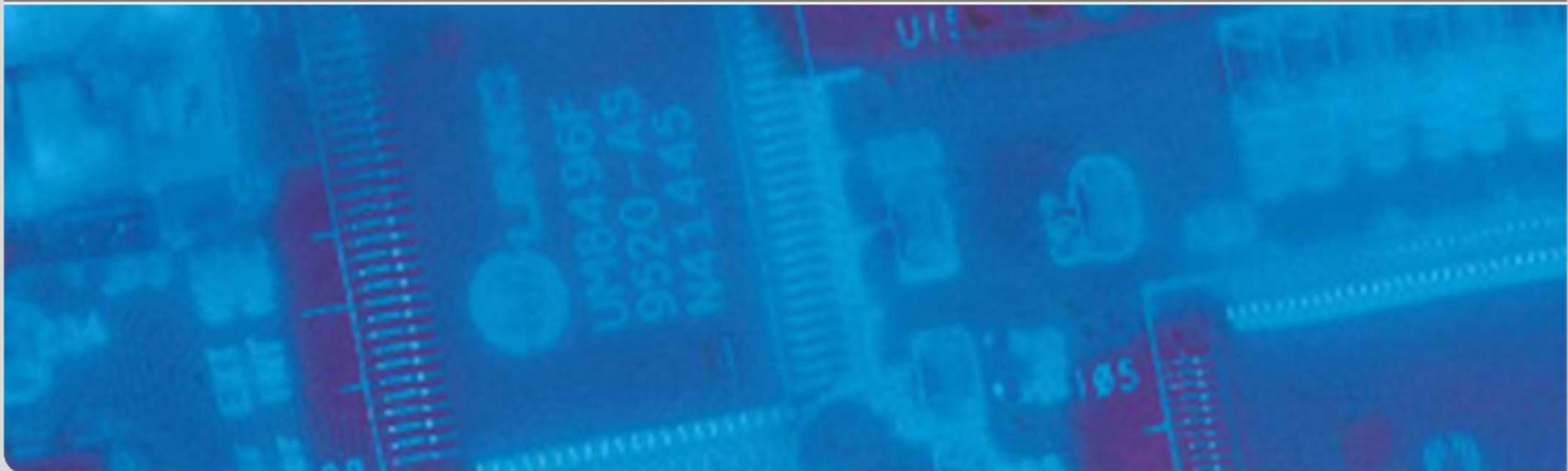


# Integrierte Intelligente Sensoren Sommersemester 2012

## 27.06.2012

**Wilhelm Stork**

Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV)





Referent: **Dr. Martin Izzard**  
 Vice President and Director of Texas Instruments R&D Labs



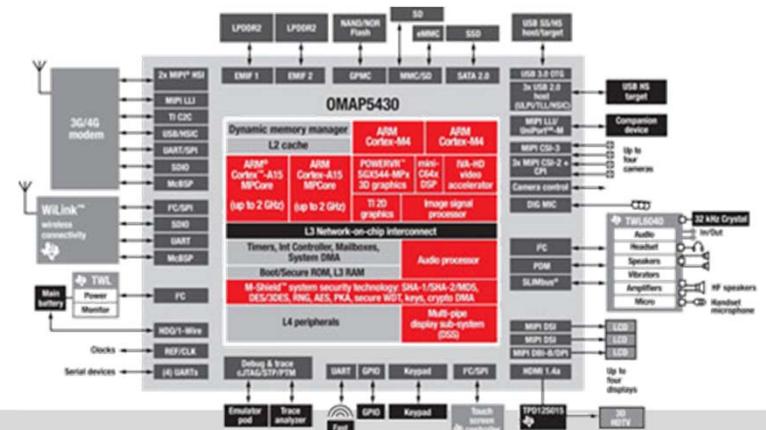
Title: **"Research and Innovation at Texas Instruments"**  
 Overview of the most important research activities  
 and the organization of research laboratories at TI



