession



(einfache Kreisel: wirkliche Präzession einige Grad/ Minute)

(Präzisionskreisel: wirkl. Präzession < 1°/h; Erddrehung: 9°/h auf Breite 50°)

wenn man den Einfluß äußerer Drehmomente ausschließen kann, bleibt die Drehachse raumfest stehen ==> Kreiselkompaß

Vermeidung von äußeren Drehmomenten durch Lagerreibung macht Präzisionskreisel sehr teuer.

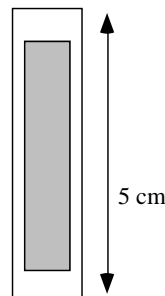
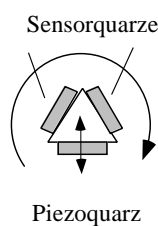
Auch einem schwingenden Pendel kann man formal einen Drehimpuls zuordnen, der raumfest bleibt: Foucauldsches Pendel

2.2.2.2.3. Murata-Kreisel

Ein durch einen Piezokristall zum Schwingen angeregter prismatischer Stab behält seine Schwingungsebene bei ==> verschiedene Anregung von zwei Sensorquarzen an den anderen Dreiecksseiten bei Drehung des Stabes um seine Längsachse ==> Messung der Drehbewegung

==> einfaches System geringer Genauigkeit ohne drehende Teile

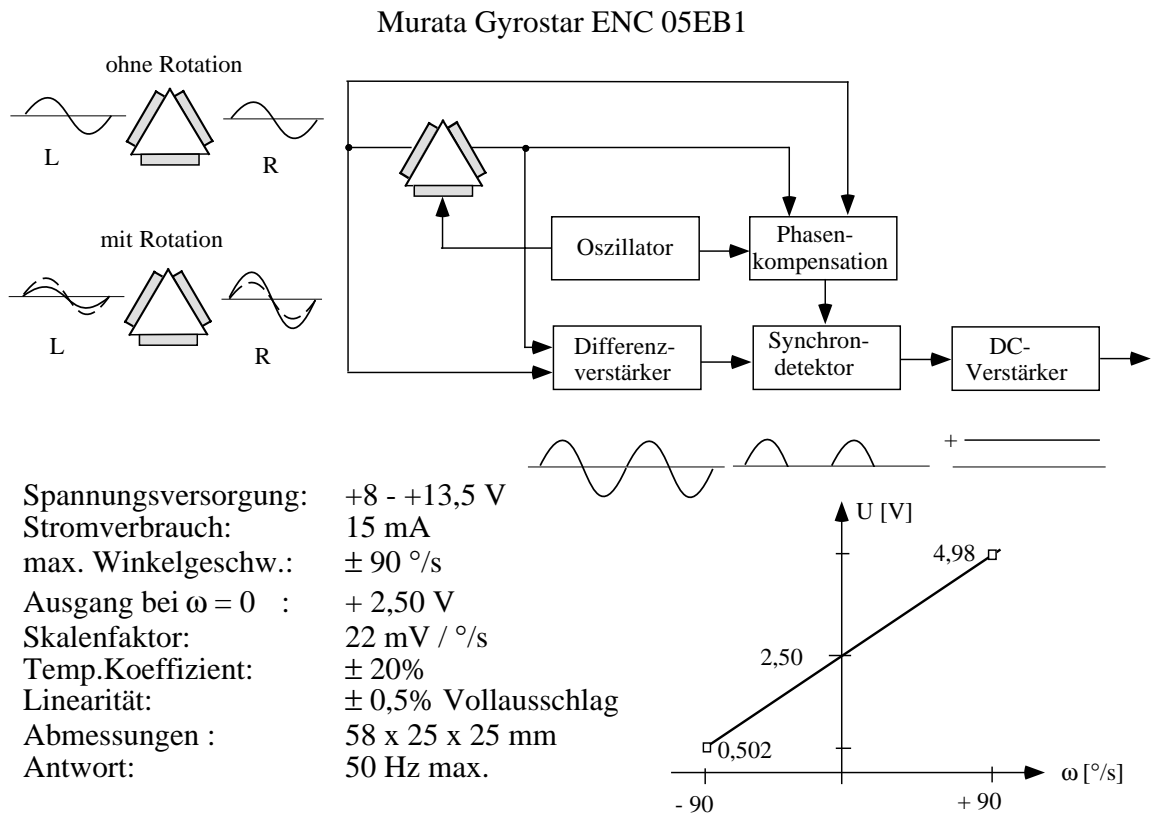
Murata-Kreisel



Drift ~ 1°/min

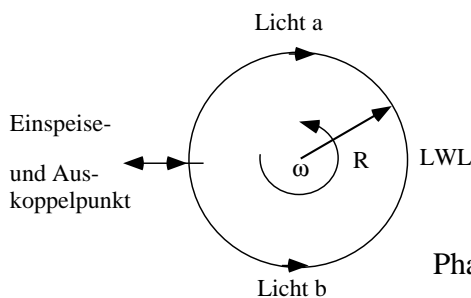
Anwendung: Kamera (Wackelkompensation)
Auto, AMR (Navigationshilfe)

Ein Beispiel für ein kommerzielles System ist der Murata Gyrostar. Bei sinusförmiger Anregung des prismatischen Stabes wird in den Sensorquarzen ebenfalls ein sinusförmiges Signal erzeugt. Bei Drehung ändern sich die Amplituden, was in einem Differenzverstärker gemessen wird.



2.2.2.2.4. Laserkreisel (Faserkreisel)

Die Lichtgeschwindigkeit ist konstant unabhängig von der Bewegung der Materie, in der das Licht läuft (in Vakuum $c_0 = 300 \text{ mm/ns}$). Speist man Licht über einen Strahlteiler in einen Lichtleiterring so ein, dass es in entgegengesetzten Richtungen in dem Ring umläuft, dann macht sich eine Drehung des Ringes bemerkbar als eine Phasenverschiebung der beiden Teilstrahlen (Sagnac-Effekt).



in $t = \frac{2\pi R}{c}$ s läuft das Licht einmal um

der Kreisel hat sich um

$$\Delta s = \omega R t = \omega 2\pi R^2/c \text{ weiterbewegt.}$$

Phasenverschiebung von Licht a gegen Licht b

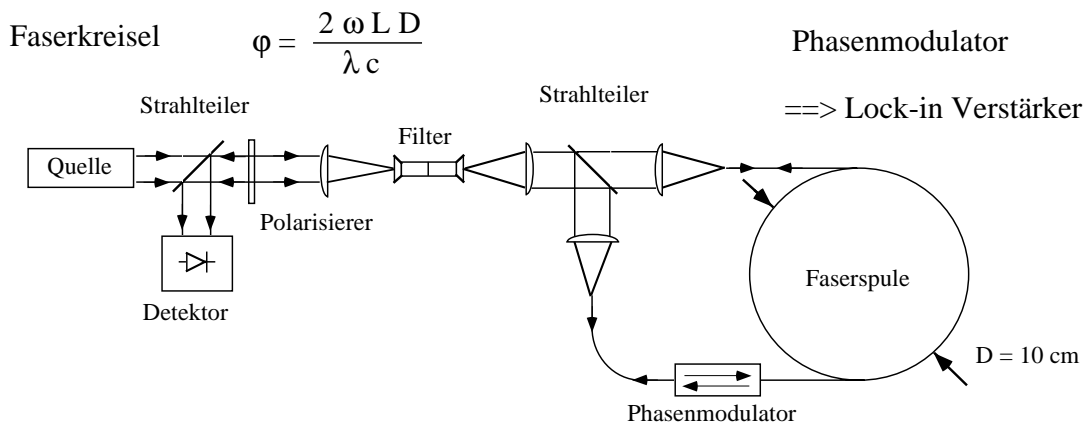
$$\varphi = 2 \Delta s/\lambda \text{ (Sagnac Effekt)}$$

($\lambda = 0,8 \mu\text{m}$, Rotation = $1^\circ/\text{s} \implies \omega = 2\pi/360 = 1,743 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $R = 50 \text{ m}$)

$$\varphi = 2 \cdot 1,743 \cdot 10^{-2} \cdot 2\pi \cdot 50^2 / (3 \cdot 10^8 \cdot 8 \cdot 10^{-7}) = 2,28 \lambda$$

man wickelt den LWL von $L = 2\pi R = 314 \text{ m}$ Länge auf in einer Spule mit

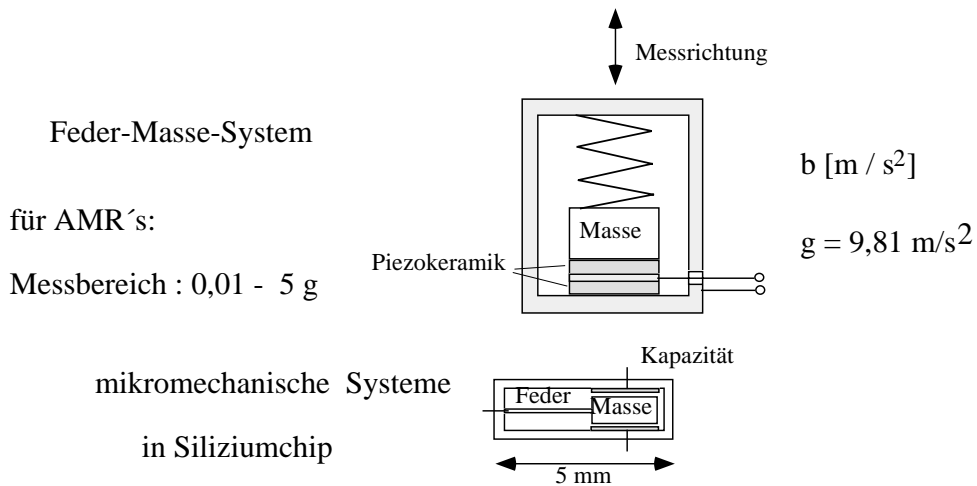
$r = 5 \text{ cm}$ und 1000 Windungen. Dann ist $\varphi = 2 \omega r L / \lambda c = 0,0028 \lambda$



Beispiel: Hitachi Optical Fiber Gyroscope

Eingangsrotationsrate:	$0 - \pm 100^\circ/s$
Minimal erkennbare Rotationsrate:	$\pm 0,01^\circ/s$
Nullpunktdrift:	$\leq 10^\circ/h$
Größe: 100 x 100 x 60 mm	Gewicht: 0,5 kg
Output: analog $\pm 2,5 V$ 350 mA	digital: TTL, 9600 Bit/s
Antwortzeit: 10 ms	Aufwärmzeit: ≤ 1 min

2.2.2.3. Beschleunigungsmesser



2.2.2.4. Inertialsysteme (inertial guidance system, IGS)

Kopplung von 3 Kreiseln und 3 Beschleunigungsmessern
 doppelte Integration der Beschleunigungen ==> Wegstrecken
 Kreiseln ==> Unterscheidung Linearbeschleunigung - Kreisfahrt
 recht teuer bei hoher Genauigkeit

2.2.2.5. Auto-Navigationssysteme

Kilometerzähler für Wegstrecken ($\pm 1\%$)

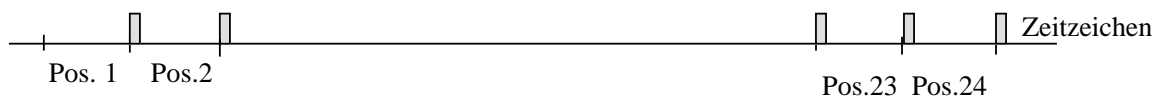
+ Murata-Kreisel für Kurvenfahrten

+ digitale Straßenkarte ==> Synchronisation solange Auto auf Straße bleibt

==> Kenntnis der Position des Autos, verbale Ausgabe für den Fahrer oder Anzeige der Position auf einem Display

2.2.2.6. GPS (global positioning system)

24 Satelliten senden in festen Zeitschlitzen Zeitzeichen, Nummer des Satelliten und ihre Position zum Zeitpunkt der Abgabe des Zeitzeichens. Die Codierung erfolgt als pseudo-random-code mit zwei Frequenzen $L1 = 1575,42$ und $L2 = 1227,6$ MHz.



Die Zeitzeichen kommen von einer Atomuhr an Bord jedes Satelliten mit einem $\Delta f/f = 10^{-11}$;

gefordert $\Delta s = 30$ m entspricht $\Delta t = 10$ ns ==> alle 10^3 s oder 20 min Resynchronisation;

Empfänger bestimmt aus 4 Satelliten seine Position (weltweit, ± 50 m);

Differential GPS: eine nahe Bodenstation zusätzlich ==> Genauigkeit ± 1 m.

GPS: Betreiber DoD, USA

Glonass: Betreiber Russland Kommandostation und Monitor-Stationen

Galileo: Betreiber EU, geplant ab 2004

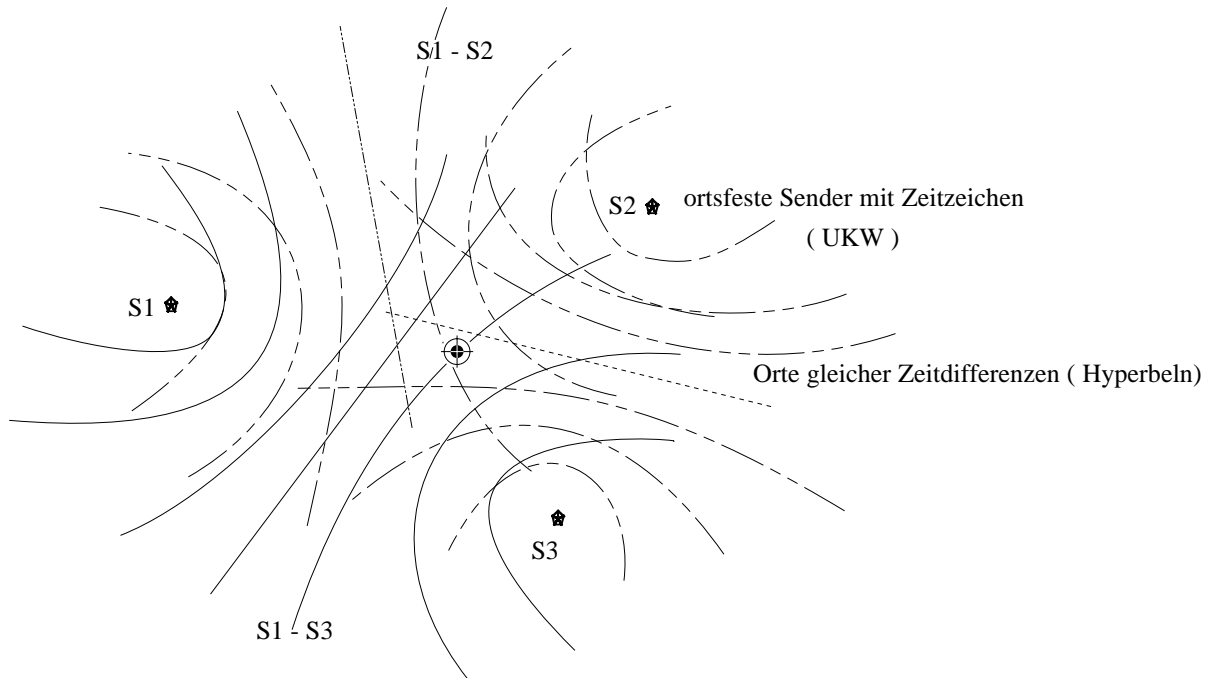
Anwendungen:

