

Vorlesung: Angewandte Sensorik

Prof. J. Zhang

zhang@informatik.uni-hamburg.de

Universität Hamburg

Fachbereich Informatik

AB Technische Aspekte Multimodaler Systeme

02. Dezember 2003

Inhaltsverzeichnis

Abstandssensoren199
Abstandsmessung: Time-of-flight200
Abstandsmessung: Triangulation205
Abstandsmessung: Phasendifferenz210
Infrarotsensoren218
Ultraschallsensoren221
Laserentfernungsmesser244
Abstandsmessung mit strukturiertem Licht252
Probleme optischer Sensoren266

Abstandssensoren

- Typisch: Infrarot, Ultraschall und Laser
- Physikalische Prinzipien:
 - ❖ Signallaufzeit (engl.: *time-of-flight*)
 - ❖ Triangulation
 - ❖ Messung der Signalintensität
 - ❖ Phasendifferenz

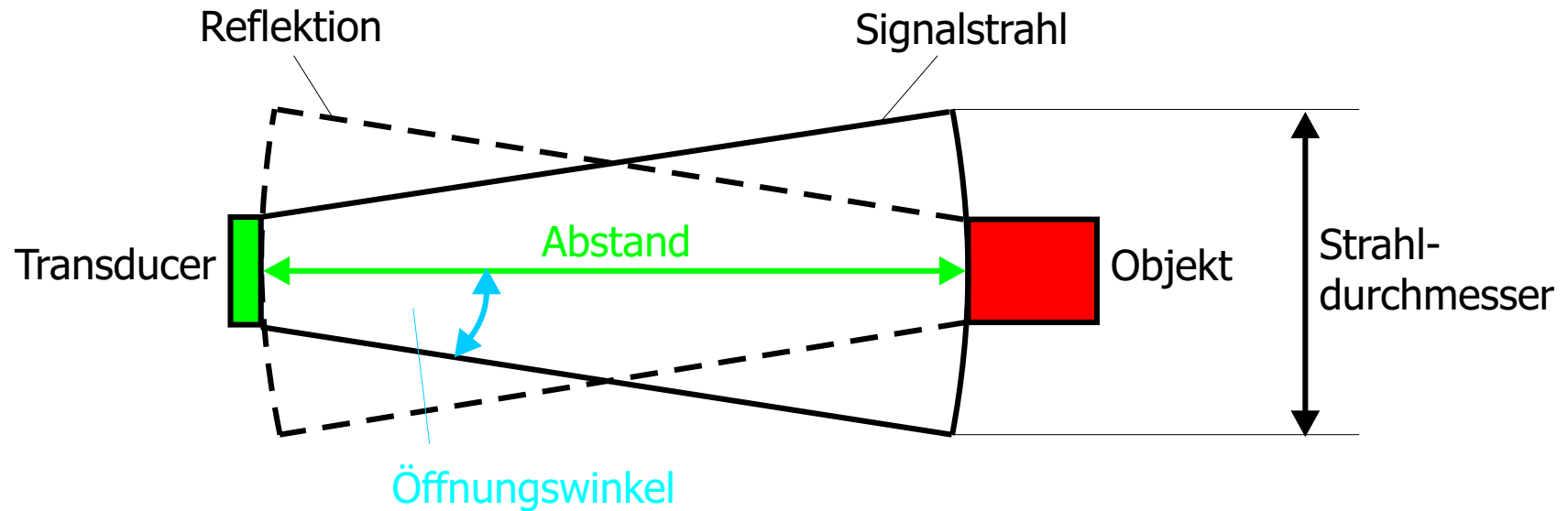
Time-of-flight (1)

1. Aussenden eines Impulses.
2. Messen der Zeit zwischen Aussenden des Impulses und Eingang des Echos.

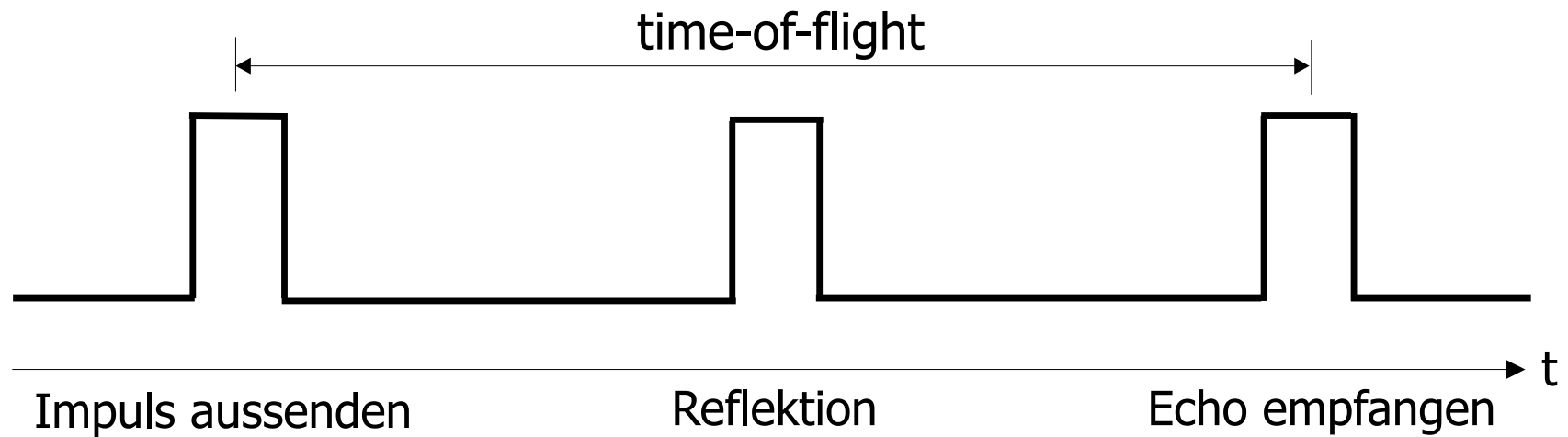
$$\text{Abstand} = \frac{\text{gemessene Zeit} \times \text{Geschwindigkeit im Medium}}{2}$$

Vorteil: Sender und Empfänger liegen auf derselben Achse.

Time-of-flight (2)



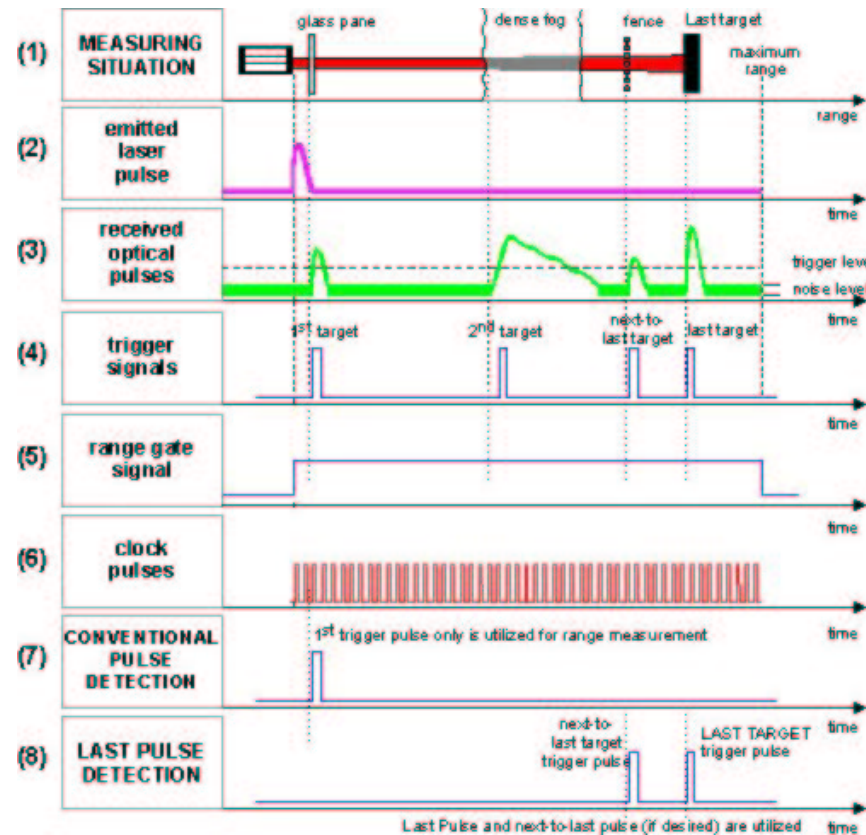
Time-of-flight (3)



Strahldurchmesser

$$\text{Durchmesser} = 2 \times \text{Abstand} \times \tan(\text{Öffnungswinkel})$$

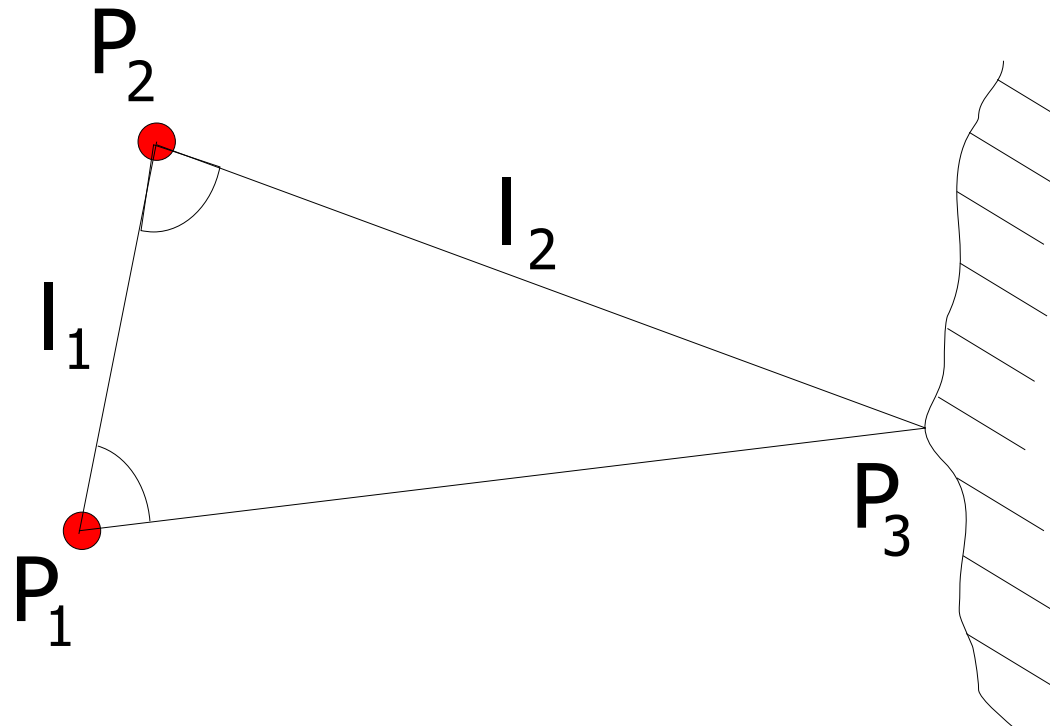
Time-of-flight (4)



Triangulation (1)

- Ermitteln der Entfernung mit Hilfe zweier Sichtpunkte.
- Abstand zwischen den Sichtpunkten muss bekannt sein.
- Abstand wird über die Winkel zum Objekt an den beiden Sichtpunkten bestimmt.
- Zwei Sichtpunkte können sich auf unterschiedliche Weise ergeben:
 - ❖ Bewegen eines einzelnen Sensors.
 - ❖ Spezielles Design eines aktiven Sensors.
 - ❖ Mehrere Sensoren.
- Ein aktiver Sensor emittiert ein Signal und empfängt die Reflektion.
- Ein passiver Sensor empfängt Umgebungssignale.
- Stereo-Vision mit zwei Kameras ist eine passive Form von Triangulation.