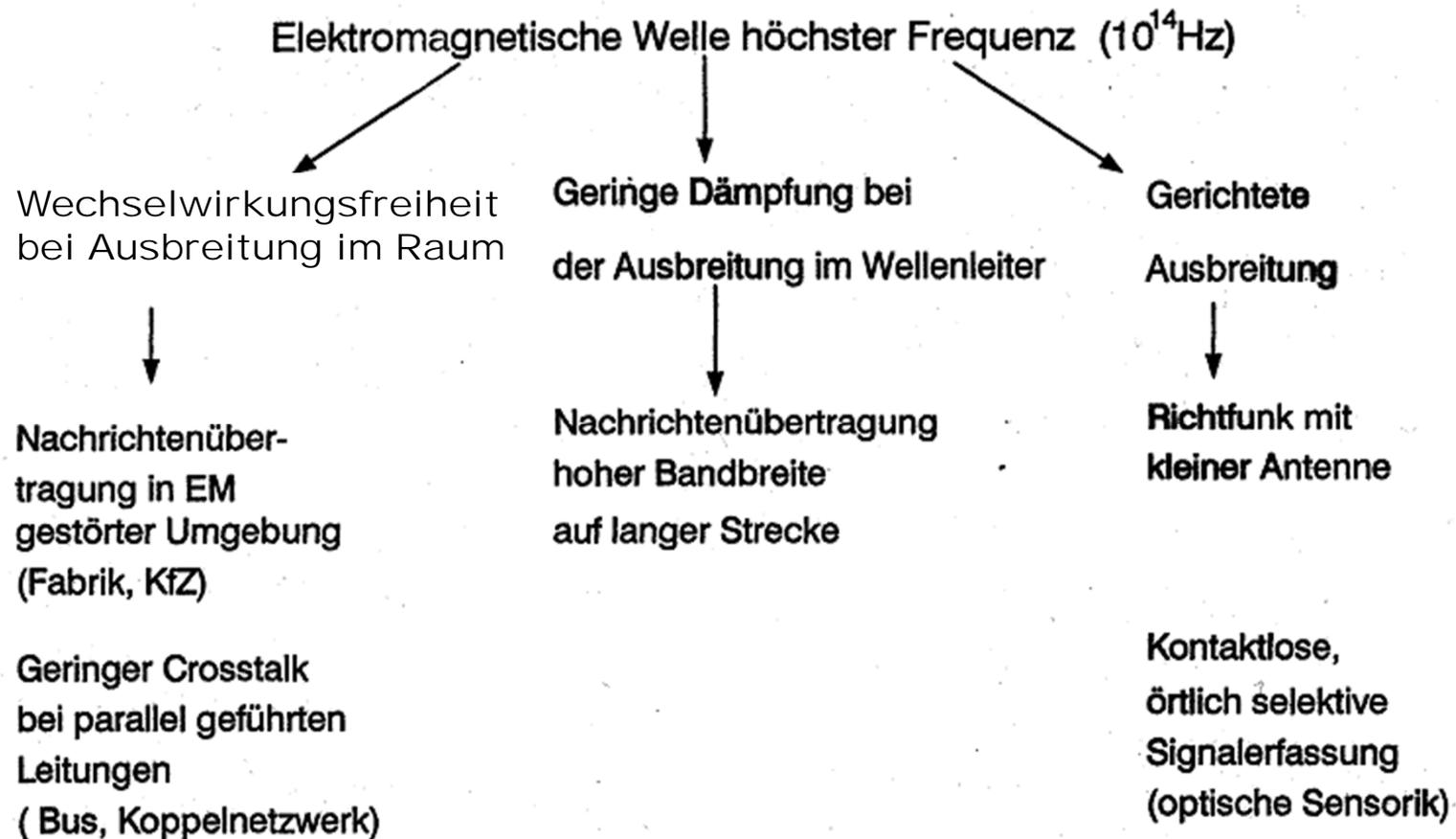
am **Mittwoch, 13.06.2012, um 14:00 Uhr**



Ort: **NTI-Hörsaal (Engesserstraße 5, Geb. 30.10)**



# Informationsträger Licht



# Optische Sensoren

## Klassische Anwendungen

- Landvermessung (Theodolit)
- Spektralphotometrie zur chemischen Analyse

## Moderne Anwendungen

- Landvermessung (Theodolit, elektronisch unterstützt)
- Spektrosensoren als Massenprodukt in der Umweltanalytik
- Abstands-, Lage-, Positions-, Beschleunigungs-, Geschwindigkeits-, Drehratensensoren, etc.