- Schiffsnavigation (auf See GPS, im Hafen Differential GPS)
- Flugzeugnavigation (Problem durch Fluggeschwindigkeit, zusammen mit IGS)
- Auto (Überwachung von LKW-Flotten, Mietwagen der Oberklasse)
- Wanderer (Abmessungen Handy)

Probleme:

Abschattung durch Berge, feuchtes Laubdach, Tunnel, Mehrfachinterferenzen

2.2.2.7. Funkgestützte Systeme (Loran)



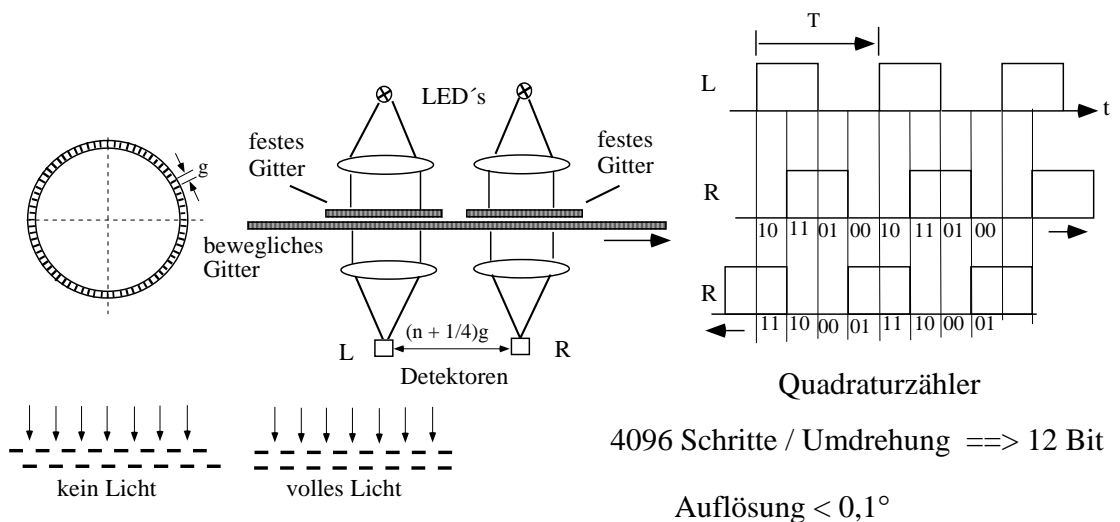
Ein System ortsfester Sender sendet synchronisiert Zeitzeichen. Die Orte gleicher Zeitdifferenz zwischen zwei Sendern liegen auf einer Hyperbel. Aus den Zeitdifferenzen von drei Sendern kann der Ort bestimmt werden.

Genauigkeit : ± 300 m; Impulse von 100 Wellenlängen bei 100 MHz $\implies 1 \mu\text{s}$

2.2.2.8. Encoder

Messung von Winkelstellungen mit optischen Encodern

- inkrementell: Codierscheiben wie in einer Maus. Die Drehrichtung wird aus den Signalen von zwei Gittern bestimmt, die um 1/4 Gitterkonstante gegeneinander verschoben sind.



- absolut: Scheibe mit n Strichkreisen
Graycodierung in n Bit; Nachteil: Auflösung ≤ 8 Bit

Anwendung von Encodern:

2.2.2.8.1. Messung von Wegstrecken

Ein Rad mit einem Winkelencoder

$N = \#$ Impulse / Radumdrehung

$R =$ Radius eines Rades

$n =$ gemessene Impulsanzahl in eine Richtung

$$\implies \boxed{\text{Wegstrecke } s = n \cdot \frac{2\pi R}{N}}$$

Vorr.: kein Schlupf

Vermeiden von Schlupf: Messung an frei laufenden Rädern

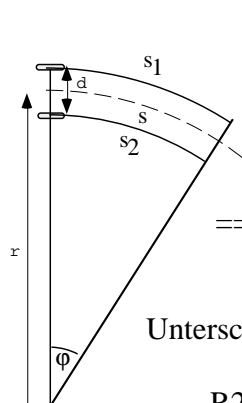
Beispiel:

$R = 10$ cm, $N = 2000$ Impulse/Radumdrehung

$\implies \Delta s = 628,3 / 2000 = 0,314$ mm /Impuls

2.2.2.8.2. Messung von Winkeln

Zwei Räder im Abstand d legen die Strecken s_1 und s_2 zurück. Ihre Encoder messen Impulszahlen n_1 und n_2 .



$$s_1 = 2\pi \left(r + \frac{d}{2} \right) \cdot \frac{\phi}{360^\circ} = n_1 \cdot \frac{2\pi R}{N}$$

$$s_2 = 2\pi \left(r - \frac{d}{2} \right) \cdot \frac{\phi}{360^\circ} = n_2 \cdot \frac{2\pi R}{N}$$

$$\implies \boxed{\phi = 360^\circ \cdot (n_1 - n_2) \cdot \frac{R}{d \cdot N}}$$

Differenz der Meßwerte
unabhängig vom Lenkradius r

Unterschiedliche Radien der Räder:

$$R_2 = R, R_1 = R + \Delta R \implies \Delta \phi = 360^\circ \cdot \frac{n_1}{N} \cdot \frac{\Delta R}{d}$$

$$R = 10 \text{ cm}, \Delta R = 1 \text{ mm}, s = 6 \text{ m}, d = 50 \text{ cm} \implies \Delta \phi = 7,2^\circ$$

\implies Messung von Winkeln mit Encodern problematisch: Drift unvermeidlich

Messung von Wegstrecken erheblich genauer

Wegstrecke $s = \frac{s_1 + s_2}{2} = \frac{n_1 + n_2}{2} \cdot \frac{2\pi R}{N}$ Summe der Meßwerte

2.2.2.8.3. Tachogeneratoren

Gleichstromgenerator: $U \sim \text{Drehzahl (Tacho)}$

2.2.2.9. *Überwachung interner Zustände*

- interne Ströme und Spannungen (Motore, Batterien)
- Temperaturen (Motore, Batterien, Stellglieder)
- Öffnungszustände (Klappen, Türen, Bremsen)
- Betriebszustand (Kontrolle, welches Programm gerade aktiv)

Reaktionen:

Anzeige Normalzustand (Displays, Sprachausgabe, Blinker, ...)

Fehlermeldungen (Displays, akustische Signale, ...)

2.2.3. **Externe aktive Sensoren**

Es werden extern von der Umwelt zur Verfügung gestellte Werte gemessen:

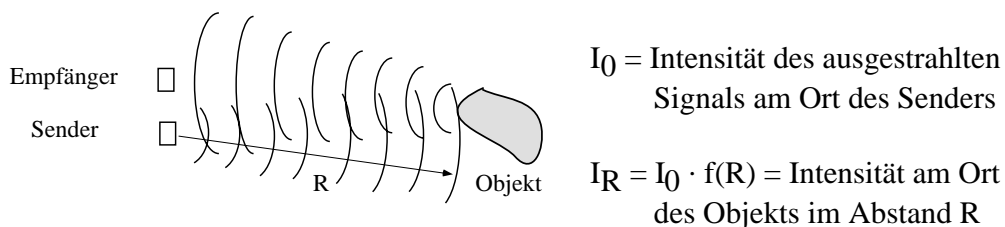
aktiv: Es wird mit einem Eintrag von Energie die Umwelt stimuliert und die Antwort gemessen und ausgewertet.

passiv: In der Umwelt vorhandene Signale werden gemessen und ausgewertet.

2.2.3.1. *Entfernungsgebende aktive Sensoren*

Prinzip:

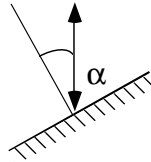
Einbringen von Energie in die Umwelt und Auswerten von Laufzeiten oder Richtungen der rückgestrahlten Energie zur Entfernungsmessung. Ein oder mehrere Sender strahlen Impulse von Energie (Schall, Licht, Mikrowellen, ...) aus, und Empfänger erfassen von Objekten rückgestrahlte Energie und ziehen daraus Rückschlüsse auf die Entfernungen der Objekte.



$$f(R) = \begin{cases} \alpha \cdot \text{const} & \text{Laserstrahl oder eng gebündelter Strahl} \\ a / R^2 & \text{normale Lichtquelle; das Objekt schneidet Anteil } a \text{ heraus} \\ & \text{Öffnungskegel am Ort des Objekts groß gegen Objekt} \\ e^{-R/\gamma} \cdot a / R^2 & \text{Absorption im Medium} \\ & \text{(Licht in trübem Wasser, Ultraschall hoher Frequenz in Luft)} \end{cases}$$

Am Objekt reflektiertes Signal

$$I_1 = A \cdot \rho(\alpha) \cdot I(R)$$



$$A = \begin{cases} \text{Fläche des Objekts für normale Quelle} \\ \text{Fläche des Laserstrahls mit Durchmesser } \varnothing \\ \text{wenn Fläche des Objekts } > \pi/4 \cdot \varnothing^2 \end{cases}$$

$\rho(\alpha)$ = Reflexionsvermögen (abh. vom Winkel zur Normalen)
 (99% bei spiegelnder Reflexion und $\alpha = 0$
 ... 0,01% bei stark absorbierender Oberfläche - Ruß)

Intensität am Ort des Detektors

$$I(D) = I_1 \cdot f_2(R) \cdot B \quad f_2(R) = \begin{cases} b/R^2 & b = \text{Anteil den der Detektor} \\ & \text{herausschneidet} \\ b/R^2 \cdot e^{-R/\gamma} & B = \text{Fläche des Detektors} \end{cases}$$

$$I(D) = A \cdot I_0 \cdot \rho(\alpha) \cdot f(R) \cdot f_2(R) \cdot B$$

$I(D) = A \cdot B \cdot \frac{1}{R^4} \cdot I_0 \cdot \rho(\alpha) \cdot a \cdot b$	<p>Radargleichung (ohne Laserstrahl, ohne Absorption)</p>								
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="border: none; text-align: center;">Fläche Objekt</td> <td style="border: none; text-align: center;">!</td> <td style="border: none; text-align: center;">Reflexion am Objekt</td> <td style="border: none; text-align: center;">Öffnungsanteile von Objekt und Detektor</td> </tr> <tr> <td style="border: none; text-align: center;">Fläche Detektor</td> <td style="border: none; text-align: center;">!</td> <td style="border: none; text-align: center;">Intensität des Senders</td> <td></td> </tr> </table>	Fläche Objekt	!	Reflexion am Objekt	Öffnungsanteile von Objekt und Detektor	Fläche Detektor	!	Intensität des Senders		
Fläche Objekt	!	Reflexion am Objekt	Öffnungsanteile von Objekt und Detektor						
Fläche Detektor	!	Intensität des Senders							

$$I(D) = \pi/4 \cdot \varnothing^2 \cdot B \cdot \frac{1}{R^2} \cdot I_0 \cdot \rho(\alpha) \cdot a \cdot b$$

Fläche Laserstrahl
!
Intensität am Detektor bei Laserstrahlbeleuchtung ohne Absorption

$$I(D) = A \cdot B \cdot \frac{1}{R^4} \cdot I_0 \cdot \rho(\alpha) \cdot a \cdot b \cdot e^{-2R/\gamma}$$

Absorption
Intensität am Ort des Detektors bei normaler Beleuchtung und Absorption

Die extreme Bündelung eines Laserstrahls macht ihn zu einem bevorzugten Mittel für ein Radarsystem, solange er das Objekt nicht voll ausleuchtet. Dann tritt die quadratische Abhängigkeit vom Abstand nur im rückgestrahlten Anteil auf mit erheblichem Gewinn an Intensität des Signals am Detektor.

2.2.3.2. *Ultraschall*

2.2.3.2.1. Prinzip

Ein Schallsender erzeugt Schallimpulse kurzer Dauer, mit denen ein Objekt angestrahlt wird. Gemessen wird die Laufzeit bis zum ersten Echo (sonic automatic ranging, SONAR). Die Schallgeschwindigkeit in Luft ist $c_{US} = 330 \text{ m/s}$ oder 330 mm/ms (in Wasser $c_{US} = 1500 \text{ m/s}$)

Meist verwendet:

Ultraschall mit Frequenzen von 25 - 50 - 100 kHz, das entspricht Wellenlängen von 13 - 6,6 - 3,3 mm in Luft

In Luft starke Absorption von Ultraschall; sie begrenzt die Reichweite auf ca 10 m.

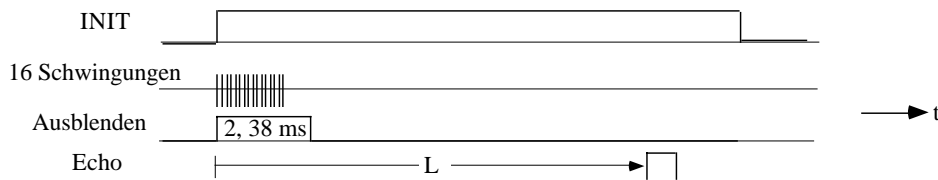
Man sendet kurze Impulse von ca. 1 ms Dauer, das entspricht 50 Wellenzügen bei $f = 50$ kHz.

Mit der Laufzeit L ist die Entfernung zu einem Objekt

$$s = c_{US} \cdot L / 2$$

Ein typischer Sensor ist ein Sender-Empfänger-Modul (Transducer) von Polaroid, ursprünglich verwendet zur Entfernungsmessung in der Polaroid-Kamera.

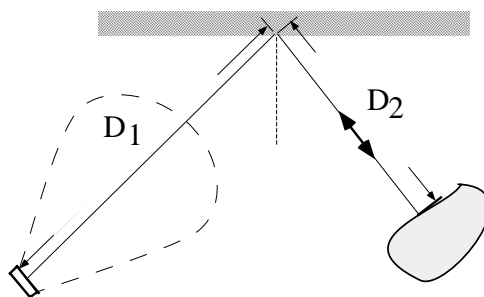
Polaroid-Sensor : Membran 50 mm Ø, Sender und Empfänger, elektrostatisch
 $f = 49,1$ kHz, 16 Schwingungen
 Öffnungskegel 30°, Reichweite 20 cm - 10,5 m, Auflösung 1%



Das System mit eingebauter Elektronik misst direkt Entfernungen.