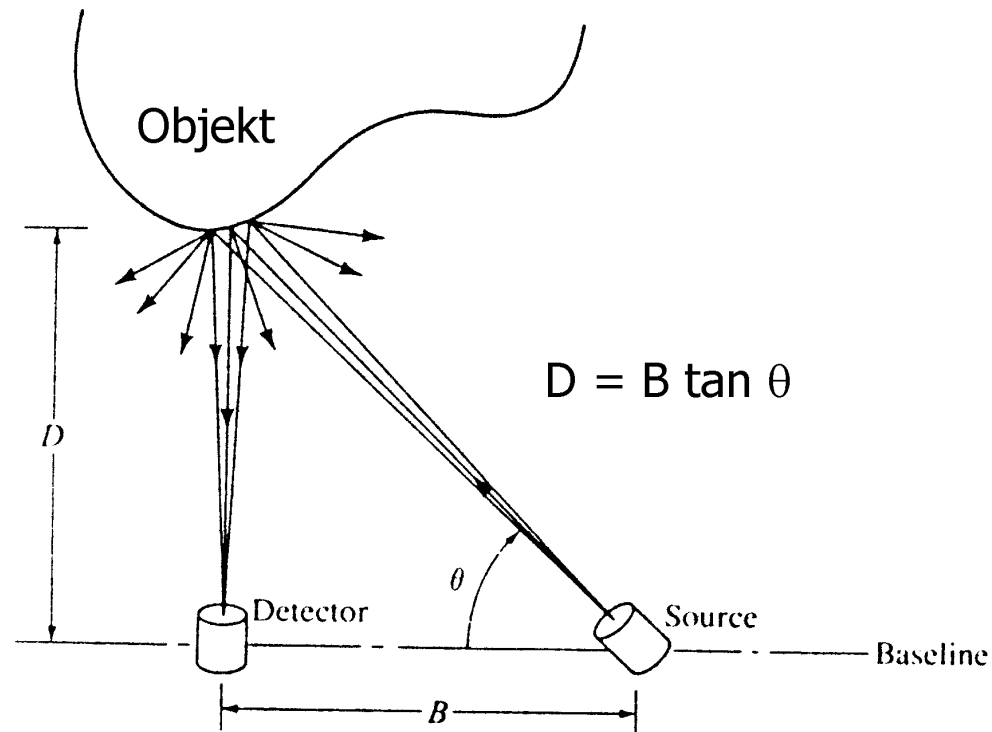
Triangulation (2)



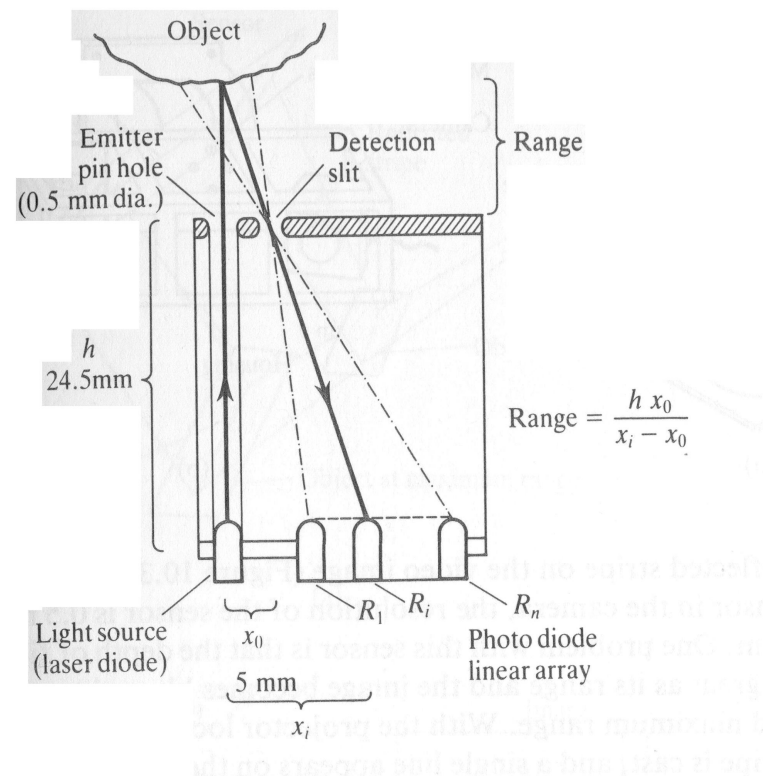
Triangulation (3)

$$\text{Abstand} = l_2 = \frac{l_1 \sin(\alpha)}{\sin(\Theta + \alpha)}$$

Triangulation (4)



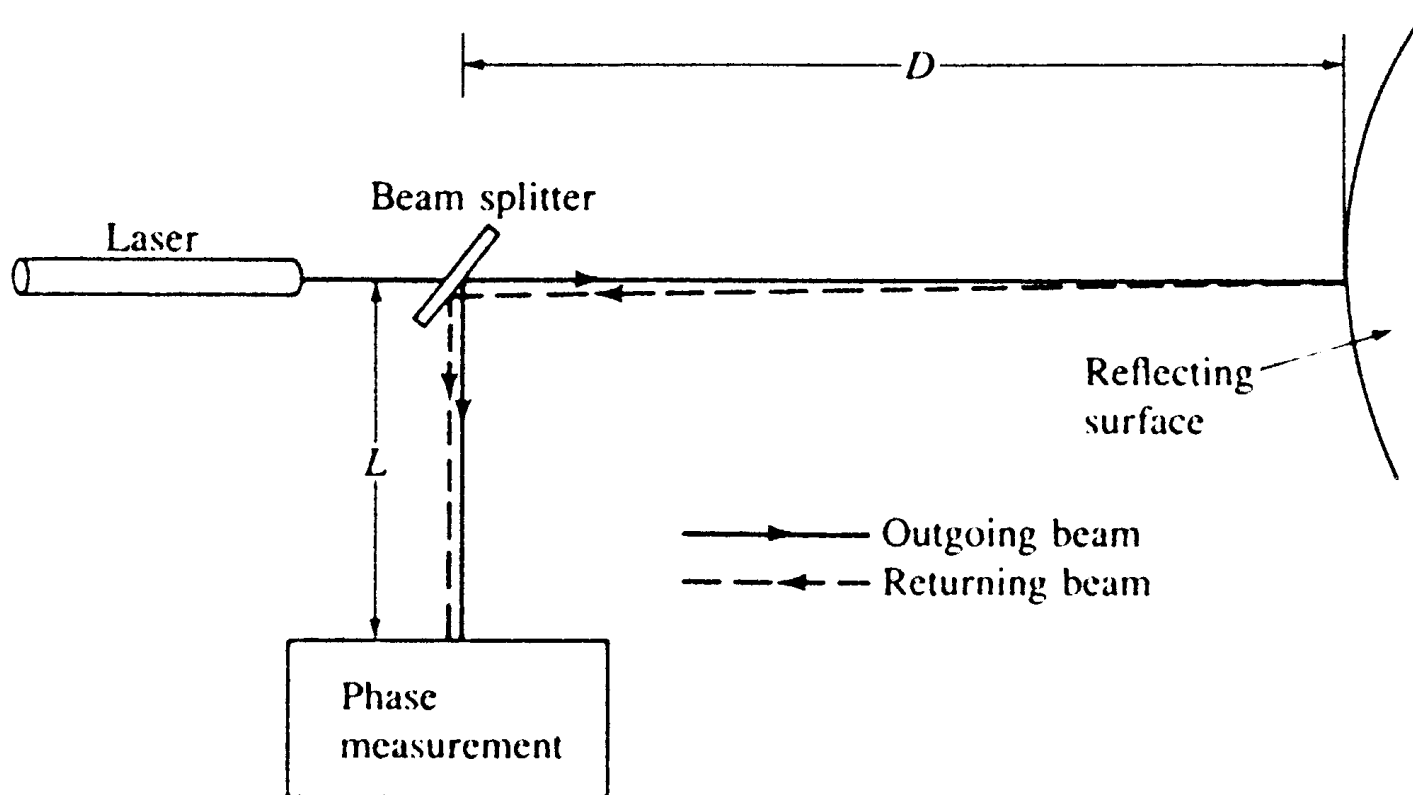
Okada's optischer Distanzmesser (1982)



Phasendifferenz (1)

- Alternative zu *time-of-flight*: Messen der *Phasendifferenz* zwischen ausgesandtem und reflektiertem Strahl eines Lasers.
- Der Laserstrahl mit Wellenlänge λ wird zuerst mit Hilfe eines Strahlenteilers aufgesplittet.
- Der sogenannte *Referenzstrahl* wird von einem Phasenmessgerät in der Entfernung L gemessen.
- Der zweite Strahl läuft bis zur Objekt Oberfläche und zurück bis zum Phasenmessgerät.

Phasendifferenz (2)



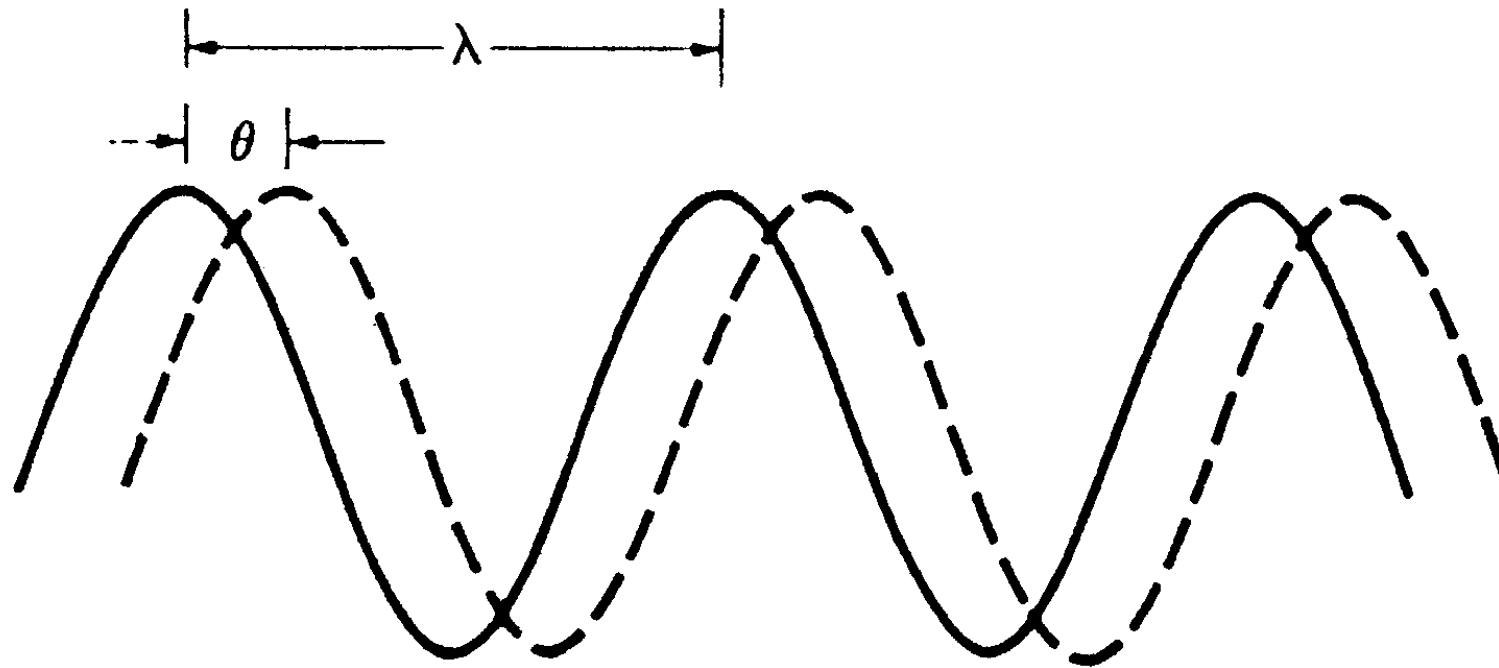
Phasendifferenz (3)

- Die vom reflektierten Strahl zurückgelegte Strecke beträgt:

$$D' = L + 2D$$

- Annahme $D = 0$, dann gilt $D' = L$ und beide Strahlen kommen simultan im Phasennessgerät an.
- Wird D erhöht, wird der Weg für den reflektierten Strahl länger und es kommt zu einer Phasendifferenz θ beim Vergleich mit dem Referenzstrahl.