## Vorteile

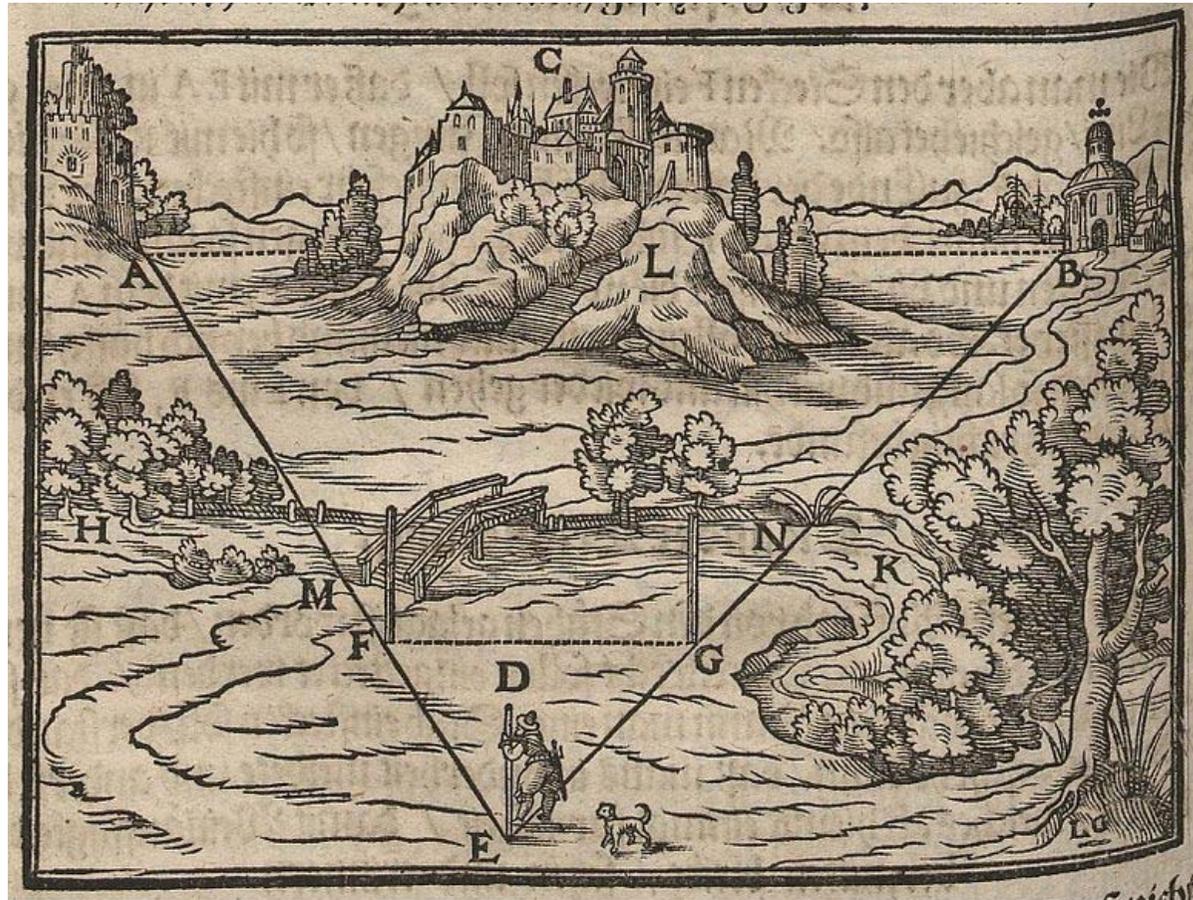
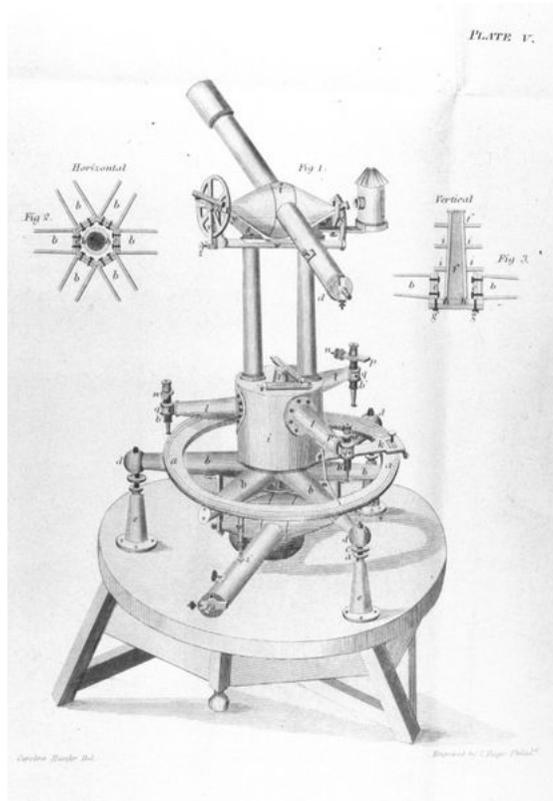
- Berührungslos
- Punktuell