2.2.3.2.2. Fehlerquellen

- spiegelnde Reflexion an glatten Wänden
 $f = 49$ kHz $\implies \lambda = 6,75$ mm
 \implies Oberflächen mit Rauigkeiten $\ll 6$ mm sind glatt für US



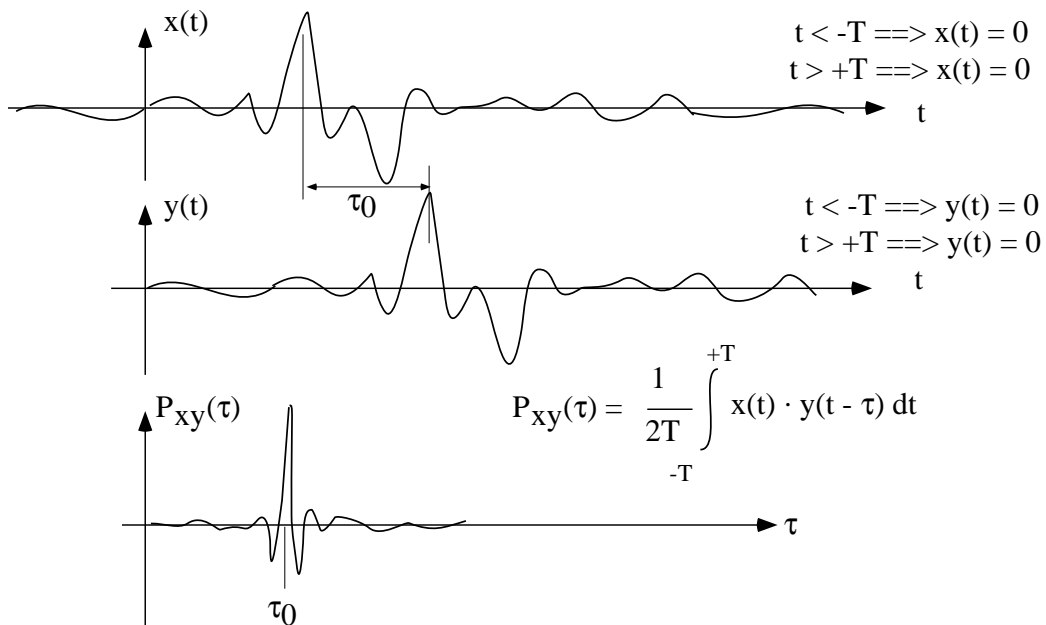
vorgetäuschte Entfernung $D_1 + D_2$
 ohne Objekt: spiegelnde Fläche unsichtbar

- stark absorbierende Oberflächen erzeugen zu kleine Echos (Vorhänge, "weiche" Stoffe)
 \implies Objekte werden erst in großer Nähe gesehen
- der große Öffnungswinkel (30°)
 - macht präzise Richtungslokalisierung kaum möglich
 - erzeugt Übersprechen (crosstalk) benachbarter Transducer

Umgehen dieser Fehler durch Korrelation von Sende- und Empfangssignal

2.2.3.2.3. Korrelationen

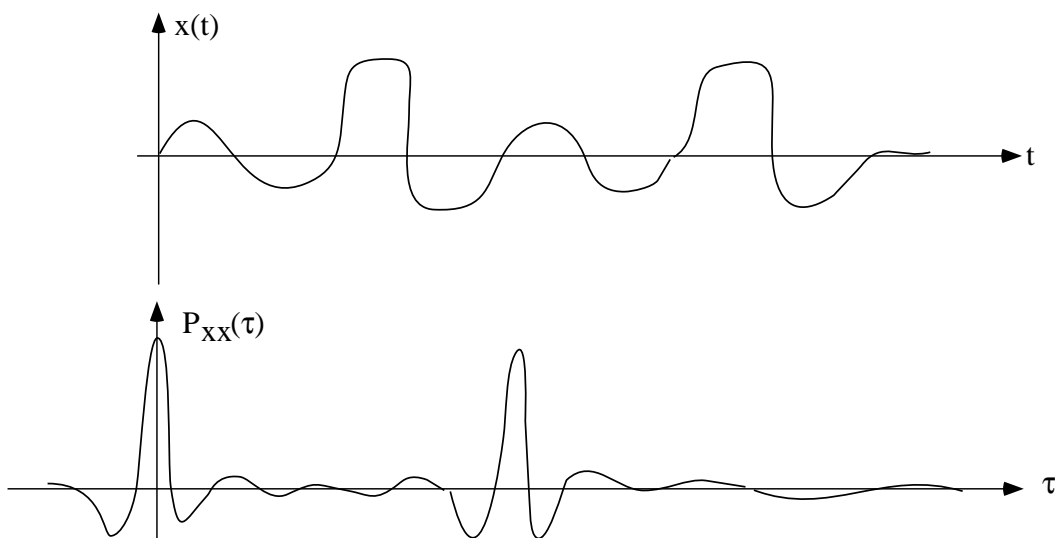
Die **Kreuzkorrelation** misst die Ähnlichkeit von Signalfolgen $x(t)$ und $y(t)$:



wieweit sind zwei Signale $x(t)$ und $y(t)$ noch einander ähnlich (miteinander korreliert), wenn man sie um τ gegeneinander verschiebt? Wenn $x(t)$ und $y(t)$ normiert sind, $|x(t)| \leq 1$ $|y(t)| \leq 1$, dann ist auch $|P_{xy}(\tau)| \leq 1$ normiert.

Die **Autokorrelation** misst die Ähnlichkeit innerhalb einer Signalfolge $x(t)$

$$P_{xx}(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cdot x(t - \tau) dt$$



insbesondere periodische Funktionen haben eine Autokorrelationsfunktion, die die gleiche Periode hat wie die periodische Signalfolge $x(t)$.

Die Berechnung der Korrelation erfolgt zweckmäßig über den Faltungssatz:

Gegeben: $x(t), y(t)$; gesucht: $R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot y(\tau - t) dt$

Faltungssatz:

Fouriertransformierte $g_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_{xy}(\tau) \cdot e^{i\omega\tau} d\tau = F(\omega) \cdot G(\omega)$

mit $F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{i\omega t} dt$ und $G(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) \cdot e^{i\omega t} dt$

als Fouriertransformierte von $x(t)$ und $y(t)$

$\implies g_{xy}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} (F(\omega) \cdot G(\omega)) \cdot e^{-i\omega\tau} d\omega$ Rücktransformation von $F(g_{xy}(\omega))$

$$p_{xy}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F^*(\omega) \cdot G(\omega) \cdot e^{-i\omega\tau} d\omega$$

Diskretisierung der Korrelation

iskretisierung: $x(t) \rightarrow \{x_j\}$; $y\{t\} \rightarrow \{y_j\}$; Abtasttheorem beachten: $x_j = x(j \cdot \Delta t)$

$x(t), y(t) = 0$ für $t < 0$ und $t \geq N \cdot \Delta t$

chnelle Fouriertransformation: $F_x(\omega) \rightarrow \{F_{x_k}\}$; $F_y(\omega) \rightarrow \{F_{y_k}\}$

$F_{x_k} = \sum x_j \cdot e^{i2\pi j k / N}$ $F_{y_k} = \sum y_j \cdot e^{i2\pi j k / N}$ $j, k = 0, \dots, N-1$; $N = 2^n$

ultiplikation: $F_{z_k} = F_{x_k}^* \cdot F_{y_k}$

ücktransformation: $P_{xy}(\tau) \rightarrow \{P_{xy}(\tau_m)\}$

$P_{xy}(\tau_m) = \sum F_{z_k} \cdot e^{-i2\pi m k / N}$; $\tau_m = m \cdot \Delta t$

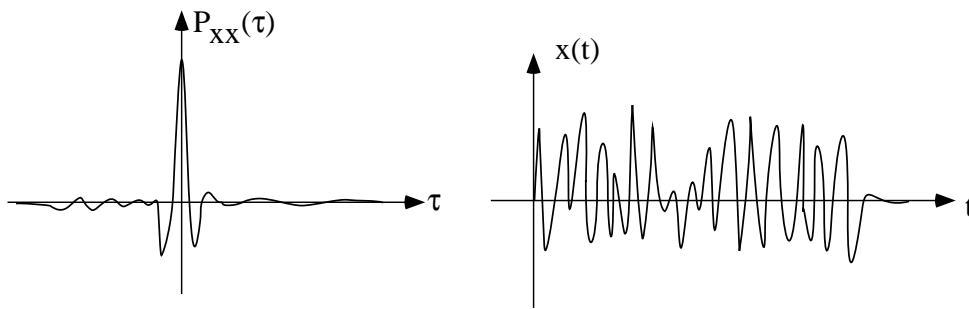
2.2.3.2.4. Korrelation von US-Signalen

Sendeimpuls:

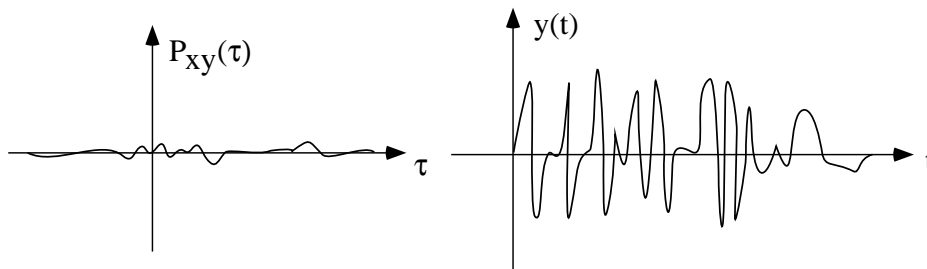
langer Impuls (einige ms) von bandbegrenztem Rauschen mit guter Autokorrelation (Pseudo-Random Impuls); bei mehreren Sendern auf kleine Kreuzkorrelation der verschiedenen Sendeimpulse achten.

Echo:

Überlagerung der reflektierten Pseudorandomimpulse der verschiedenen Objekte am Ort des Empfängers.



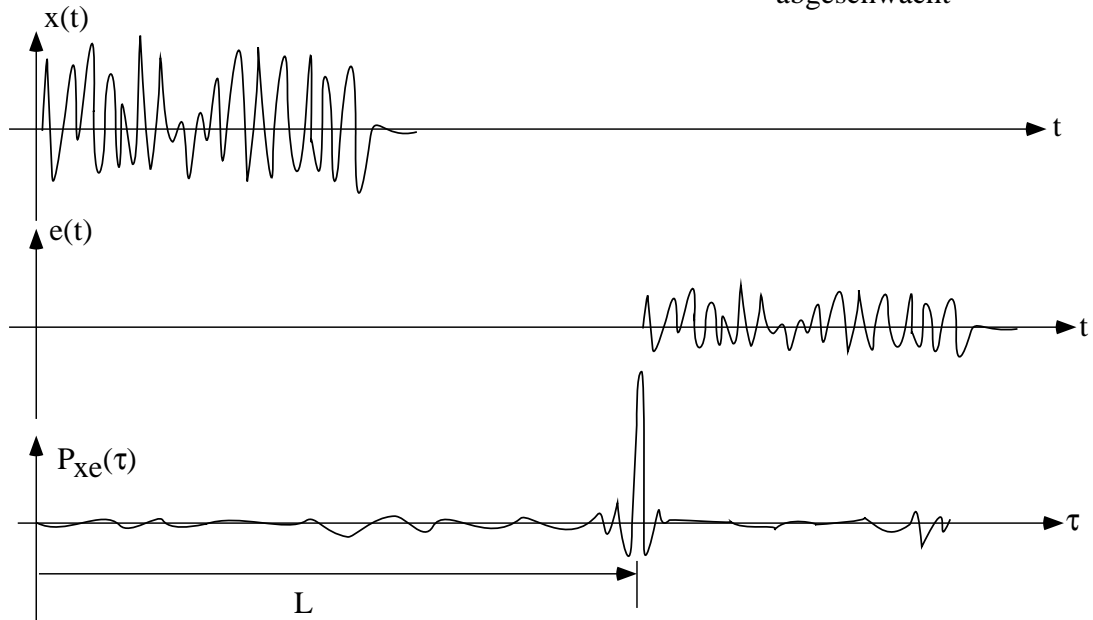
kleine Kreuzkorrelation zu anderen Sendeimpulsen



Laufzeitmessung über Korrelationen

Sendeimpuls: Rauschen $x(t)$

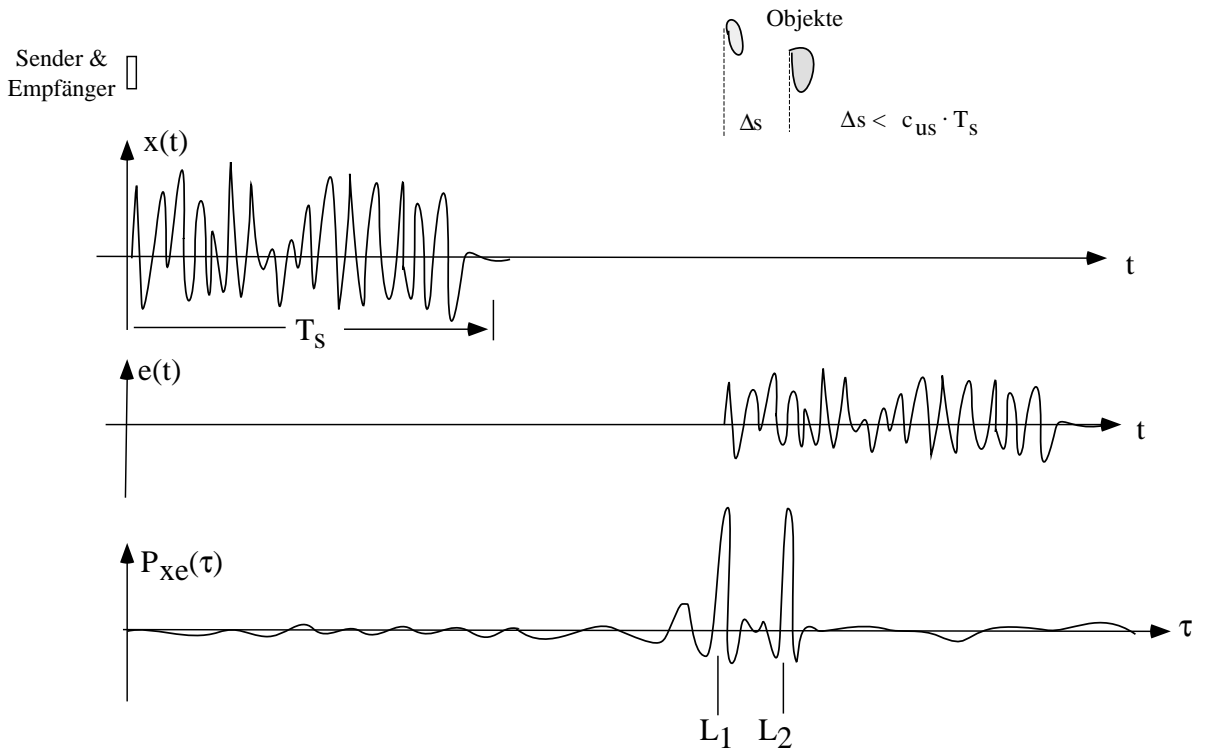
Echo: gleiches Rauschsignal $e(t)$
abgeschwächt



Die Kreuzkorrelation von Sende- und Echoimpuls ergibt einen scharfen Peak bei der doppelten Laufzeit des Signals vom Sender zum Objekt.