Phasendifferenz (4)



Phasendifferenz (5)

Es gilt:

$$D' = L + \frac{\theta}{360} \lambda$$

Für $\theta = 360^\circ$ ist der Phasenunterschied 0, daher kann nicht unterschieden werden zwischen $D' = L$ und $D' = L + n\lambda, n = 1, 2, \dots$

Phasendifferenz (6)

- Um eine eindeutige Lösung zu erhalten, muss $\theta < 360^\circ$ bzw. $2D < \lambda$ gelten.
- Da $D' = L + 2D$ ist, erhält man

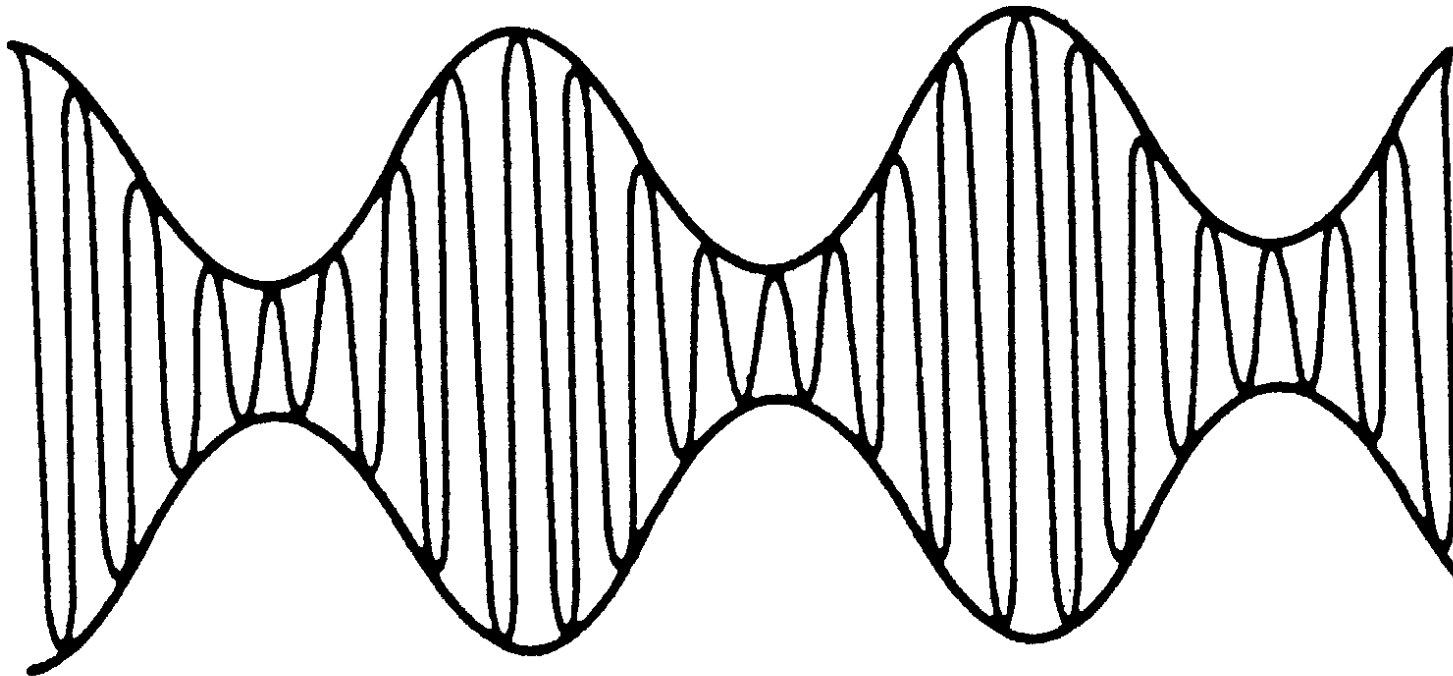
$$D = \frac{\theta}{360} \left(\frac{\lambda}{2} \right)$$

als Distanz, wenn die Wellenlänge bekannt ist.

Phasendifferenz (7)

- Da die Wellenlänge von Laserlicht sehr klein ist (632.8 nm beim Helium-Neon Laser), ist diese Methode ungeeignet für die Robotik.
- Eine einfache Lösung für dieses Problem ist die Modulation der Welle mit einer sehr viel längeren Welle ($c = f\lambda$).
- Eine modulierende Sinuswelle mit einer Frequenz von $f = 10 \text{ MHz}$ hat eine Wellenlänge von 30 m .

Phasendifferenz (8)



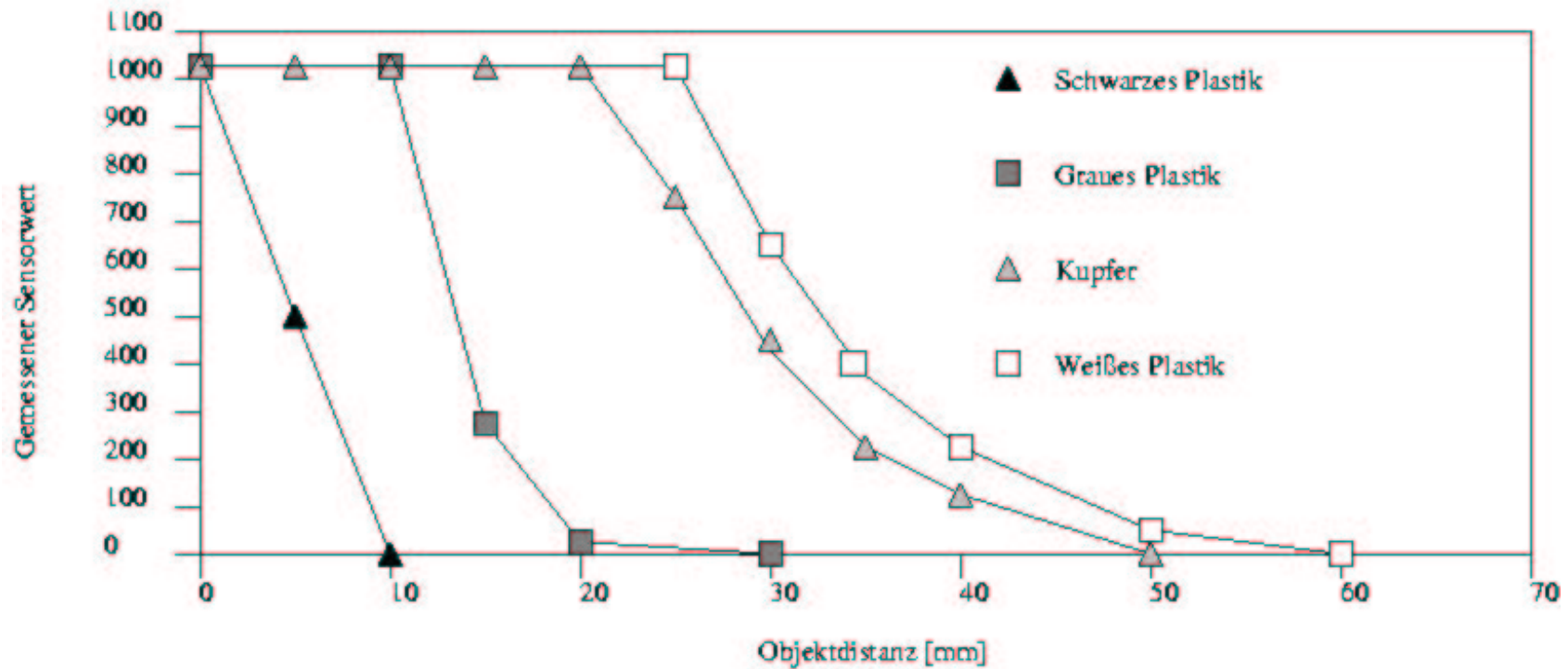
Infrarotsensoren (1)

- *Infrarotsensoren* sind die einfachsten der kontaklosen Sensoren.
- Werden in der Robotik vielfach zur Hinderniserkennung eingesetzt.
- Infrarotsensoren senden ein infrarotes Lichtsignal (IR) aus.
- IR wird von Objekten in der Umgebung reflektiert.
- Um das ausgesandte IR vom allgemeinen IR der Umgebung (Leuchtstoffröhren oder Sonnenlicht) unterscheiden zu können, wird es mit einer niedrigen Frequenz (z.B. 100 *Hz*) moduliert.
- Vorausgesetzt, dass alle Objekte die gleiche Farbe und Oberfläche besitzen, kann die Distanz zu den Objekten bestimmt werden.
- Die Intensität des reflektierten Lichts ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Distanz.

Infrarotsensoren (2)

- In realistischen Umgebungen haben die Oberflächen unterschiedliche Farben.
- Farbige Oberflächen reflektieren unterschiedlich viel Licht.
- Schwarze Oberflächen sind praktisch unsichtbar.
- IR-Sensoren können eigentlich nur zu Objekterkennung nicht aber zur Entfernungsmessung eingesetzt werden.
- Wenn ein IR-Signal vom Sensor empfangen wird kann man mit Sicherheit annehmen, dass sich ein Objekt vor dem Sensor befindet.
- Phantomsignale sind sehr selten.
- Fehlt ein IR-Signal heißt das allerdings nicht, dass kein Objekt vor dem Sensor ist.
- IR-Sensoren werden für kurze Reichweiten eingesetzt (50 bis 100 cm).

Infrarotsensoren (3)



Ultraschallsensoren (1)

In der Biologie gibt es zwei Vorbilder für Ultraschallsensoren:

1. Delphin

- Lokalisation
- Tracking von Fischen
- Navigation
- Kommunikation

2. Fledermaus

- Lokalisation
- Navigation (z.B. in dunklen Höhlen)
- Tracking von Motten und Mäusen

Ultraschallsensoren (2)

Fledermäuse benutzen eine Reihe verschiedenster *Sonar*-Techniken (**s**ound **n**avigation **a**nd **r**anging):

- feste oder
- variierende Frequenzen,
- variierende Frequenzen, so dass die reflektierte Frequenz stationärer Objekte fest ist.

Obwohl künstliche Ultraschall-Sonare ähnliche Frequenzen wie in der Tierwelt erzeugen können, sind die Fähigkeiten der Tiere noch lange nicht erreicht.

Ultraschallsensoren (3)

Schallwellen unterscheiden sich von elektromagnetischen Wellen in drei physikalischen Eigenschaften:

- Medium,
- Geschwindigkeit und
- Wellenlänge.