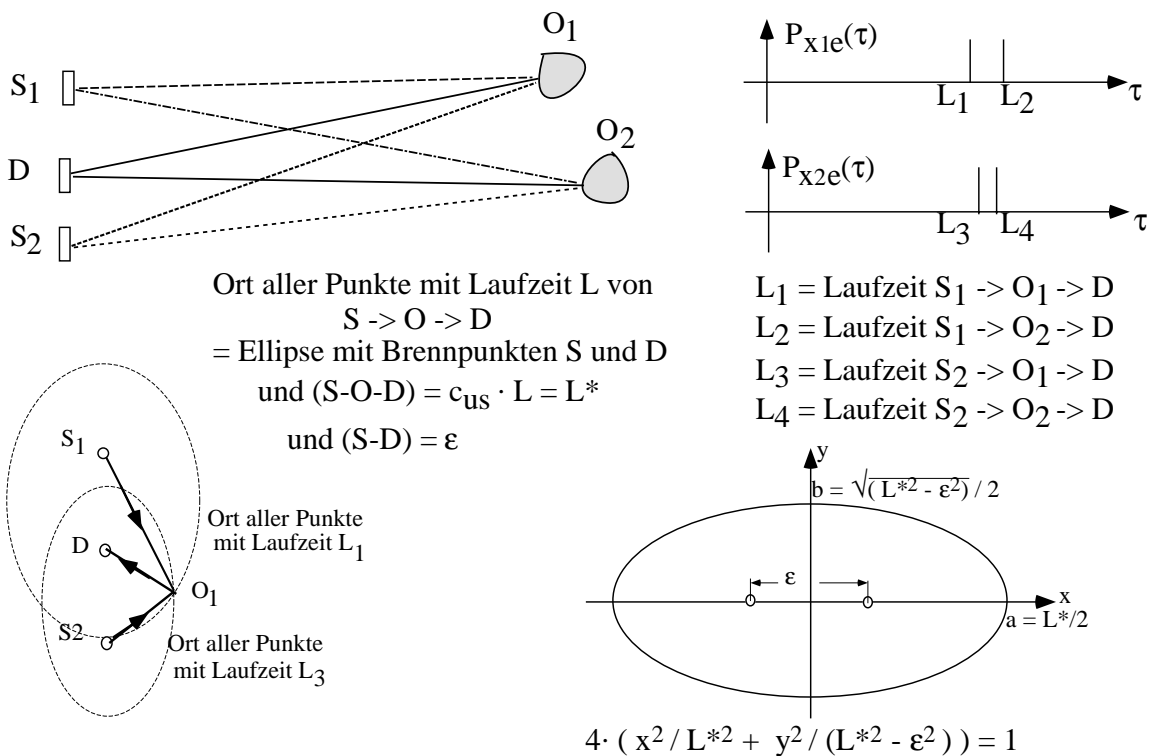
Das erlaubt eine **Steigerung der Entfernungsauflösung:**

Während beim einfachen Laufzeitverfahren die Impulslänge des Sendesignals den minimalen Abstand zweier Objekte bestimmt, ist hier die Schärfe des Korrelationspeaks bestimmend für die Auflösung.

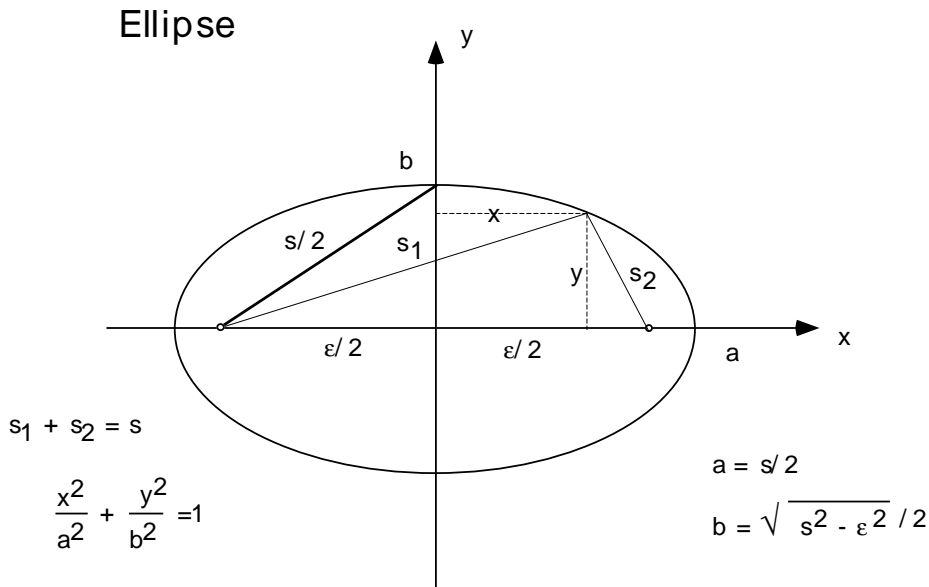


Bei Verwendung von zwei oder mehr Sendern ist eine **Verbesserung der Ortsauflösung** möglich, ohne daß Übersprechen (crosstalk) stört. Die Kreuzkorrelation der Sendeimpulse sei klein durch geeignete Wahl der Pseudozufallsfolgen.

Die Objekte liegen auf Ellipsen mit Sender und Empfänger jeweils in den Brennpunkten.



Aus der Laufzeit L von Sender - Objekt - Empfänger ergibt sich die Schallstrecke $s = c_{\text{US}} \cdot L$. Die Entfernung ϵ zwischen Sender - Empfänger legt die Ellipse fest. In einem angepassten Koordinatensystem mit Sender- Empfänger als x-Achse und dem Nullpunkt in der Mitte ist die Gleichung der Ellipse.



$$s_1 = ((\epsilon/2 + x)^2 + y^2)^{1/2} \quad s_2 = ((\epsilon/2 - x)^2 + y^2)^{1/2}$$

$$s^2 = s_1^2 + s_2^2 + 2 s_1 s_2$$

$$(s^2 - s_1^2 - s_2^2)^2 = 4 s_1^2 s_2^2$$

$$s^4 - 2 s^2 (s_1^2 + s_2^2) + (s_1^2 + s_2^2)^2 = 4 s_1^2 s_2^2$$

$$s^4 - 4 s^2 (x^2 + y^2 + \epsilon^2/4) + 4(y^2 + x^2 + \epsilon^2/4)^2$$

$$= 4((x + \epsilon/2)^2 + y^2)((\epsilon/2 - x)^2 + y^2)$$

$$s^4 - 4 s^2 (x^2 + y^2 + \epsilon^2/4) + 4(y^4 + 2y^2(x^2 + \epsilon^2/4) + x^4 + 2 x^2 \epsilon^2/4 + \epsilon^4/16)$$

$$= 4(y^4 + 2y^2(x^2 + \epsilon^2/4) + x^4 - 2 x^2 \epsilon^2/4 + \epsilon^4/16)$$

$$s^4 - 4s^2(x^2 + y^2 + \epsilon^2/4) + 4x^2 \epsilon^2 = 0$$

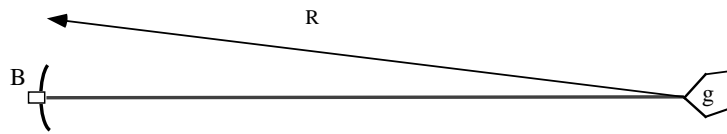
$$s^2 (s^2 - \epsilon^2) = 4(s^2 y^2 + x^2 (s^2 - \epsilon^2))$$

$$1 = 4 \left(\frac{x^2}{s^2} + \frac{y^2}{s^2 - \epsilon^2} \right) \implies$$

$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$	$a = s/2$ $b = \sqrt{s^2 - \epsilon^2} / 2$
---	--

Aus den Schnittpunkten der Ellipsen folgen nach einiger Rechnung die Orte der Objekte.

2.2.3.3. Laser-Entfernungsmesser



Radargleichung für Laser-Entfernungsmesser

$$I(D) = \pi/4 \cdot \varnothing^2 \cdot B \cdot \frac{1}{R^2} \cdot I_0 \cdot \rho(\alpha) \cdot a \cdot b$$

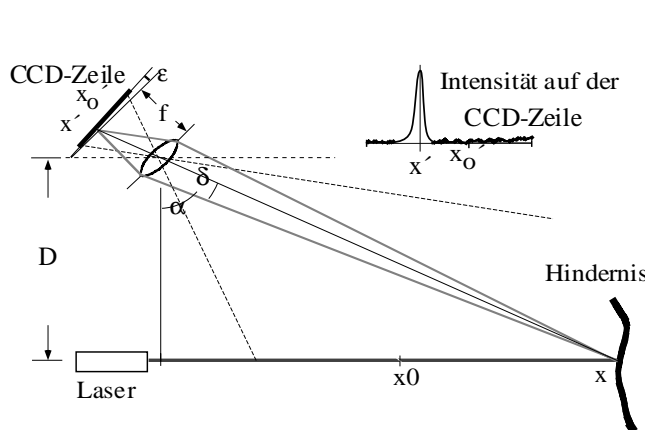
|
Fläche Laserstrahl

Aus der Radargleichung folgt für die Parameter eines Sensors

- Detektor möglichst empfindlich (und schnell)
- Detektorfläche B möglichst groß
- reflektierter Anteil $\rho(\alpha)$ darf klein sein (~ 5%)
- I_0 soll groß sein (ggf. Impuls, einige Watt)

2.2.3.3.1. Triangulationsverfahren

Ein Laser strahlt das Objekt an. Sein Strahl trifft das Objekt im Abstand x . Senkrecht zum Strahl steht in Entfernung D eine Kamera, die unter einem Winkel α auf den Strahl schaut. Die Linse mit Brennweite f bildet Punkt x ab auf x' auf einer CCD-Zeile (oder einem PSD-Sensor)



$$\text{tg } \delta = \frac{x' - x_0'}{f} \quad \text{tg } \alpha = \frac{x_0}{D}$$

$$x = D \cdot \text{tg}(\alpha + \delta)$$

$$x = D \cdot \frac{\text{tg } \alpha + \text{tg } \delta}{1 - \text{tg } \alpha \cdot \text{tg } \delta}$$

$$x = D \cdot \frac{\frac{x_0}{D} + \frac{x' - x_0'}{f}}{1 - \frac{x_0}{D} \cdot \frac{x' - x_0'}{f}}$$

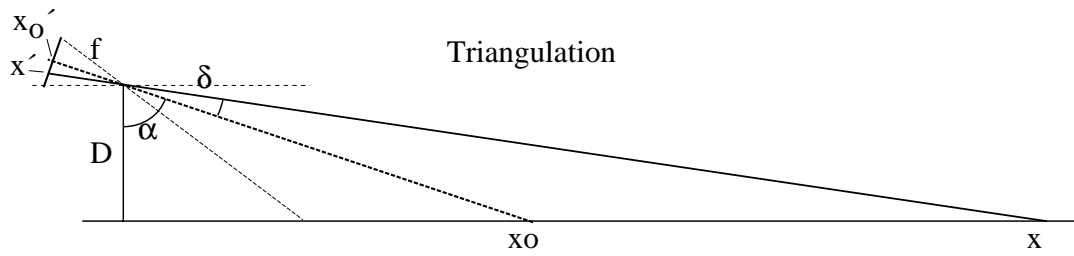
Beispiel

Laser	0,5 mW bei 870 nm
Basis	D = 250 mm
CCD-Zeile	256 Pixel
Brennweite	f = 10 mm
Distanzen	0,5 - 6 m

$\epsilon \neq 0$ Scheimpflug-Anordnung:
die Linse fokussiert scharf für alle Winkel δ

$$\Rightarrow \text{tg } \delta = \frac{x' - x_0'}{f} \cdot \cos \epsilon$$

statt CCD-Zeile auch PSD möglich

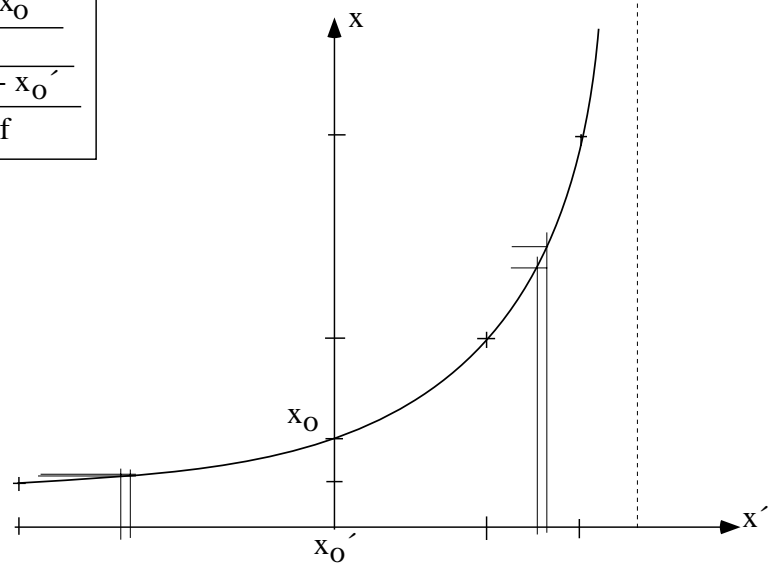


$$x = D \cdot \frac{\frac{x_0}{D} + \frac{x' - x_0'}{f}}{1 - \frac{x_0}{D} \cdot \frac{x' - x_0'}{f}}$$

$$\frac{x_0}{D} = 30\text{cm} / 10\text{cm} = 3$$

$$f = 20\text{mm}$$

$x' - x_0'$	x
- 6,6 mm	16,6 cm
0,0 mm	30 cm
3,3 mm	63 cm
5,0 mm	130 cm
6,6 mm	--> ∞



Ein Beispiel für einen Triangulationssensor ist der Sharp GP2D02

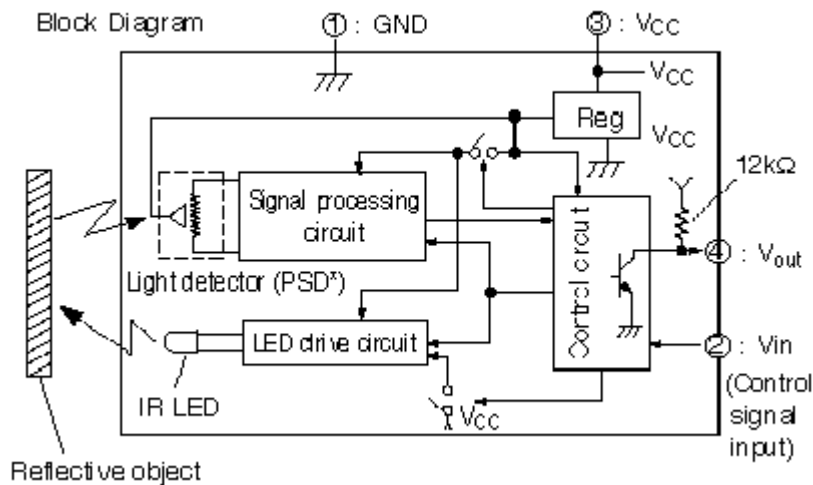


Fig. 1 Distance Measuring Output vs. Distance to Reflective Object

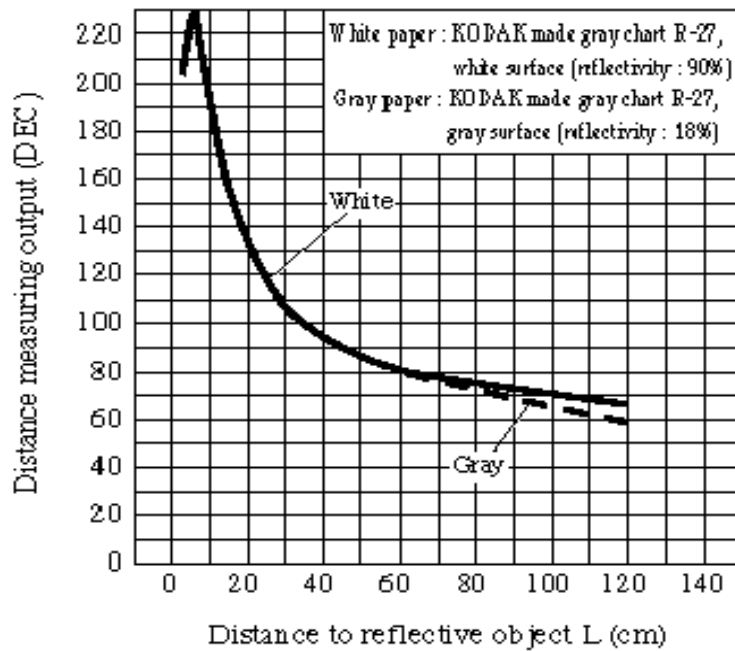
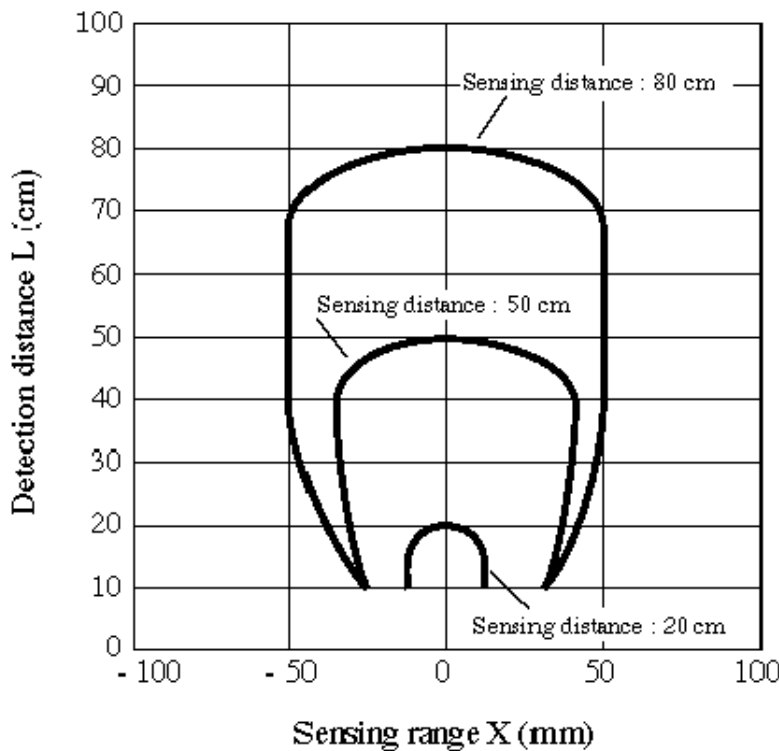
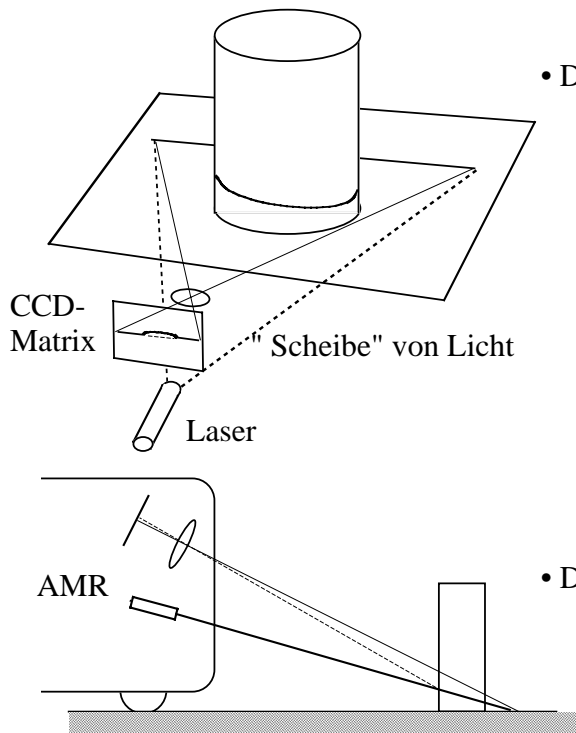


Fig. 2 Detection Distance vs. Sensing Range

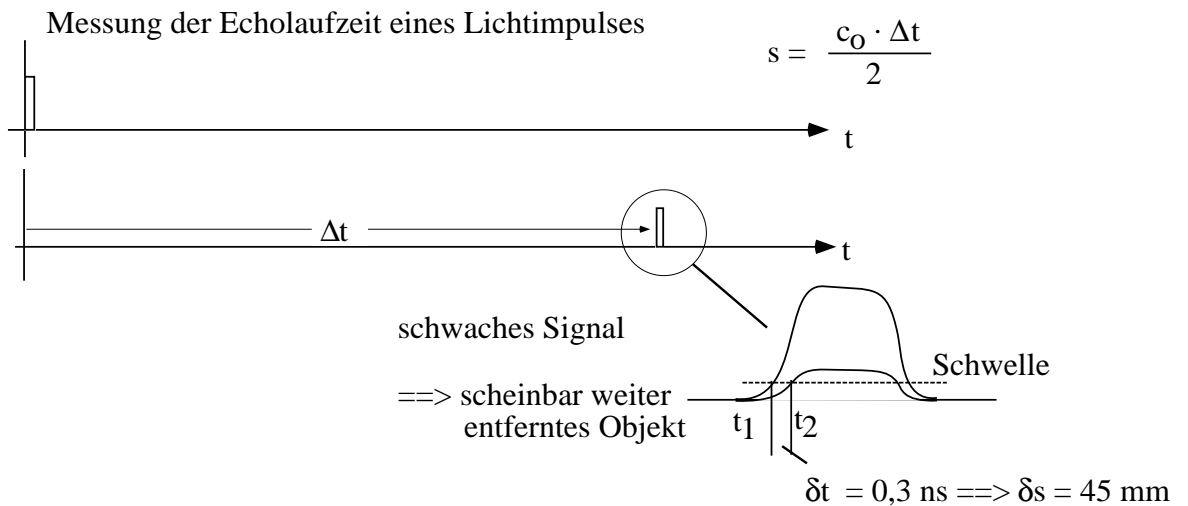


2.2.3.3.2. Lichtschnittverfahren



- Detektion von Hindernissen in der Ebene
(die gerade Linie beugt nach oben aus)
Roboter markiert "rote Linie" in der Ebene
jedes Überschreiten wird detektiert
Probleme: stark absorbierender Boden
(dunkelgrauer Nadelfilz)
stark absorbierende Hindernisse
- Dreidimensionale Vermessung von Objekten

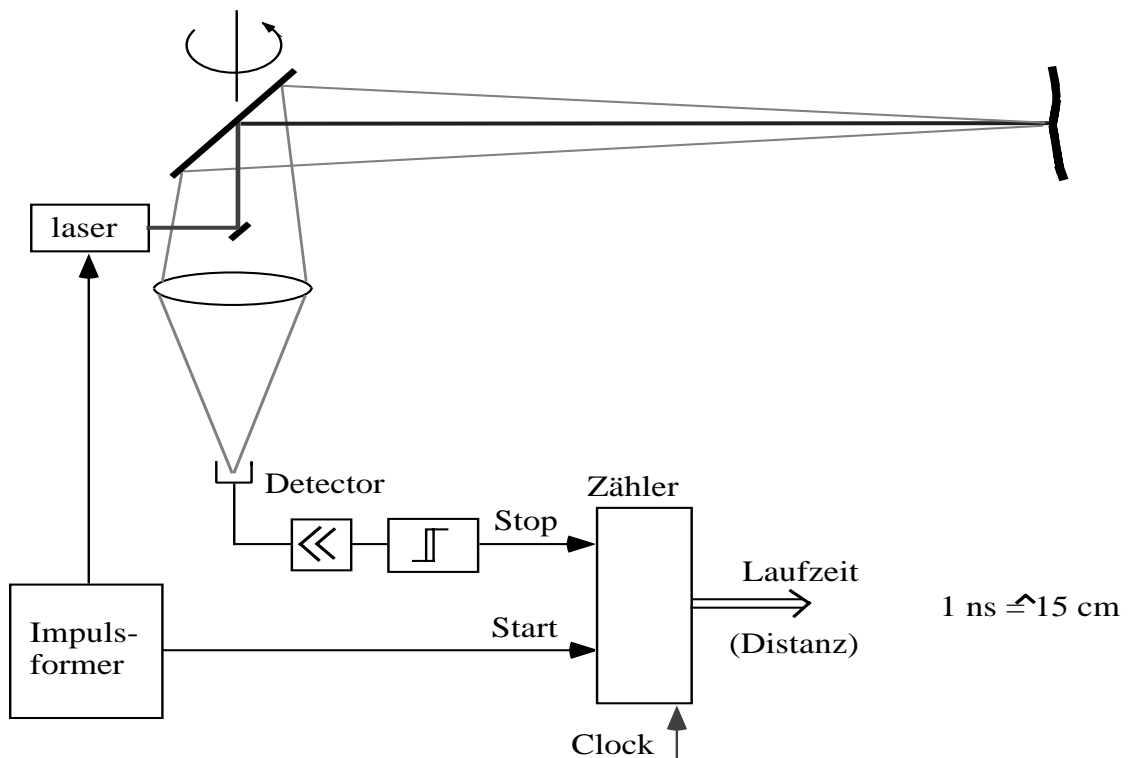
2.2.3.3.3. Laufzeitmessung



Messung der Laufzeit mit schnellem Zähler

Anstoß mit Sendeimpuls Abstellen mit Echo

$$\text{Clock } 10 \text{ GHz} \implies \Delta s = \frac{c_0 \cdot \Delta t_{\min}}{2} = \frac{300 \text{ mm/ns} \cdot 0,1 \text{ ns}}{2} = 15 \text{ mm}$$

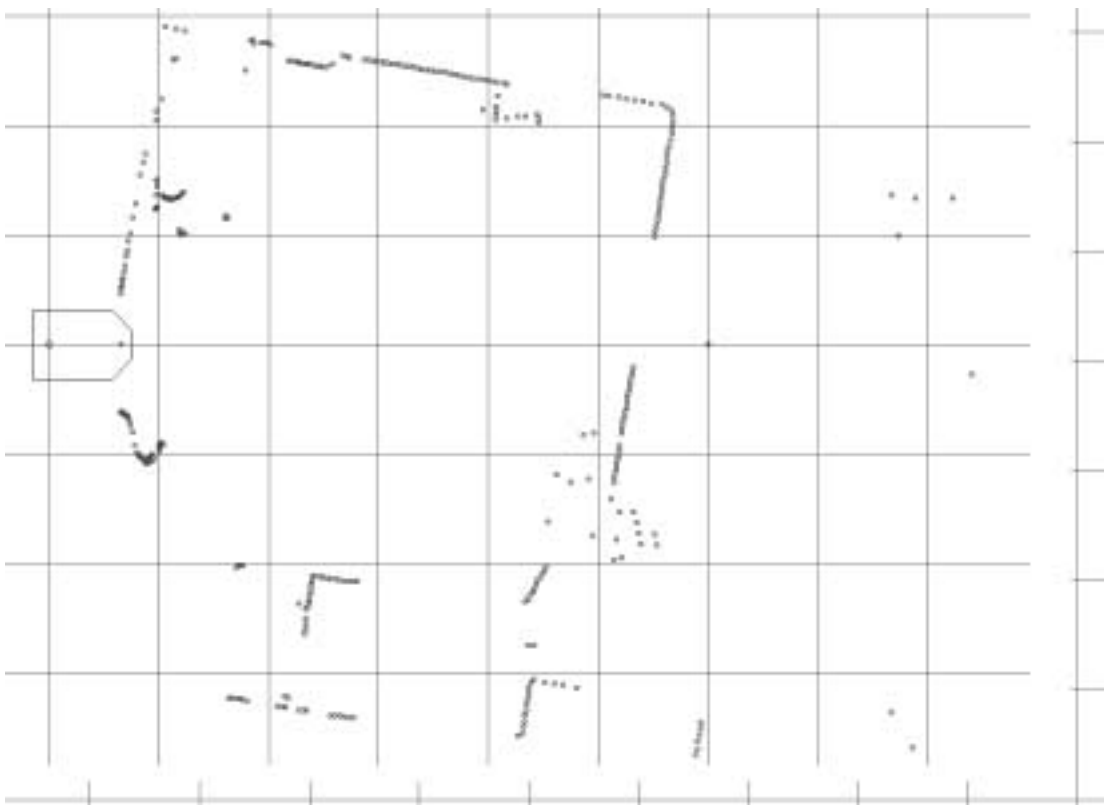


Beispiel

PLS SICK Opto-Elektronik D-79177 Waldkirch

Laserwellenlänge:	(nahes Infrarot)
Impulslänge:	ca. 1 ns
Impulsleistung:	10 W
Messrate:	18.000/s
Scanwinkel:	180° in 20 ms
Winkelauflösung:	0.5°
Zähleruhr:	3 GHz
Entfernungsbereich:	0 - 4 - 12 m
Entfernungsinkremente:	5 cm
Entfernungsfehler:	± 5 cm
detektierbare Objekte:	1.8% Reflektion auf 4 m

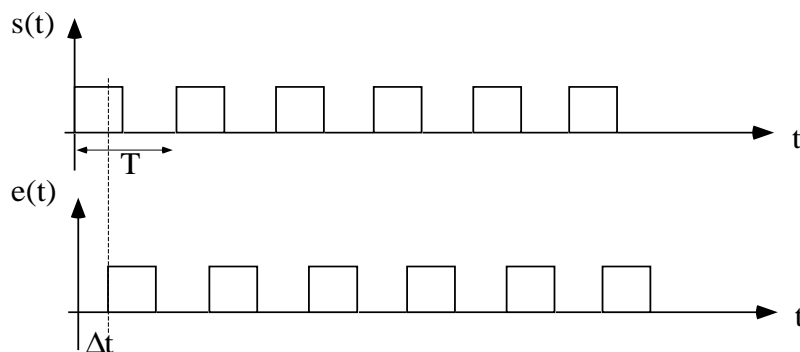
Das System hat die Zulassung der Berufsgenossenschaft zum Auslösen eines Notstop-signals und kann an Stelle einer mechanischen Bumperschürze verwendet werden. Neuere Systeme haben eine Entfernungsauflösung von ± 1 cm.



Das Bild zeigt eine Radaraufnahme eines Labors. Der AMR steht in einer Tür. Die Aufnahme erfasst einen Winkel von 180°. Der Punkt im Vorderteil des AMR kennzeichnet den Ort des Sensors.