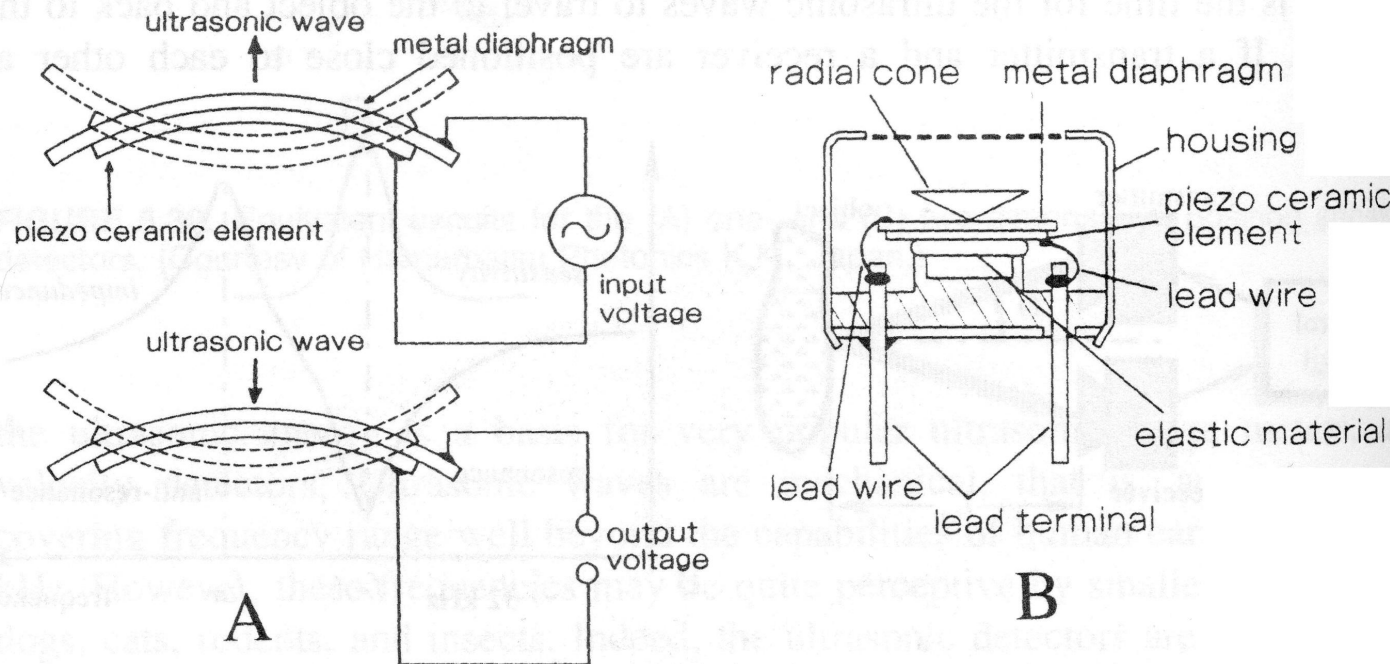
Ultraschallsensoren (4)

- Schallwellen brauchen ein Medium wie Luft oder Wasser.
- Die Geschwindigkeit des Schalls in der Luft beträgt $331.6 + 0.6 \times \text{°C } m/s$.
- *Time-of-flight*-Messung für kurze Distanzen möglich.
- Die Wellenlänge eines 50 kHz Ultraschallsensors beträgt 6.872 mm .
- Dadurch wird der Schall an einer glatten Oberfläche wohldefiniert reflektiert.
- Erst bei sehr groben Strukturen wird Ultraschall *diffus* reflektiert.
- **Vorsicht:** Ein runder Stab erzeugt eine diffuse Reflektion.

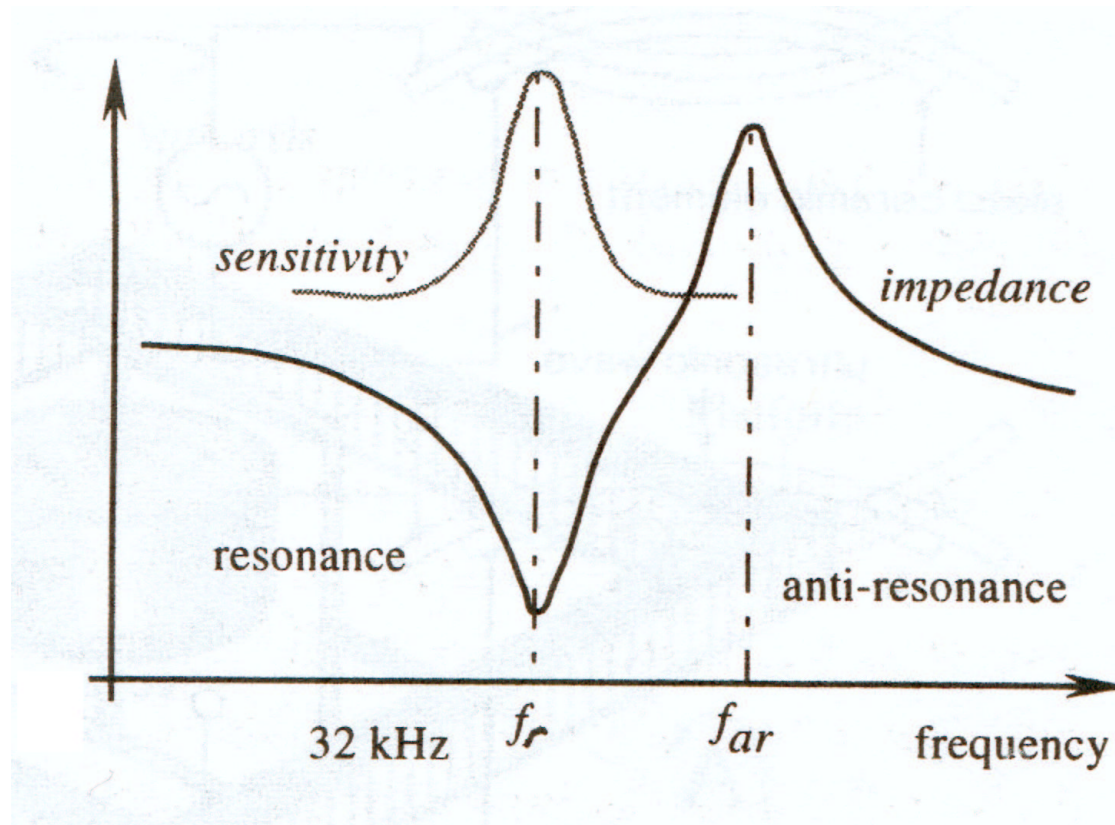
Piezoelektrischer Ultraschall-Transducer (1)

- Um Ultraschallwellen zu erzeugen, ist die Bewegung einer Oberfläche erforderlich.
- Diese Bewegung verursacht eine Kompression bzw. Expansion des Mediums.
- Eine Möglichkeit Ultraschallwellen zu erzeugen ist die Verwendung eines piezoelektrischen Transducers im Motor-Modus.
- Eine Spannung verursacht eine Biegung des Keramik-Elementes.
- Piezoelektrizität ist reversibel, daher erzeugen eintreffende Ultraschallwellen eine Ausgangsspannung.
- Typischerweise werden Piezoelektrische Transducer in der Nähe der Resonanzfrequenz f_r (32 kHz) betrieben.
- Dort reagiert das Keramik-Element mit der größten Sensitivität.

Piezelektrischer Ultraschall-Transducer (2)



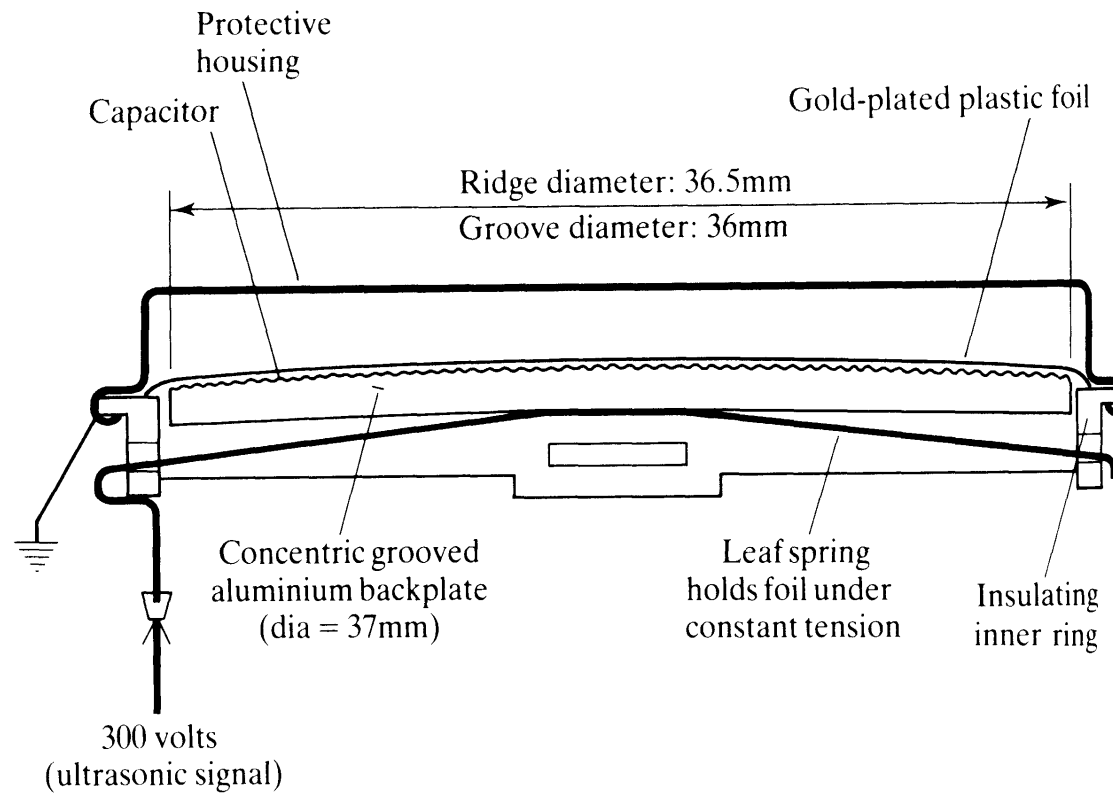
Piezelektrischer Ultraschall-Transducer (3)