2.2.3.3.4. Phasenmessverfahren

Der Laserstrahl wird mit einer Frequenz $f = 1/T$ moduliert. Die rücklaufenden Impulse werden mit einer Phasenverschiebung φ detektiert, aus der die Entfernung zum angemessenen Objekt folgt.



$$s_n = \frac{c \cdot (\Delta t + n \cdot T)}{2} \quad \text{Phase} \quad \varphi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 2\pi \quad \text{Entfernung nur bestimmt mod } (c \cdot T/2)$$

$$s_n = c \cdot T \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot (\varphi + n \cdot 2\pi) \cdot \frac{1}{2}$$

Man findet zwei Möglichkeiten zur Auswertung von φ

- 1) Messung der Phase φ bei festem T
- 2) Variation der Frequenz $f = 1/T$ so, daß $\varphi = \text{const} (= 0)$
(Regelung mit einer phasenstarken Rückkopplung (phase locked loop, PLL))

Phasenmessung: $\Delta t = \frac{\varphi}{360^\circ} \cdot T$

$T = 100 \text{ ns}$ (10 MHz)

$\varphi = 3,6^\circ \rightarrow \Delta t = 1 \text{ ns} \rightarrow \Delta s = 15 \text{ cm}$

$\varphi = 180^\circ \rightarrow \Delta t = 50 \text{ ns} \rightarrow \Delta s = 7,5 \text{ m}$

$0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$

$\Delta s/s = 1 \text{ ‰}$ erreichbar

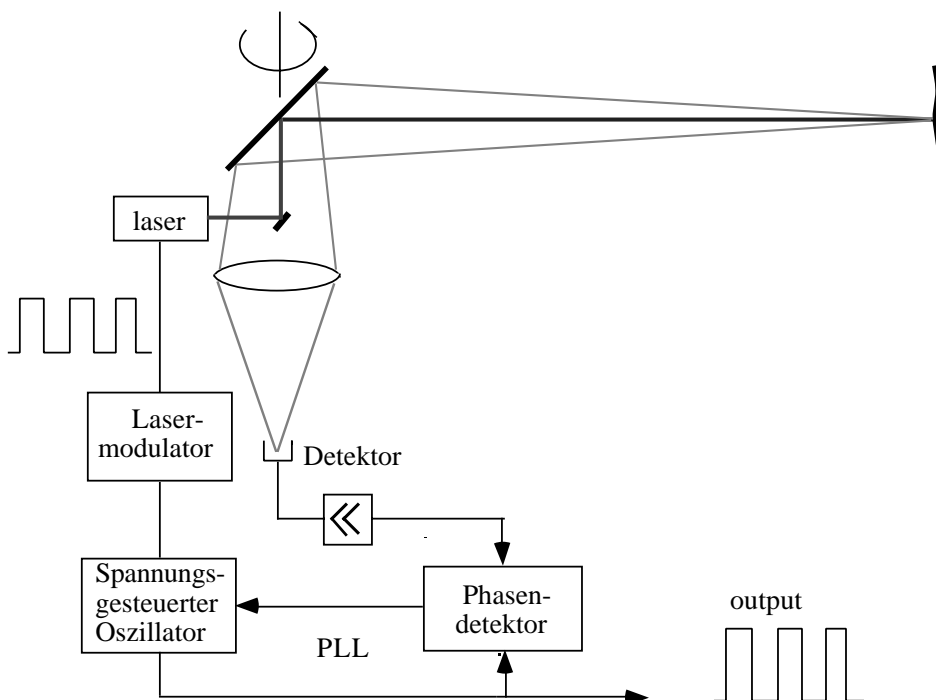
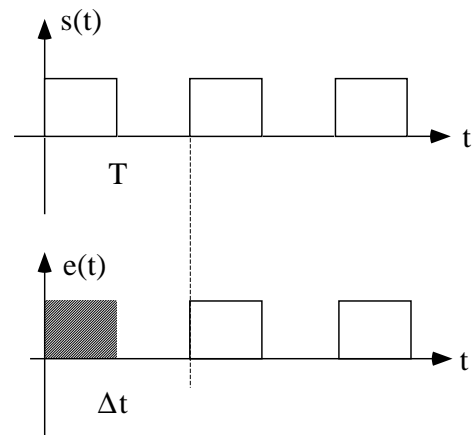
Angleichen der Frequenz:

$f = 1/T = 1/\Delta t$ Phase = 0°

$\Delta s = 7,5 \text{ m} \rightarrow \Delta t = 50 \text{ ns} \rightarrow f = 20 \text{ MHz}$

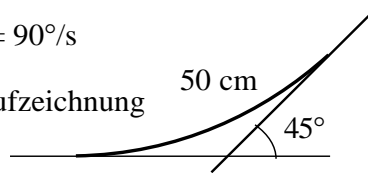
$\Delta s = 45 \text{ cm} \rightarrow \Delta t = 3 \text{ ns} \rightarrow f = 333 \text{ MHz}$

$\Delta s = 45 \text{ m} \rightarrow \Delta t = 300 \text{ ns} \rightarrow f = 3,33 \text{ MHz}$

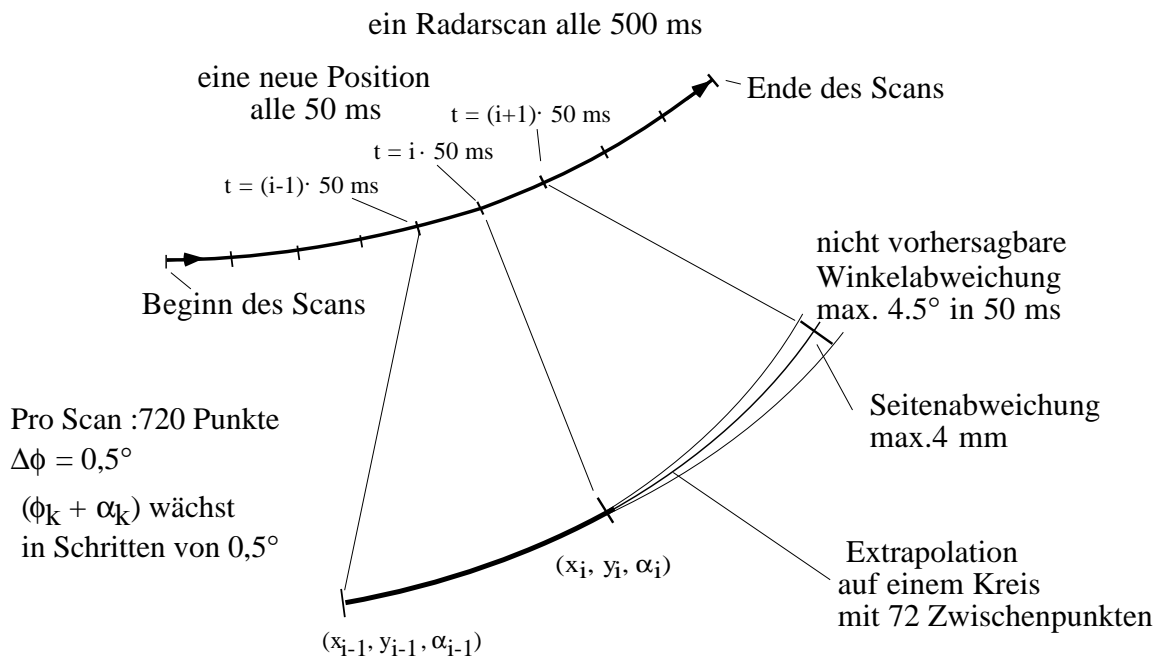


Roboter fährt mit $v = 1 \text{ m/s}$
 dreht mit $d\alpha / dt = 90^\circ/\text{s}$

\Rightarrow während einer Radaraufzeichnung



2.2.3.3.5.1. Extrapolation der Roboterbahn

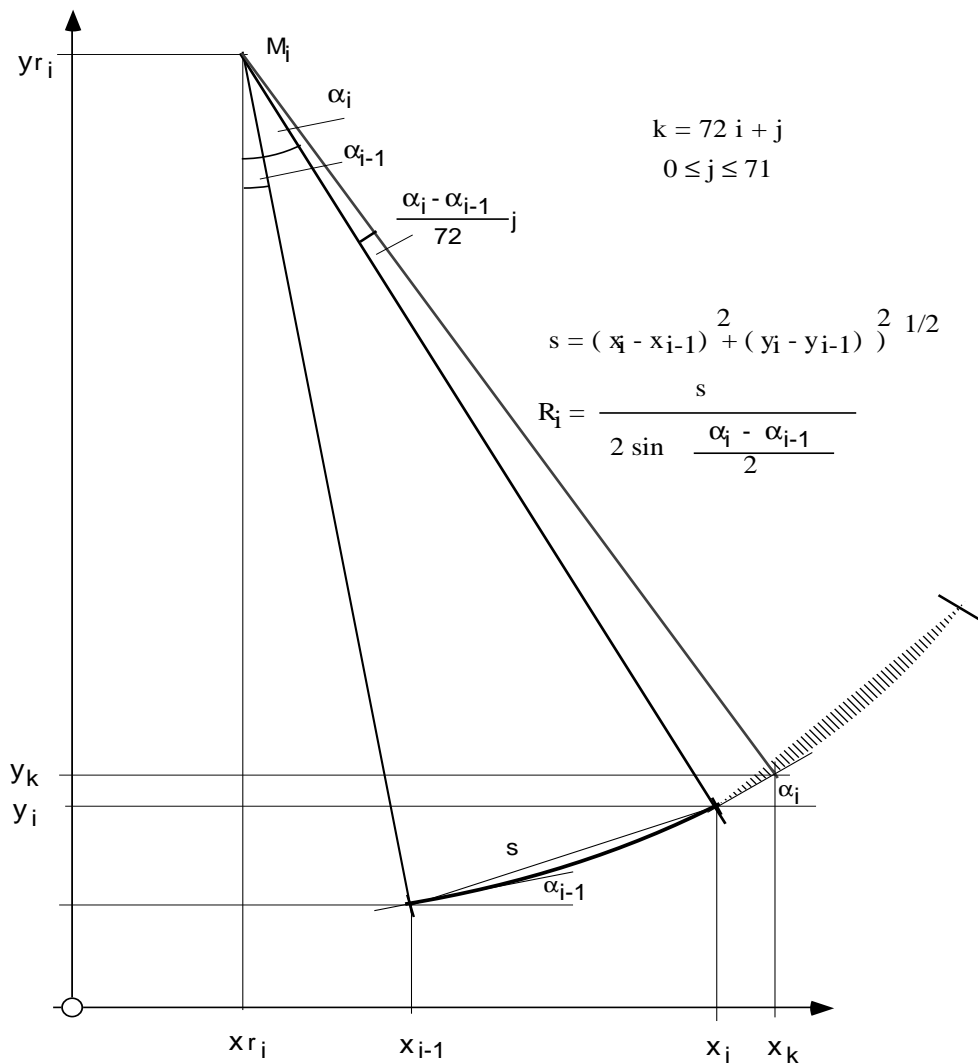


\Rightarrow Gyro zur Konstanthaltung der Drehrate des Radars während einer Umdrehung

Die Drehrate des Laserradars bleibt konstant, auch wenn sich während einer Aufnahme der AMR merklich dreht. Bei einem Sick-Sensor tritt das Problem nicht auf: er braucht für eine Aufnahme 20 ms, in denen sich der AMR max. um $90^\circ / 50 = 1,8^\circ$ gedreht hat. Bei einem 180° Scan entspricht das einem Winkelfehler von 1%.

2.2.3.3.5.2. Extrapolation auf dem Kreis

Wenn der AMR momentan auf einem Kreis mit Radius R_i fährt, der sich aus der momentanen Position (x_i, y_i, α_i) und der letzten Position $(x_{i-1}, y_{i-1}, \alpha_{i-1})$ errechnet, dann können die zwischen den Positionen aufgenommenen Zwischenwerte (x_k, y_k) wie folgt errechnet werden:



$$x_{r_i} = x_i - R_i \sin \alpha_i$$

$$y_{r_i} = y_i + R_i \cos \alpha_i$$

lineare
Extrapolation

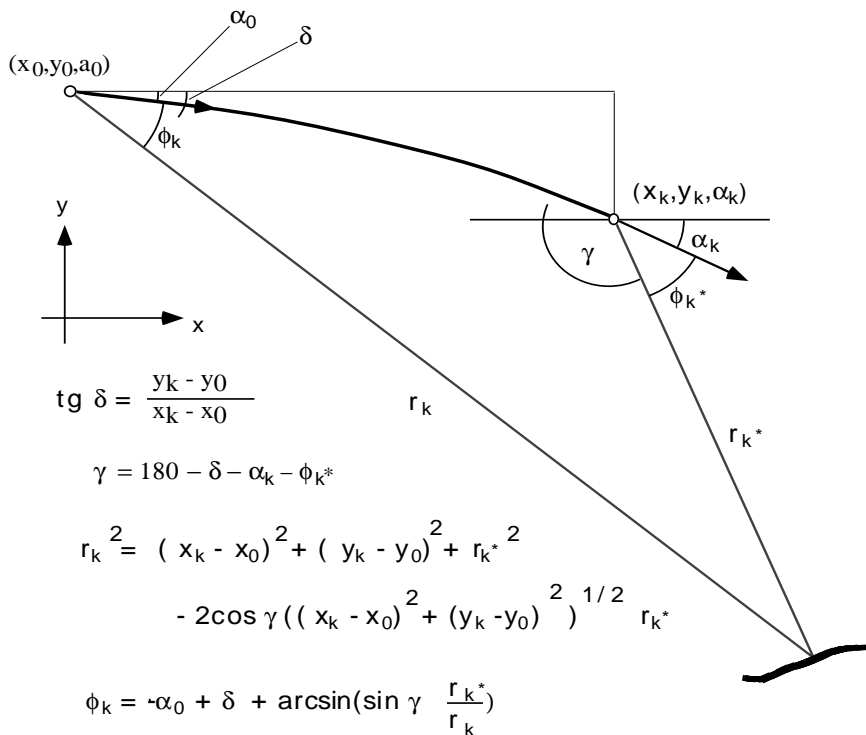
$$x_k = x_i - R_i \sin \alpha_i + R_i \sin \left(\alpha_i + \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{72} j \right)$$

$$y_k = y_i + R_i \cos \alpha_i - R_i \cos \left(\alpha_i + \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{72} j \right)$$

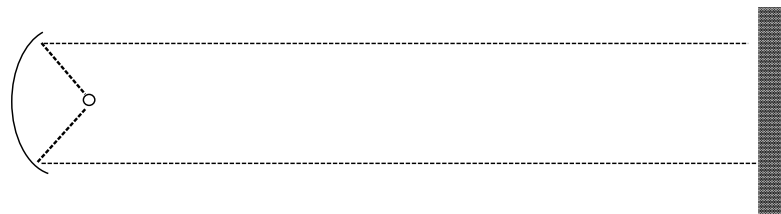
$$\begin{aligned} \longrightarrow & x_i + s/72 j \cos \alpha_i \\ R_i \longrightarrow & \infty \\ \longrightarrow & y_i + s/72 j \sin \alpha_i \end{aligned}$$

2.2.3.3.5.3. Umrechnung des gemessenen Entfernungspunktes

Die gemessenen Entfernungspunkte müssen dann umgerechnet werden auf den Anfangspunkt (x_0, y_0, α_0) von dem aus der Scan begonnen wurde: für diesen Punkt ist eine Folge $\{r_k, \phi_k\}$ auszugeben, der Radarscan im Punkt (x_0, y_0, α_0) .

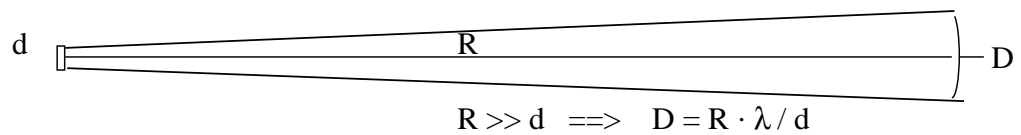


2.2.3.4. mm-Wellen-Radar



$f = 100 \text{ GHz} \implies \lambda = 3 \text{ mm}$; Sender : Gunn-Diode, Impulse einige ns lang

Bündelung durch Hohlspiegel, Bündeldurchmesser 10 -20 cm



Messung der Echolaufzeit: $R = c \cdot \tau / 2$

geringe externe Störungen , geringe Absorption \implies Reichweite bis 50 m

Problem: mechanisches Verschwenken des Hohlspiegels

Abstandsmesser für Autos \implies billige und gute Technik

In der Militärtechnik Millimeterwellenradar in "phased array"-Technik: viele kleine Sender mit einstellbarer Phasenverschiebung zueinander erlauben das Schwenken des Strahls ohne mechanisch bewegte Teile durch Ändern der relativen Phasenlage der Sender.

2.2.3.5. Kamera mit schnellem Shutter

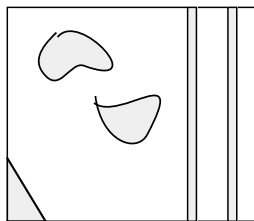
beleuchten der Szene mit kurzen Blitzen von δt

öffnen der Kamera nach Δt für δt

Gegenstände im Abstand $s = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \pm \frac{c \cdot \delta t}{2}$ werden abgebildet

Variation der Verschlusszeiten: $\Delta t_0 + i \cdot \delta t$

$$\implies \text{Entfernungsbilder mit } s_1 = \frac{c \cdot (\Delta t_0 + i \cdot \delta t)}{2} \pm \frac{c \cdot \delta t}{2}$$



was sieht man da ?

$$\delta t = 1 - 2 \text{ ns}$$

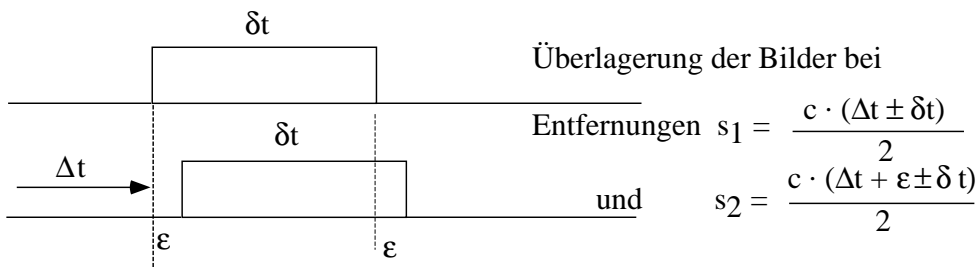
\implies Auflösung 15 - 30 cm

Umsetzen Entfernung in Grautöne (Falschfarben)

\implies einfache Interpretation durch den Menschen

maschinell ?

Steigerung der Auflösung durch Differenzbildung

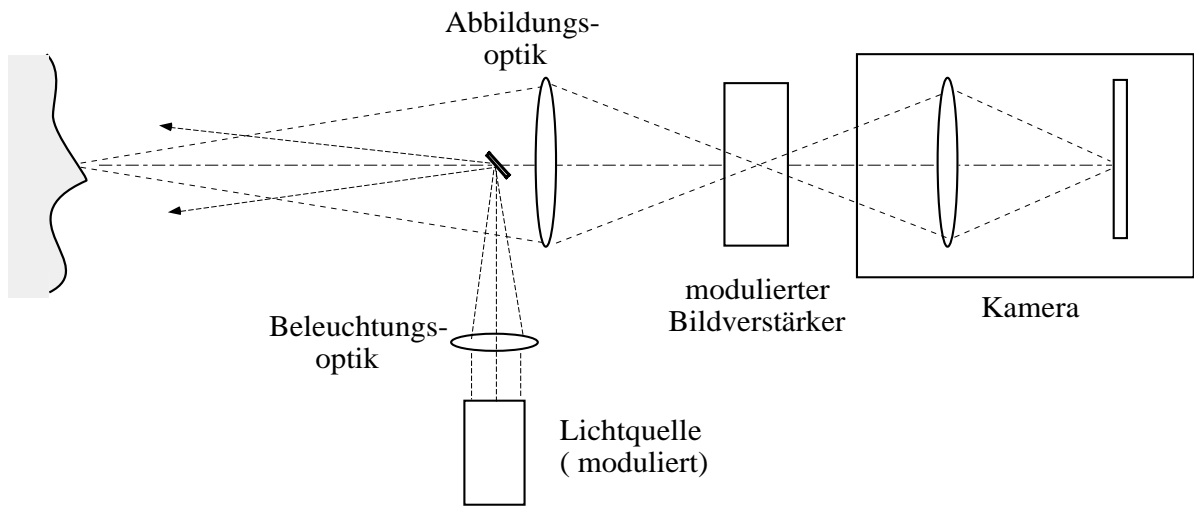


Beispiel:

Daimler-Crysler Aerospace Laserkamera

Bildrate:	6,7 Hz
laterale Auflösung:	640 x 480 Pixel
Meßbereich:	min. 1,5 - max.10 m wählbar
Auflösung:	$\pm 2\%$ des Meßbereichs ($\epsilon = 0,2 - 2 \text{ ns}$)
Bilder:	Entfernungsbild (Falschfarben) s/w Videobild (Detektion des ganzen Laserpulses)
Blitzlampe:	Laserscheinwerfer mit Fresneloptik
Impulslänge:	10 - 100 ns

2.2.3.6. Kamera mit Phasenmessung



Beispiel:

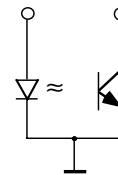
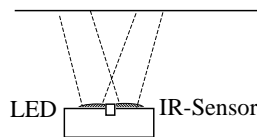
3D - Kamera

Fraunhofer-IPM (Institut für physikalische Meßtechnik)
Freiburg i. Br.

Modulationsfrequenz: 100 MHz
 Entfernungsauflösung: 1 mm
 Darstellung: Falschfarben, z.B. 8 Farben; $\delta s = 10$ mm
 Entfernungen 0 - 80 mm

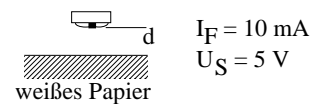
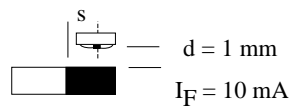
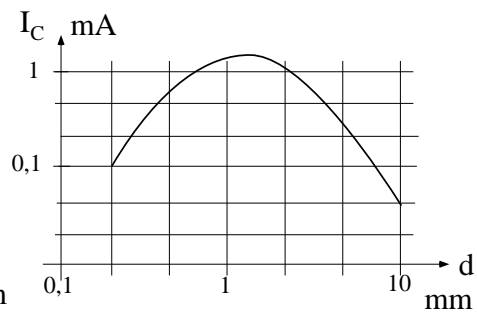
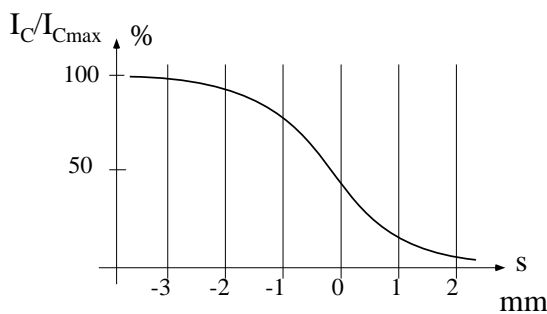
2.2.3.7. Reflexsensoren

Infrarotreflexsensoren

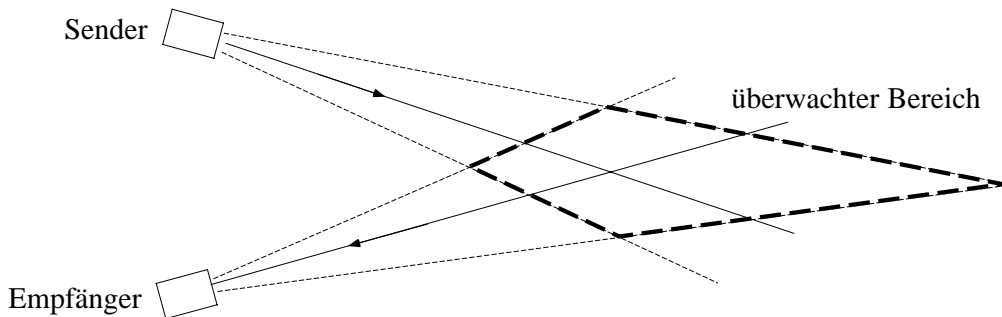


Beispiel: Siemens SFH 900

Sender: GaAs-Diode, $U_R = 6$ V, $I_F = 50$ mA
 Empfänger: Si-Phototransistor, $U_{CE} = 7$ V, $I_C = 10$ mA

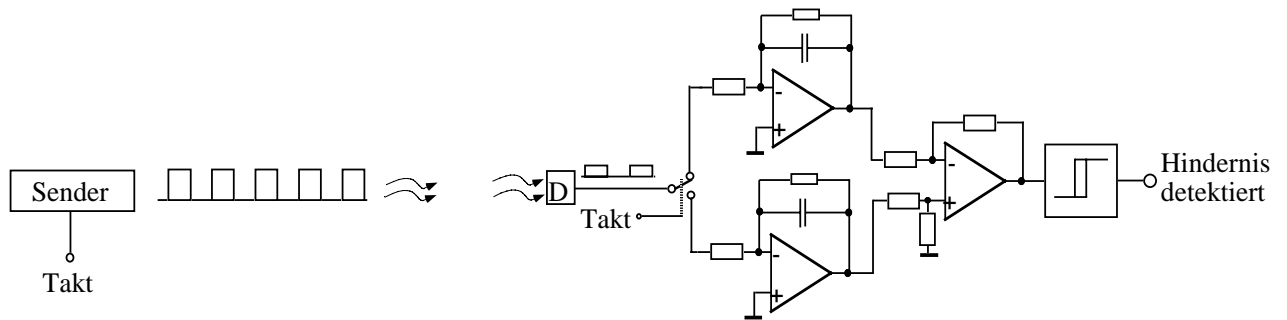


Reflexsensoren zur Überwachung



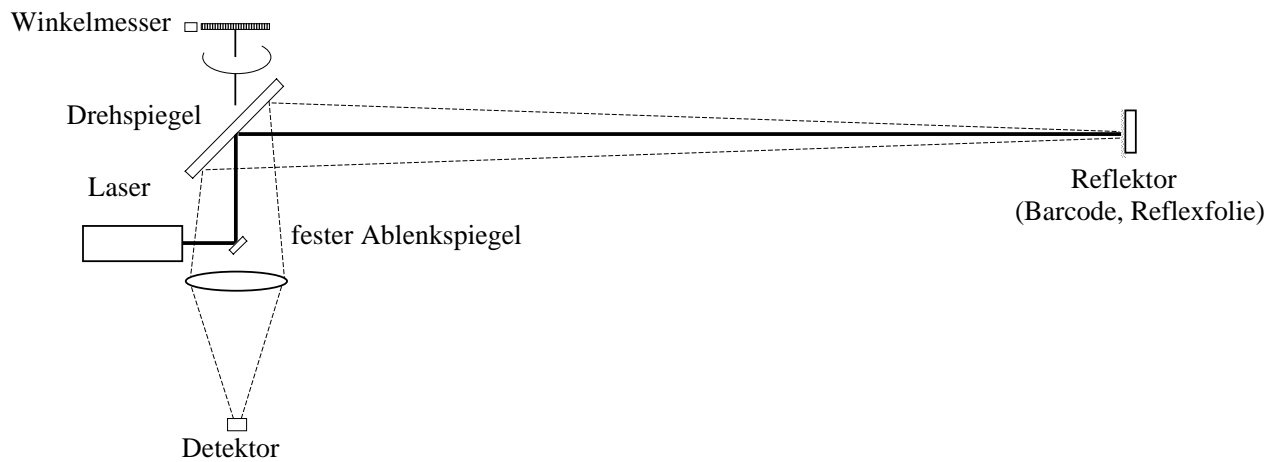
Sender: Licht moduliert mit der Frequenz f (~ 100 kHz)

Empfänger: schmalbandiger Empfänger der Frequenz f (Synchrondetektor)



2.2.3.8. Andere aktive Sensoren

2.2.3.8.1. Laser-Reflexsensoren (Barcodescanner)

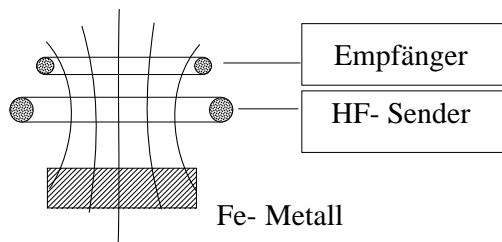


gemessene Größe:

- Winkel, bei dem ein Reflex auftritt
- Abfolge von Reflexen (Barcode)

==> Erkennen von künstlichen Landmarken

2.2.3.8.2. Metalldetektoren



gemessene Größe:

- Verzerrung des HF-Feldes durch Metall

2.2.4. Externe passive Sensoren

Aufnahme von Signalen aus der Umwelt.

2.2.4.1. *Kameras*

2.2.4.1.1. CCD-Kameras

- CCD-Matrix (625 x 800 Pixel)
Videokamera; klein baubar 3x3x3 cm
billig und gut (Konsumertechnik)
begrenzter Intensitätsbereich (Überstrahlung), $U \sim I_{\text{licht}}$
25 Bilder/s bis einige 10 μs pro Aufnahme

2.2.4.1.2. CMOS-Kameras

- CMOS-Matrix
sehr breiter Intensitätsbereich erfasst ($I_D \sim \log(I_{\text{licht}})$)
keine Überblendung im Bild
durch Verschiebung der Helligkeiten Grauschleier behebbar

Strahlung: Si-Photodiode empfindlich von UV -> sichtbar -> nahes IR

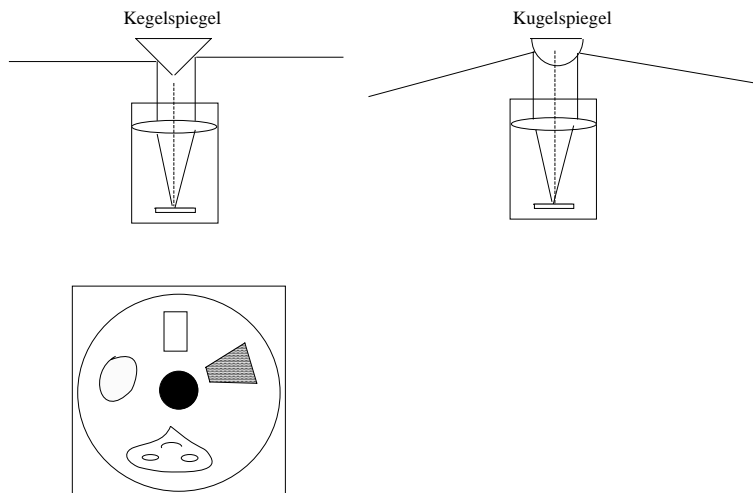
CMOS-APS-Matrix verhält sich wie ein RAM: wahlfreier Zugriff; kein Framegrabber nötig; sehr niedriger Stromverbrauch (1/10 von CCD-Kameras).