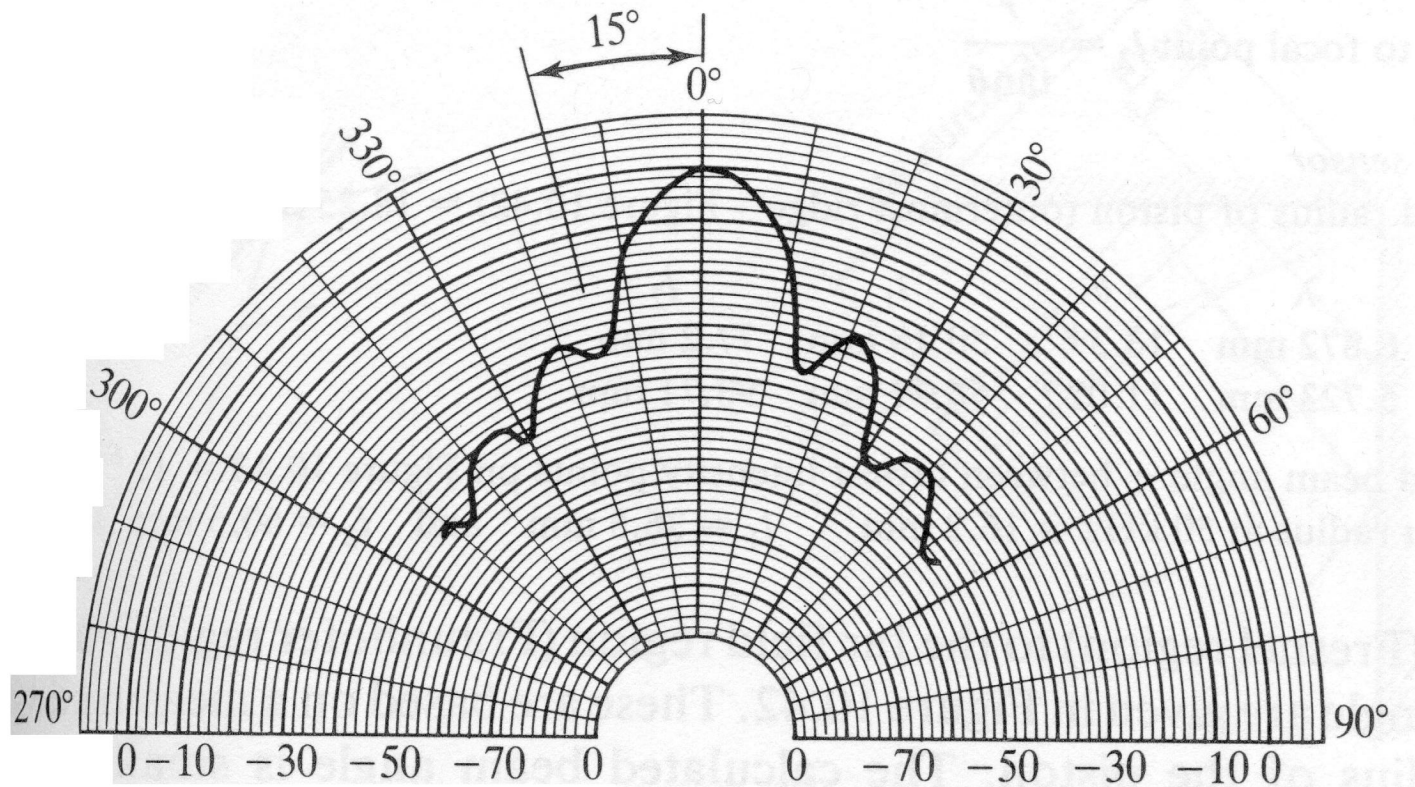
Polaroid Ultraschall-Transducer (1)

- Der *Polaroid Ultraschall Transducer* ist ebenfalls sowohl Transmitter (Sender) als auch Receiver (Empfänger).
- Im Empfangsmodus arbeitet er wie ein elektrostatisches Mikrofon.
- Der Radius des runden Transducers beträgt etwa dreimal die ausgesandte Wellenlänge.
- Der Öffnungswinkel des Ultraschallsignals beträgt etwa 15° .
- Das bewegliche Element des Transducers ist eine Plastikfolie mit Goldbeschichtung.
- Sie wandelt elektrische Energie in Schallwellen um und umgekehrt.

Polaroid Ultraschall-Transducer (2)



Polaroid Ultraschall-Transducer (3)



Polaroid Ultraschall-Transducer (4)

- Normalerweise wird ein Zirpen (engl.: *chirp*) von 1 ms erzeugt.
- Das Zirpen enthält 56 Impulse:
 - ❖ 8 mit 60 kHz
 - ❖ 8 mit 57 kHz
 - ❖ 16 mit 53 kHz
 - ❖ 24 mit 50 kHz
- Mehrere Frequenzen werden benutzt, da einige Materialien akustische Energie absorbieren und kein Echo reflektieren.

Ultraschallsensoren: Genauigkeit (1)

Die Mindestdistanz d_{min} , die noch gemessen werden kann, berechnet sich wie folgt:

$$d_{min} = \frac{1}{2}vt_{Impuls}$$

v : Geschwindigkeit des Schalls im entsprechenden Medium.

t_{Impuls} : Dauer des ausgesandten Impulses in Sekunden.

Ultraschallsensoren: Genauigkeit (2)

Die maximale Distanz d_{max} , die noch gemessen werden kann, berechnet sich wie folgt:

$$d_{max} = \frac{1}{2}vt_{Intervall}$$

v : Geschwindigkeit des Schalls im entsprechenden Medium.

$t_{Intervall}$: Zeitspanne zwischen den einzelnen Impulsen.

Ultraschallsensoren: Genauigkeit (3)

Auflösungsvermögen $d_{\text{Auflösung}}$ eines Sonarsensors:

$$d_{\text{Auflösung}} = \frac{d_{\text{max}}}{q}$$

q : Quantisierungsschritte, die für die Distanzkodierung zur Verfügung stehen.

d_{max} : Maximale Reichweite des Sensors.

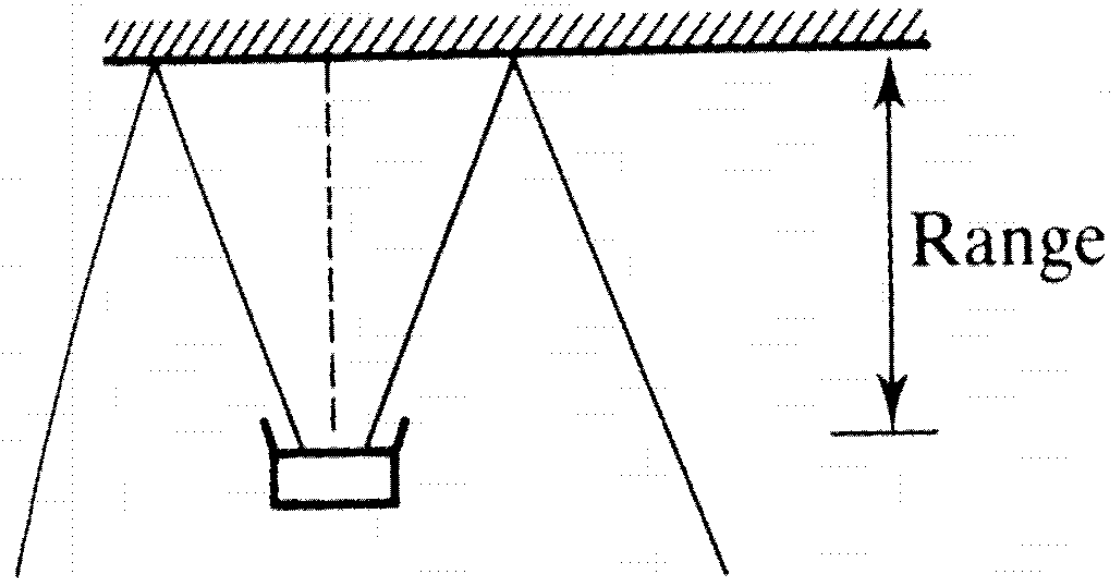
Ultraschall-Messfehler (1)

- Bei der Verwendung von Sonarsensoren können einige Ungenauigkeiten auftreten.
- Die präzise Position des Objektes bleibt unbekannt.
- Grund: Der Empfindlichkeitsbereich eines Sonarsensors ist keulenförmig.
- Ein mit Distanz d wahrgenommenes Objekt kann an beliebiger Position innerhalb des Sonarkegels auf dem Bogen mit Distanz d liegen.
- *Spiegel-* und *Totalreflexionen* verursachen fehlerhafte Messungen.
- Trifft der Sonarstrahl in flachem Winkel auf ein glattes Objekt, so wird das Signal abgelenkt und nicht zum Sensor reflektiert.

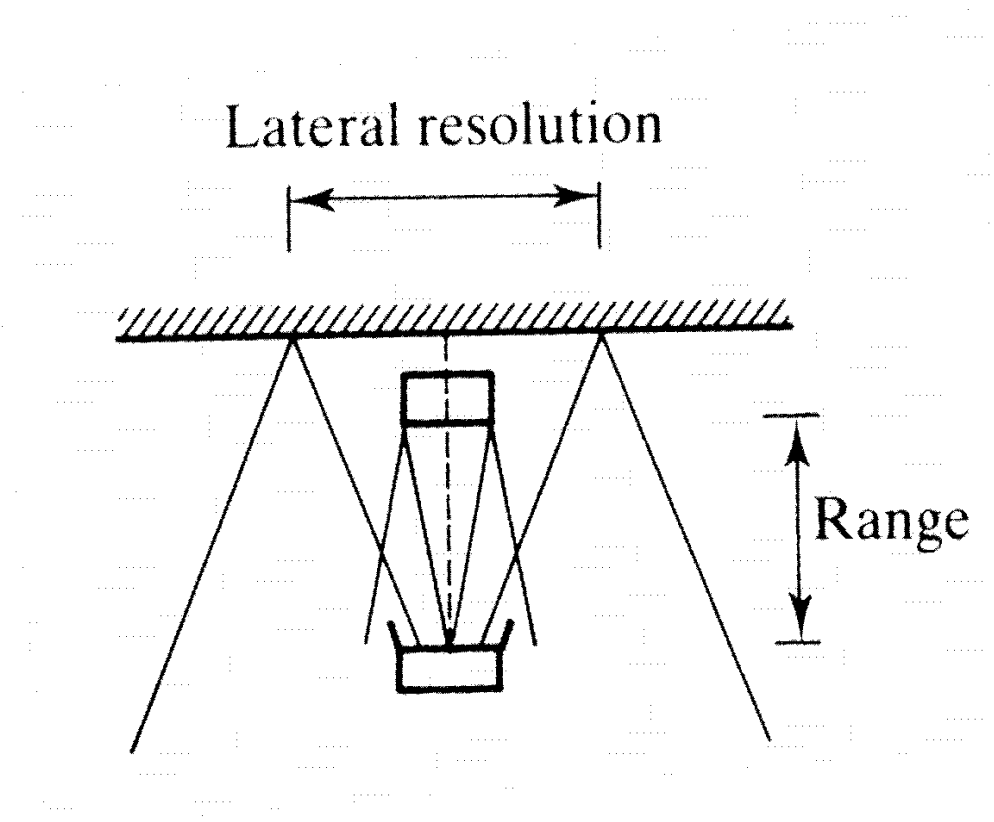
Ultraschall-Messfehler (2)

- Werden mehrere Sonarsensoren gleichzeitig benutzt, müssen spezifisch verschlüsselte Signal verwendet werden, da es ansonsten zu „Übersprechen“ (engl.: *Crosstalk*) kommt.
- Da die Messung von der Temperatur des Mediums abhängt, bewirkt z.B. eine Änderung der Lufttemperatur von 16°C einen Messfehler von 30 cm über eine Entfernung von 10 m.
- Ein solcher Fehler hat zwar keinen Einfluss auf einfache Sensor-Motor-Verhaltensweisen wie Hindernisausweichen, führt aber bei der Kartenerstellung zu unpräzisen Umgebungskarten.