Beispiel:	Fuga 15d	und	Fuga 18	(DBS)
# aktive Pixel:	512 x 512		8013	
Pixel Pitch [µm]	12,5		log-polar	
opt. aktiver Bereich	6,4 x 6,4 mm ²		8 mm Ø	
max. Adress. Geschw.	6 MHz		800kHz	
max. Pixelrate	5 MHz		100 kHz	
bei 0,04 W/m ²	125 kHz		36 kHz	
bei 0,4 W/m ²	1 MHz		258 kHz	
bei 4 W/m ²	4 MHz		660 kHz	
max. Bildrate	19		100	
Dynamik des Lichts	10 ⁵		10 ⁵	
min. Lichtintensität	0,1 mW/m ²		1 mW/m ²	
Datenausgang	8 Bit TTL/CMOS und analog			

Fuga 15RGB: Farbkamera; R, G, B-Streifen auf der Matrix

2.2.4.1.3. Rundumüberwachung

Eine Kamera blickt über einen Kegelspiegel rundum um 360°. Sie nimmt ein verzerrtes Rundumbild auf, das Polarkoordinaten als natürliche Darstellung hat. Die Umrechnung in (x, y) Koordinaten muß separat erfolgen. Der Vorteil dieser Art von Aufnahmen ist, dass sich Drehungen des AMR durch Korrelation von Bildern, die zueinander gedreht sind, relativ leicht herausrechnen lassen.



2.2.4.1.4. Bildverarbeitung

Interpretation eines Kamerabildes durch den Roboter

Ziele: Hindernisdetektion
 Szenenwiedererkennung
 Objekterkennung } in Echtzeit (25 Bilder/s)

Vorverarbeitung des Bildes

Kanten/ Eckenextraktion
 Bestimmen von Linien } in Echtzeit

mathematische Operation: Filtern des Bildes mit angepassten Filterkernen

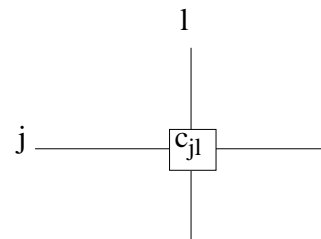
auf jedes Pixel x_{ik} der Matrix wird angewendet

ein Filterkern mit Koeffizienten c_{jl} und $-L \leq l \leq +L; -J \leq j \leq +J$

$$z_{ik} = \sum_{l=-L}^{+L} \sum_{j=-J}^{+J} c_{jl} \cdot x_{i-j, k-l} \quad \text{Aufwand: } O(4 \cdot L \cdot J)$$

2.2.4.1.5. Separierbare Filter

Wenn die Filterkoeffizienten separierbar :



$$c_{jl} = a_j \cdot b_l$$

$$z_{ik} = \sum_{l=-L}^{+L} \sum_{j=-J}^{+J} a_j \cdot b_l \cdot x_{i-j, k-l}$$

$$= \sum_{l=-L}^{+L} b_l \cdot \sum_{j=-J}^{+J} a_j \cdot x_{i-j, k-l}$$

$$z_{ik} = \sum_{l=-L}^{+L} b_l \cdot y_{i, k-l} \quad (\text{Spaltentransformation})$$

mit $y_{i, k-l} = \sum_{j=-J}^{+J} a_j \cdot x_{i-j, k-l} \quad (\text{Zeilentransformation})$

=> Hintereinanderausführung der Transformationen;

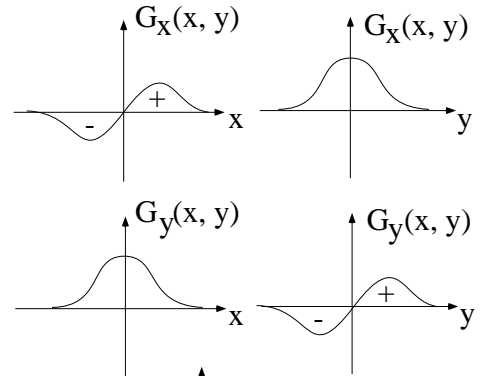
Aufwand $O(2L + 2J)$

Beispiel: Gaussfilter

$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}$$

$$x(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{-2x}{2\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

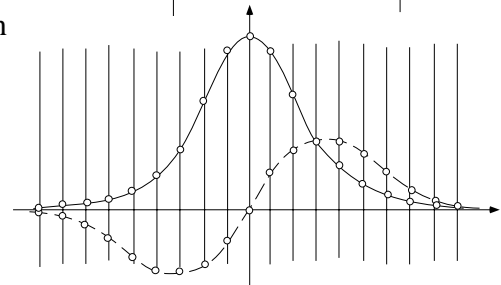
$$y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{-2y}{2\sigma^2} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}$$



Filter für waagerechte / senkrechte Kontrastkanten

Linearkombination ==> Filter für schräge Kanten

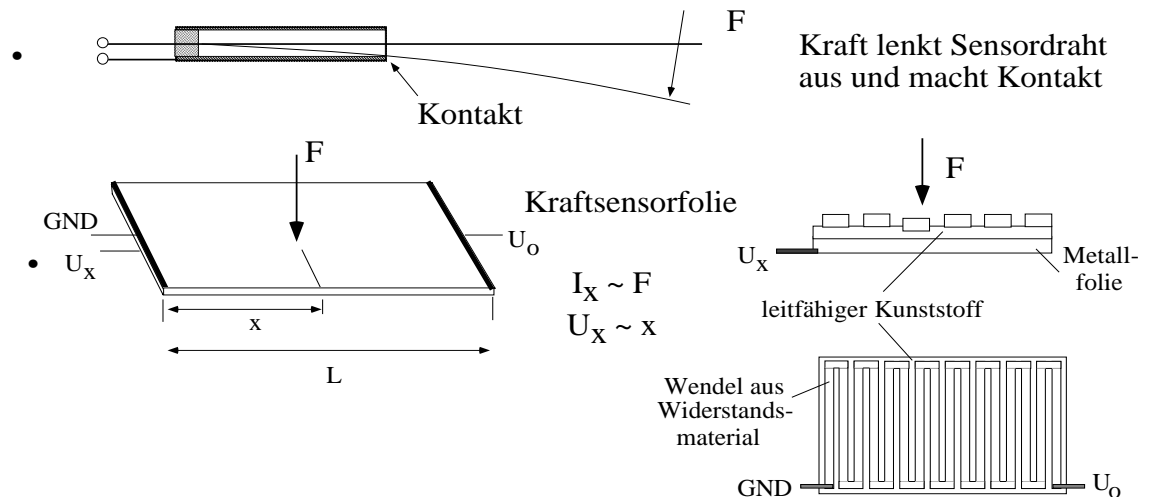
Diskretisierung ==> linear separierbarer Kern



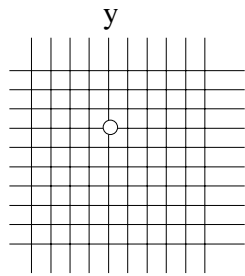
2.2.4.2. Tastsensoren

Der AMR ist sehr nahe einem Hindernis (Andockmanöver) 0,5 - 10 cm

technische Realisierungen:



Kontaktsensormatrix



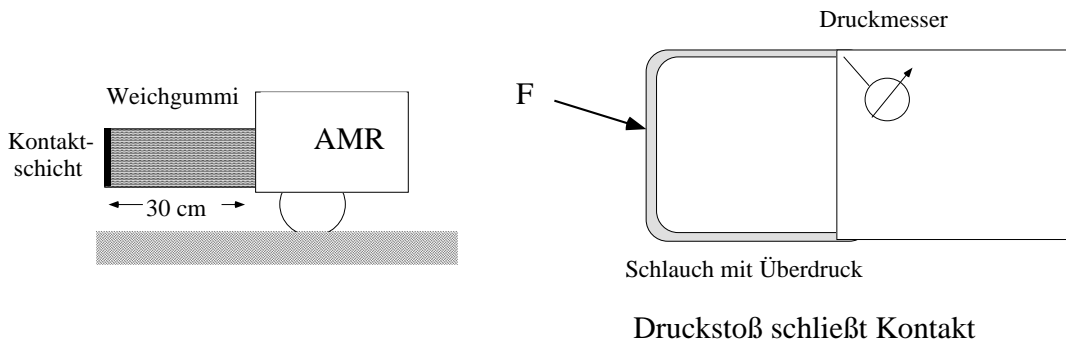
Kontakt : $(x, y) = 1$

serielles Auslesen der Kontakte

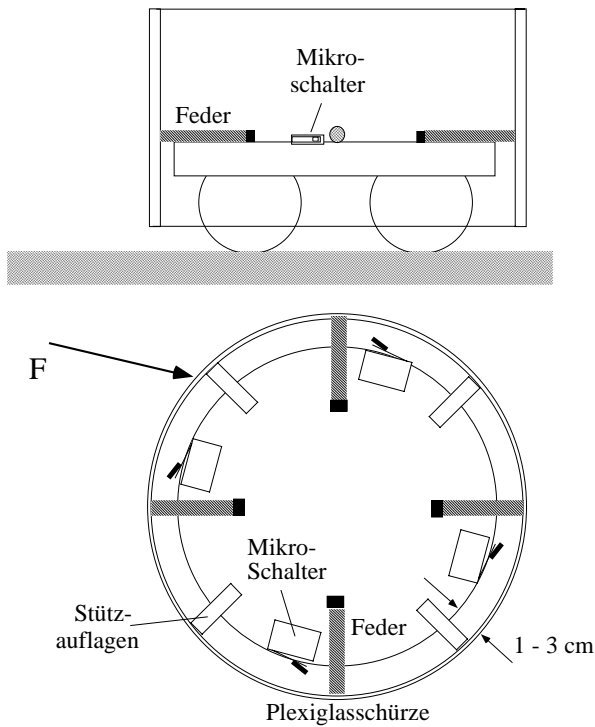
bei mehr als ein Kontakt parallel

Bumperschürze

meldet Kontakt des AMR mit Hindernis



Realisierungen von Bumpern



bei Kontakt mit Hindernis sprechen ein oder zwei Schalter an
 ==> grobe Richtung feststellbar

Beispiel Natur:

- Tastsensoren bei Tieren
- Fell mit sehr vielen Tasthaaren ==> hohe räumliche Auflösung
- technisch z.Zt. nicht machbar

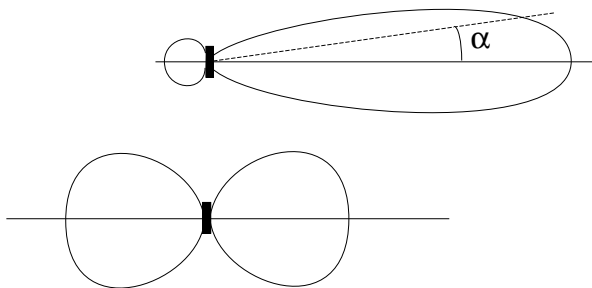
2.2.4.3. Mikrophone

Frequenzen: 20 Hz - 50Hz - 20 kHz - 50 kHz

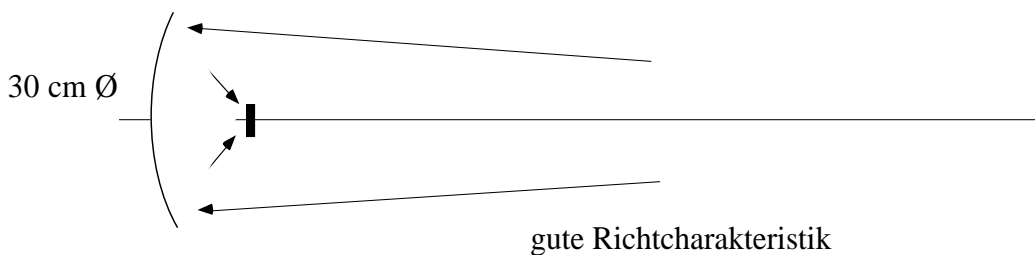
digitalisiertes Signal: CD-ROM 16 Bit A/D Wandler

Richtungshören:

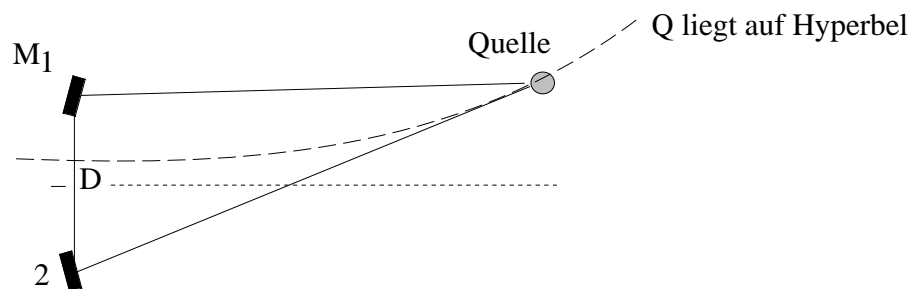
- Richtcharakteristik des Mikrophons



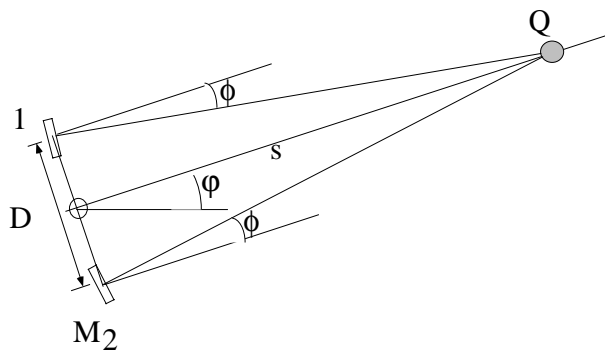
- Richtschüssel



- Richtungshören



Messung des Laufzeitunterschieds Δt
 durch Korrelation der Signale bei den Mikrophenen M1 und M2



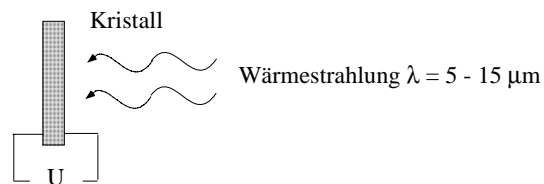
Drehen der beiden Mikrophone um ϕ bis $\Delta t = 0$ (Korrelation bei $\tau = 0$ maximal)

Drehen der Mikrophone um ϕ bis Lautstärke maximal

==> Entfernung $s = D/2 \cdot \text{ctg } \phi$

2.2.4.4. IR-Bewegungsmelder

pyroelektrischer Effekt



Änderung der Einstrahlung ==> Ladungen ==> Spannung

==> Detektion bewegter Wärmequelle

Kommerzielle Geräte:

in 12 m Entfernung wird ein Gesicht durch Wärmeabstrahlung entdeckt

Entdeckungsbereich: 120° horizontal, 30° vertikal

Ansprechen nur auf bewegte Wärmequelle ($v > 10 \text{ cm/s}$)

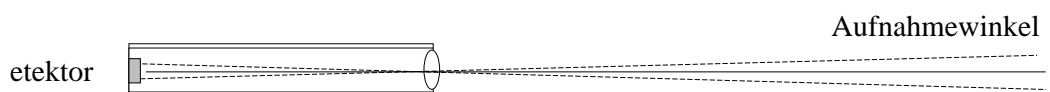
2.2.4.5. Andere Bewegungsmelder

Videokamera; je 2 Bilder subtrahieren;

Schwellwert überschritten ==> Bewegung entdeckt

2.2.4.6. Photodetektoren

- Messung der Helligkeit in einer Richtung



- Messung der Richtung einer Lichtquelle

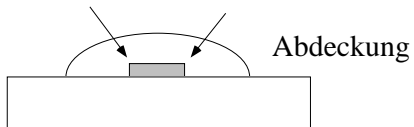


4-Quadrantendetektor

Photoströme proportional
der vom Brennfleck abgedeckten Fläche

Nachregelung der Richtung des Tubus auf gleiche Ströme im Detektor ==> Zielsuche

- Empfang eines Signals in einem breiten Raumwinkel



(IR - Signale TV-Fernbedienung)