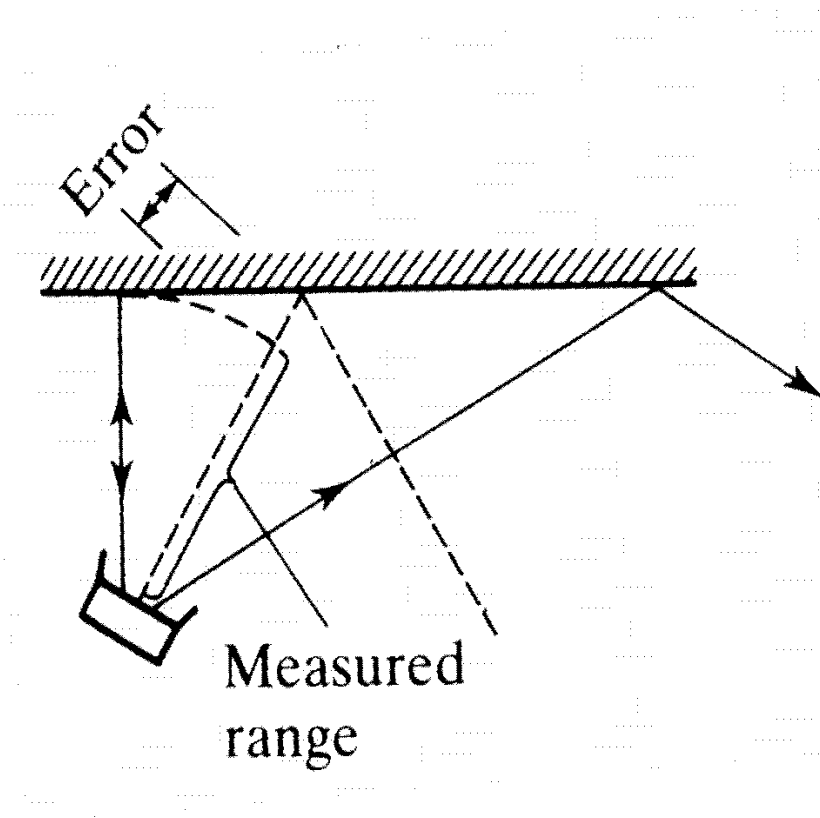
Ultraschall-Messfehler: Richtige Entfernung



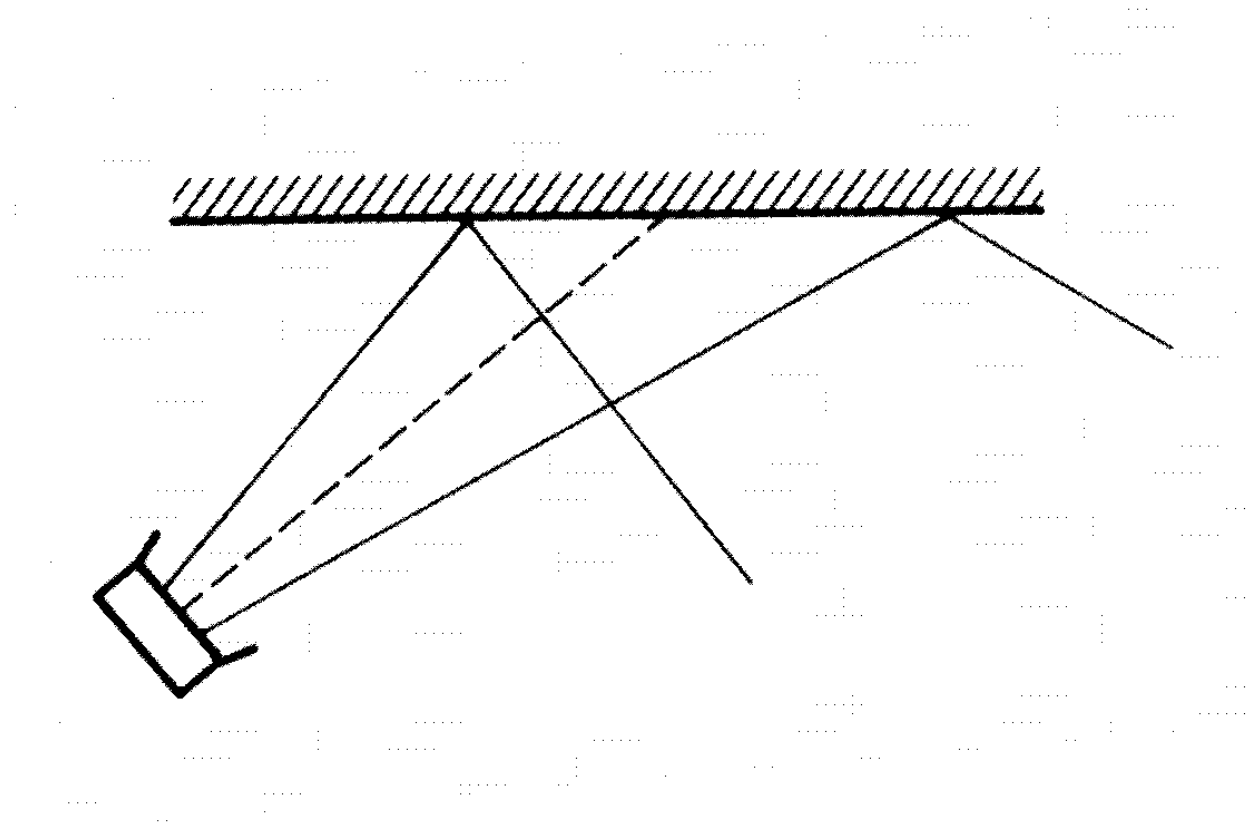
Ultraschall-Messfehler: Laterale Auflösung



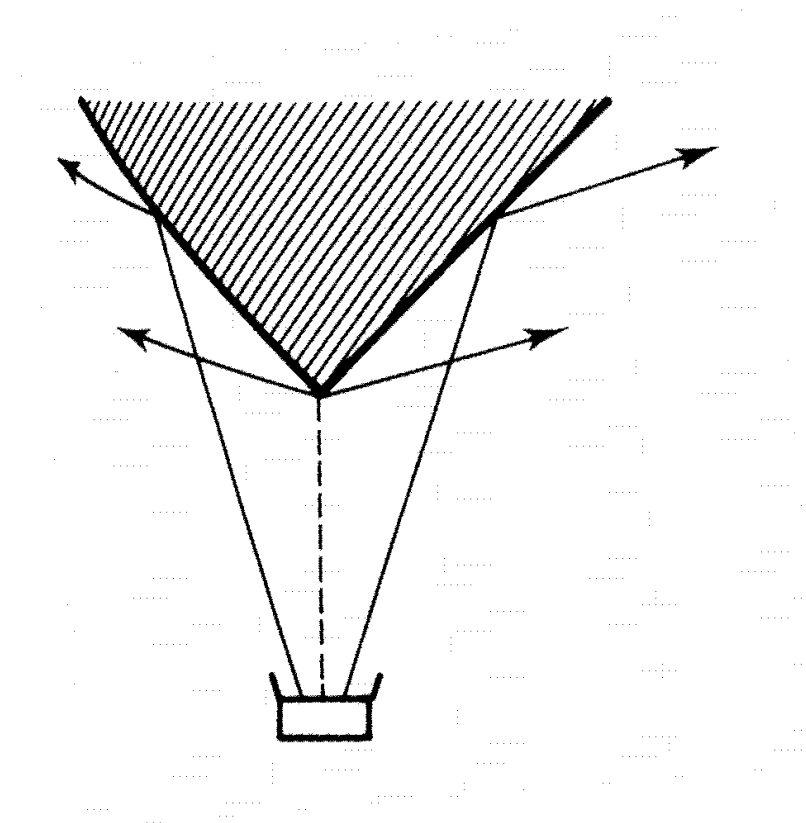
Ultraschall-Messfehler: Orthogonale Reflektion



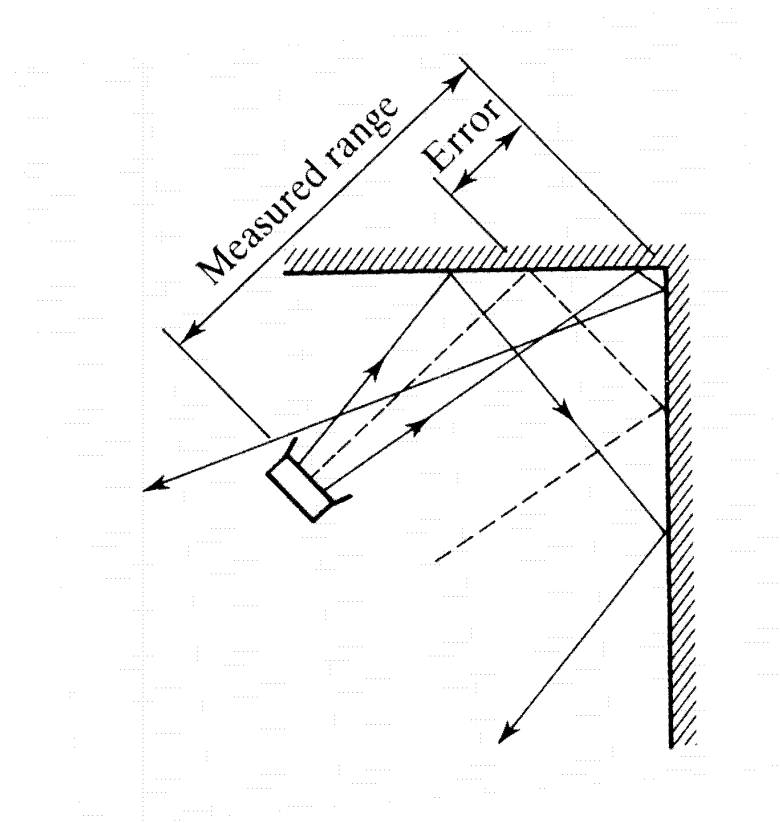
Ultraschall-Messfehler: Unsichtbare Wand



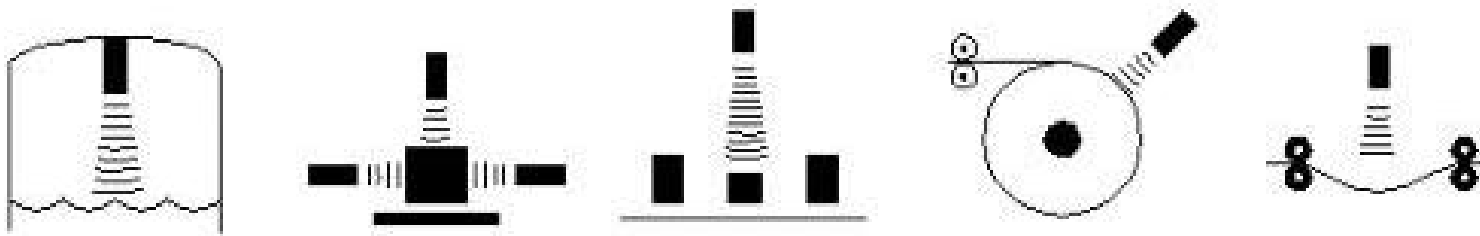
Ultraschall-Messfehler: Unsichtbare Ecke



Ultraschall-Messfehler: Falsche Reflektion



Anwendung von Ultraschallsensoren



- Bewegungsüberwachung
- Niveau-Überwachung
- Messen von Ausdehnungen
- Sortieren, Aussuchen
- Annäherung, Positionierung und Objektdetektion

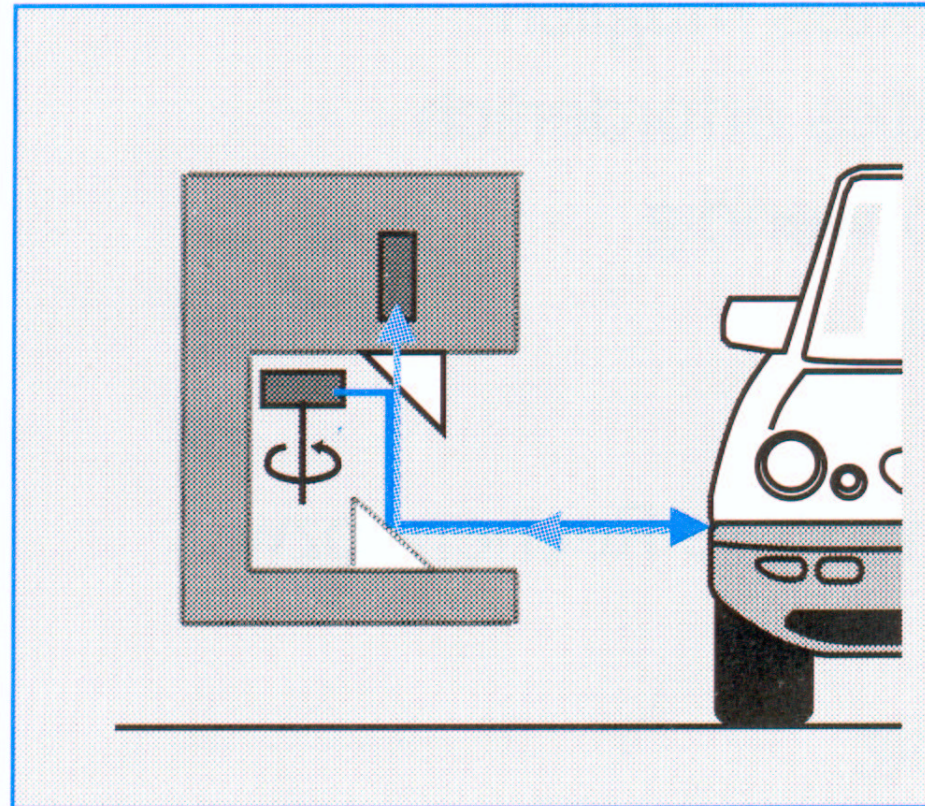
Laserentfernungsmesser

- *Laserentfernungsmesser* messen die Entfernung, Geschwindigkeit und Beschleunigungsrate wahrgenommener Objekte.
- Das Prinzip ist das gleiche wie bei Sonarsensoren.
- Statt eines kurzen Schallimpulses wird beim Laser ein kurzer Lichtimpuls ausgesandt.
- Die Zeitspanne zwischen dem Aussenden und dem Empfang des reflektierten Impulses wird für die Entfernungsbestimmung genutzt.
- Die Wellenlänge liegt im Bereich von Infrarotlicht.
- Sie ist wesentlich kürzer als beim Sonarimpuls.
- Die Wahrscheinlichkeit, von einer glatten Oberfläche symmetrisch wegreflektiert zu werden, ist sehr viel geringer (→ weniger Spiegelreflektionen).

Laserentfernungsmesser: Funktionsprinzip (1)

- Ein gepulster Laserstrahl wird ausgesandt.
- Trifft der Laserimpuls auf ein Objekt, wird er reflektiert und im Empfänger des Scanners registriert.
- Die Zeit vom Aussenden bis zum Empfang des Impulses ist direkt proportional zur Entfernung zwischen Scanner und Objekt (Lichtlaufzeit).
- Durch einen internen Drehspiegel wird der gepulste Laserstrahl abgelenkt und die Umgebung fächerförmig abgetastet (Laser-Radar).
- Aus der Abfolge der empfangenen Impulse wird die Kontur des Objektes berechnet.
- Die Messwerte stehen zur Auswertung in Echtzeit an der Schnittstelle zur Verfügung.

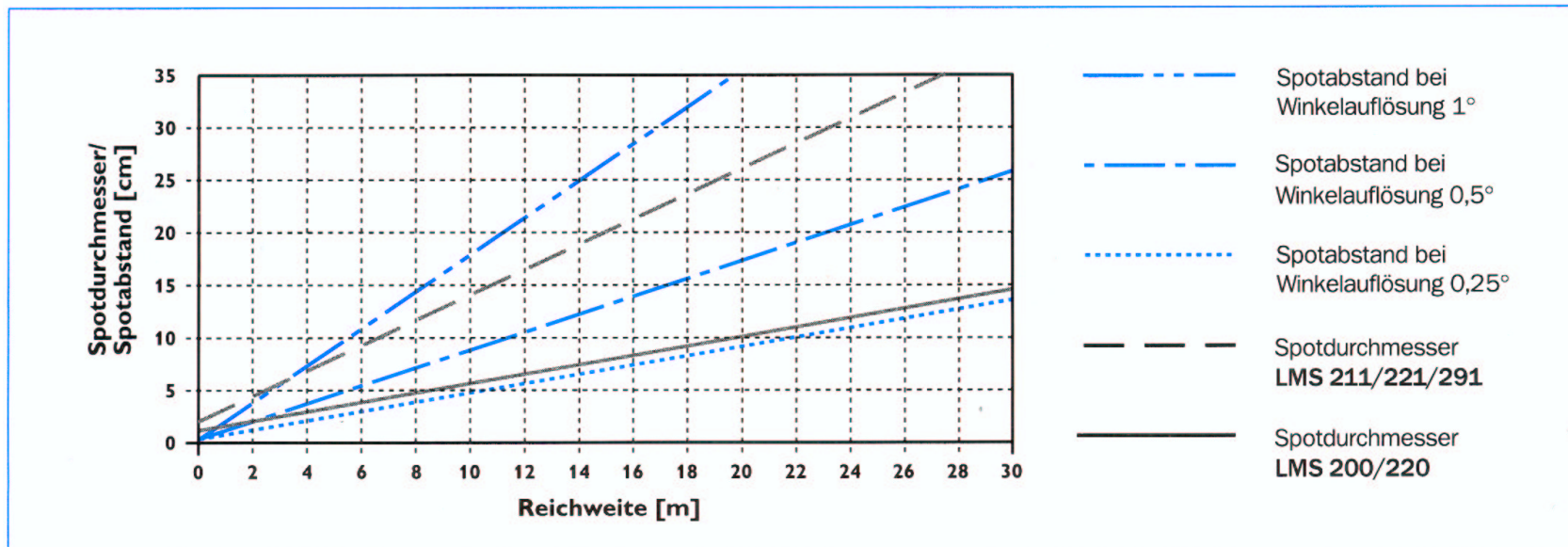
Laserentfernungsmesser: Funktionsprinzip (2)



Spotabstand/-durchmesser (1)

- Im radialen Blickfeld wird typischerweise alle 0.25° , 0.5° oder 1° ein Lichtimpuls (Spot) ausgesandt.
- Bedingt durch die Strahlgeometrie und den Durchmesser der einzelnen Spots, überlappen sich diese auf dem zu messenden Objekt bis zu einer bestimmten Entfernung.

Spotabstand/-durchmesser (2)

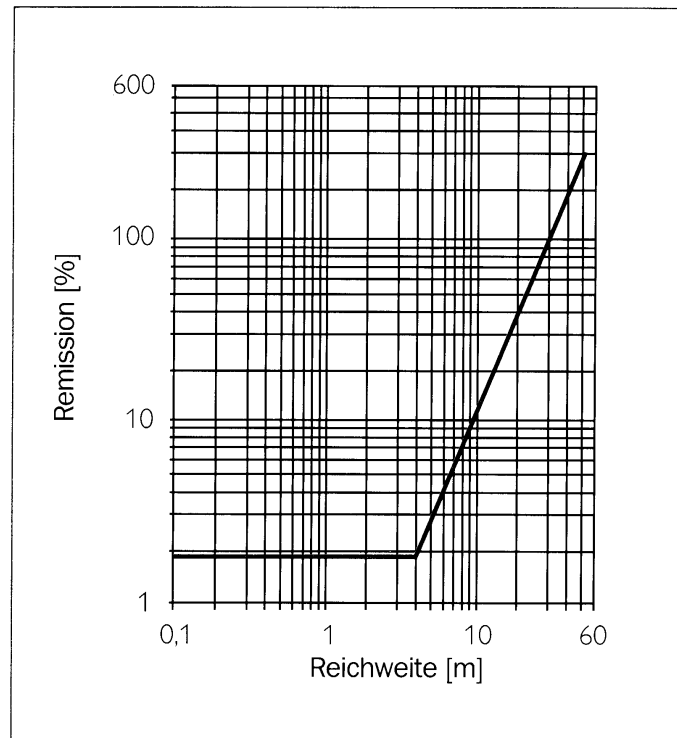


Remission unterschiedlicher Objekte

Die Reichweite der Scanner hängt von der jeweiligen *Remission* (Reflektivität) des Objektes sowie von der Sendestärke des Scanners ab.

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 %

Reichweite: SICK LMS 200



LMS 200/LMS 220

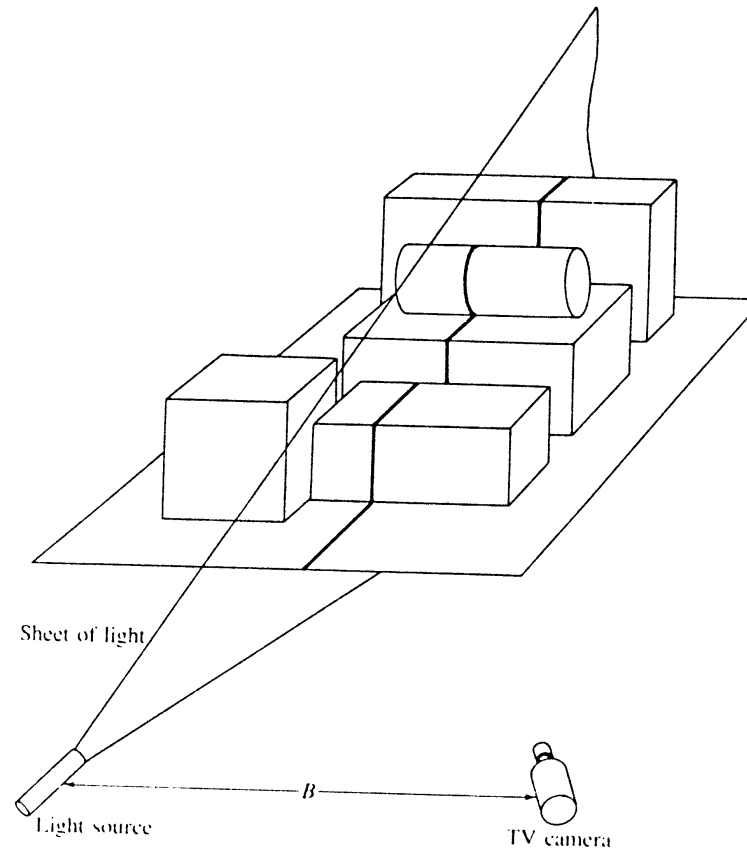
Technische Daten: SICK LMS 200

Reichweite (RW)	bis max. 80 m
max. Scanwinkel	180°
Winkelauflösung	0.25°/0.5°/1° (einstellbar)
Ansprechzeit	53 ms/26 ms/13 ms
Messauflösung	10 mm
Systematischer Fehler	±15 mm (RW 1...8 m)
Standardabweichung	typ. 5 mm (RW ≤8 m)
Übertragungsrate	9,6/19,2/38,4/500 kBaud (RS-232/RS-422)
Betriebstemperatur	0...+50°C
Gewicht	4,5 kg

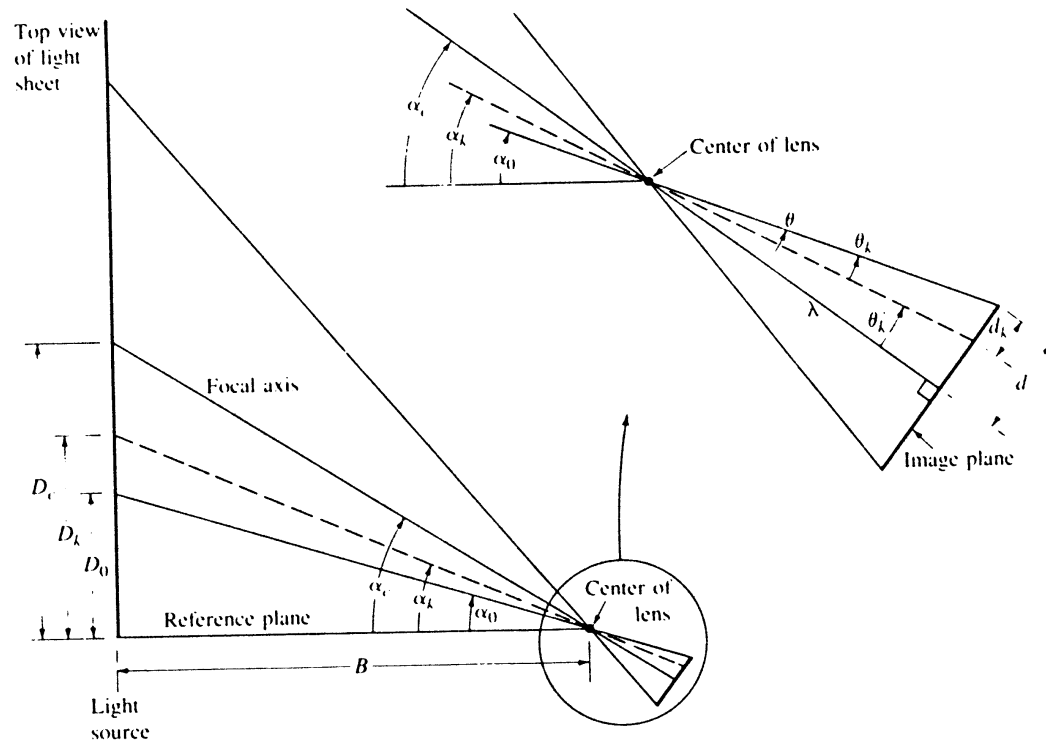
Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (1)

- Ansatz: Projektion eines Lichtmusters auf die zu vermessenden Objekte und Berechnung der Abstände über die Verzerrung des Musters.
- Populärste Methode: Muster ist ein schmaler Lichtstreifen.
- Ein solcher Lichtstreifen kann mit einer zylindrischen Linse oder durch einen schmalen Spalt erzeugt werden
- Der Lichtstreifen fällt auf die Objekte im Arbeitsraum.
- Die Szene wird von einer Kamera mit festem Abstand B von der Lichtquelle beobachtet.
- Die Abstände können nach der Kalibration des Systems bestimmt werden.

Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (2)



Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (3)



Senkrechter Blick auf das vorherige Bild.

Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (4)

- In den beiden vorangegangenen Bildern befinden sich Lichtquelle und Kamera auf derselben Höhe.
- Der Lichtstreifen wird senkrecht zur Kamera-Lichtquelle-Ebene ausgestrahlt.
- Die Kamera-Lichtquelle-Ebene heißt Referenzebene (engl.: *reference plane*).
- Jede Ebene parallel zur Referenzebene produziert eine senkrechte Linie im Kamerabild, wenn die Kamera richtig ausgerichtet ist.
- Jeder Punkt einer solchen senkrechten Linie hat den gleichen Abstand zur Referenzebene.

Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (5)

- Sei das Bild der Kamera ein $N \times M$ Feld und $y = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ der Spaltenindex.
- Eine Kalibration erfolgt durch Messen des Abstandes B zwischen Linsenzentrum der Kamera und Lichtquelle und Bestimmen der Winkel α_c und α_0 .
- Daraus folgt:

$$d = \lambda \tan \theta$$

wobei $\theta = \alpha_c - \alpha_0$ und λ die Brennweite der Linse ist.

Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (6)

- Der Abstand zur Referenzebene erhöht sich mit jeder Spalte des Bildes um d_k :

$$d_k = k \frac{d}{M/2} = \frac{2kd}{M}$$

für $0 \leq k \leq M/2$

- $k = 0$ ist die Spalte am linken Rand des Bildes, $k = M/2$ die mittlere Spalte.

Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (7)

Winkel α_k eines beliebigen Streifens ist:

$$\alpha_k = \alpha_c - \theta'_k$$

mit

$$\tan \theta'_k = \frac{d - d_k}{\lambda}$$

Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (7)

Es folgt

$$\theta'_k = \tan^{-1} \left[\frac{d(M - 2k)}{M\lambda} \right]$$

mit $0 \leq k \leq M/2$.

Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (8)

Für die andere Seite der Optischen Achse ergibt sich:

$$\alpha_k = \alpha_c + \theta''_k$$

mit

$$\theta''_k = \tan^{-1} \left[\frac{d(2k - M)}{M\lambda} \right]$$

mit $M/2 \leq k \leq (M - 1)$.

Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (9)

- Es gilt: $\theta''_k = -\theta'_k$
- Die senkrechte Distanz D_k zwischen einem beliebigen senkrechten Lichtstreifen und der Referenzebene ist gegeben durch

$$D_k = B \tan \theta_k$$

für $0 \leq k \leq M - 1$

- Sind b , α_0 , α_c , M und λ bekannt, bestimmt die Spaltennummer den Abstand aller Punkte einer senkrechten Linie zur Referenzebene.

Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (10)

- Die Kalibration erfolgt jetzt durch einfaches Messen von B und bestimmen von α_c und α_0 .
- Um α_c zu bestimmen wird eine Ebene parallel zur Referenzebene aufgestellt, so dass der Lichtstreifen in der mittleren Spalte des Bildes zu sehen ist ($y = M/2$).
- Dann wird D_c gemessen, es gilt:

$$\alpha_c = \tan^{-1} \left(\frac{D_c}{B} \right)$$

Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (11)

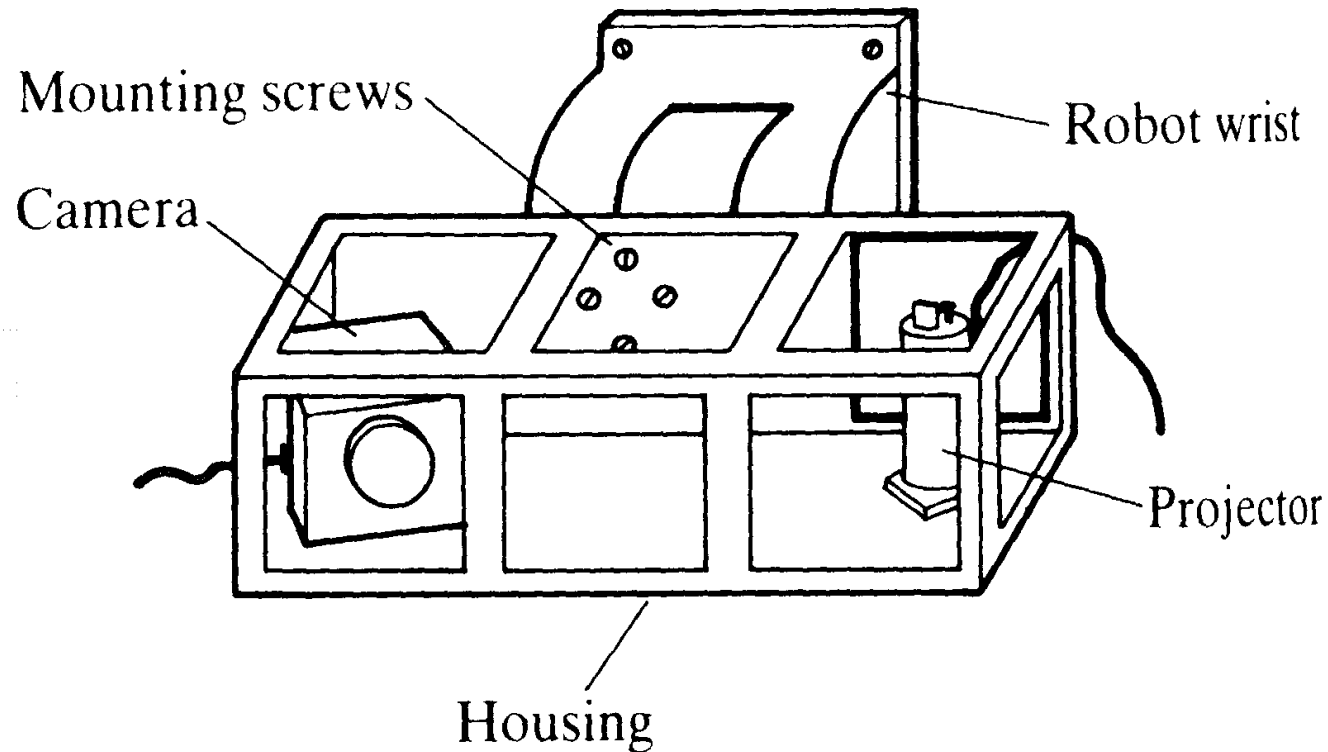
- Um α_0 zu bestimmen, wird die Ebene näher an die Referenzebene geschoben, solange bis der senkrechte Lichtstreifen in der Spalte $y = 0$ zu sehen ist.
- Dann wird D_0 gemessen, es gilt:

$$\alpha_0 = \tan^{-1} \left(\frac{D_0}{B} \right)$$

Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (12)

- Der Vorteil dieser Abstandsmessung ist ihre Einfachheit.
- Nach der Kalibration kann der jeder Spalte zugeordnete Abstand abgespeichert werden.
- Im laufenden Betrieb kann so schnell die Tiefe eines Objektes bestimmt werden.

Abstandsmessung mit strukturiertem Licht (13)



Probleme optischer Sensoren

Vier Probleme:

- schmutzige Linsen

Lösung:

- ❖ regelmäßige Reinigung
- ❖ Schutzhüllen
- ❖ Montage senkrecht nach unten, so dass keine Staub liegen bleibt

- Umgebungslicht

Lösung: moduliertes oder pulsierendes Licht

- schlechte Oberflächenreflektion
- falsche Objektorientierung

Literatur

- [1] DUDEK, GREGORY und MICHAEL JENKIN: *Computational principles of mobile robotics*, Kapitel 3.4, 3.4 u. 3.7, Seiten 58–62 u. 67–68. Cambridge University Press, 2000.
- [2] FRADEN, JACOB: *Handbook of modern sensors: physics, design, and applications*, Kapitel 5.8, Seiten 267–270. Springer-Verlag New York, Inc., 2. Auflage, 1996.
- [3] FU, KING SUN, R. C. GONZALEZ und C. S. G. LEE: *Robotics: control, sensing, vision, and intelligence*, Kapitel 6.2, Seiten 268–276. Mcgraw-Hill Series In Cad/Cam, Robotics, And Computer Vision. Mcgraw-Hill, Inc., New York, 1987.
- [4] MCKERROW, PHILLIP JOHN: *Introduction to Robotics*, Kapitel 10.6.3, Seiten 582–595. Electronic Systems Engineering Series. Addison-Wesley, korrigierte Auflage, 1993.

- [5] NEHMZOW, ULRICH: *Mobile Robotik: Eine praktische Einführung*, Kapitel 3.1.3, 3.1.4 u. 3.1.5, Seiten 27–32. Springer Verlag Berlin, 2002.
- [6] SICK AG, Nimburger Str. 11, D-79276 Reute: *Lasermesssysteme LMS 200/LMS 211/LMS 220/LMS 221/LMS 291*, Juni 2000. Technische Beschreibung.