# Optische Abstandsmessung

- Lange Distanzen (1m und mehr), geringe Präzision
  - Triangulation an Selbstleuchtern bzw. von der Sonne beleuchteten Objekten
  - Laufzeitmessung: Kurze Laserpulse hoher Leistung
  - Laserradar: Phasenmessung an moduliertem Laserstrahl  
(Geschwindigkeitsmessung möglich →  
Geschwindigkeitskontrolle)
  
- Mittlere Distanzen (mm – m), mittlere Präzision
  - Lasertriangulation
  
- Kurze Distanzen, hohe Präzision
  - Autofokusverfahren
  - Interferometer

# Triangulation in der Landvermessung (ab. ca. 1770 Vermessung Deutschlands)

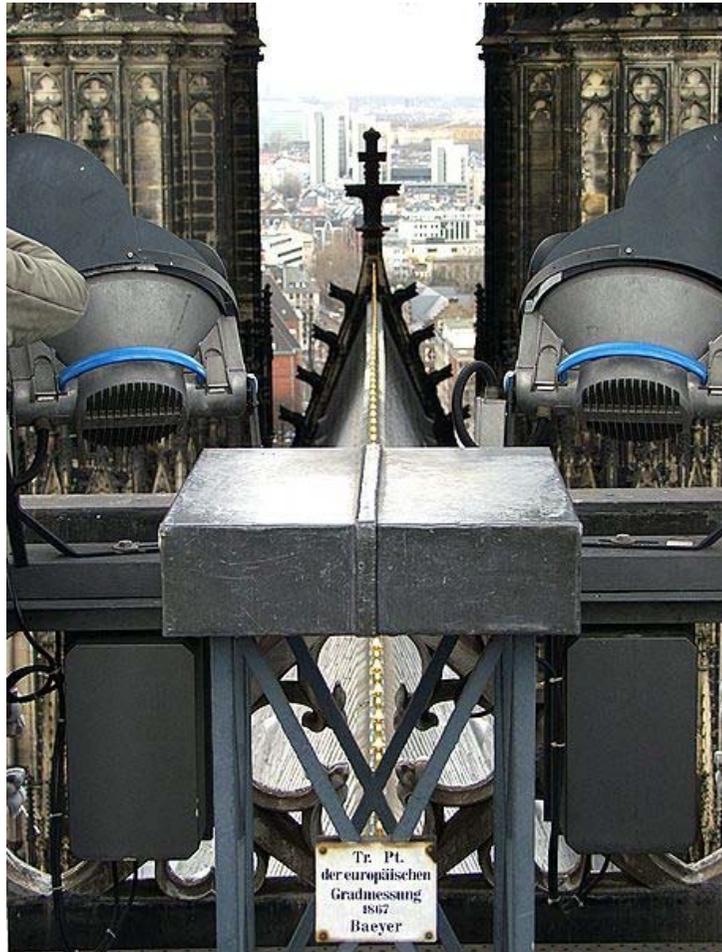
## ■ Geodäsie - Winkelmessung



Quelle: Deutsche Fotothek

Historische Abbildung zur Vermessung eines Geländes  
mit Hilfe eines Dreieck (1667) Wikipedia

# Triangulationspunkte - Dreiecksnetz



Triangulationspunkt im Vierungsturm des Kölner Doms. Hier verlief im 19. Jahrhundert der Nullmeridian für Deutschland.

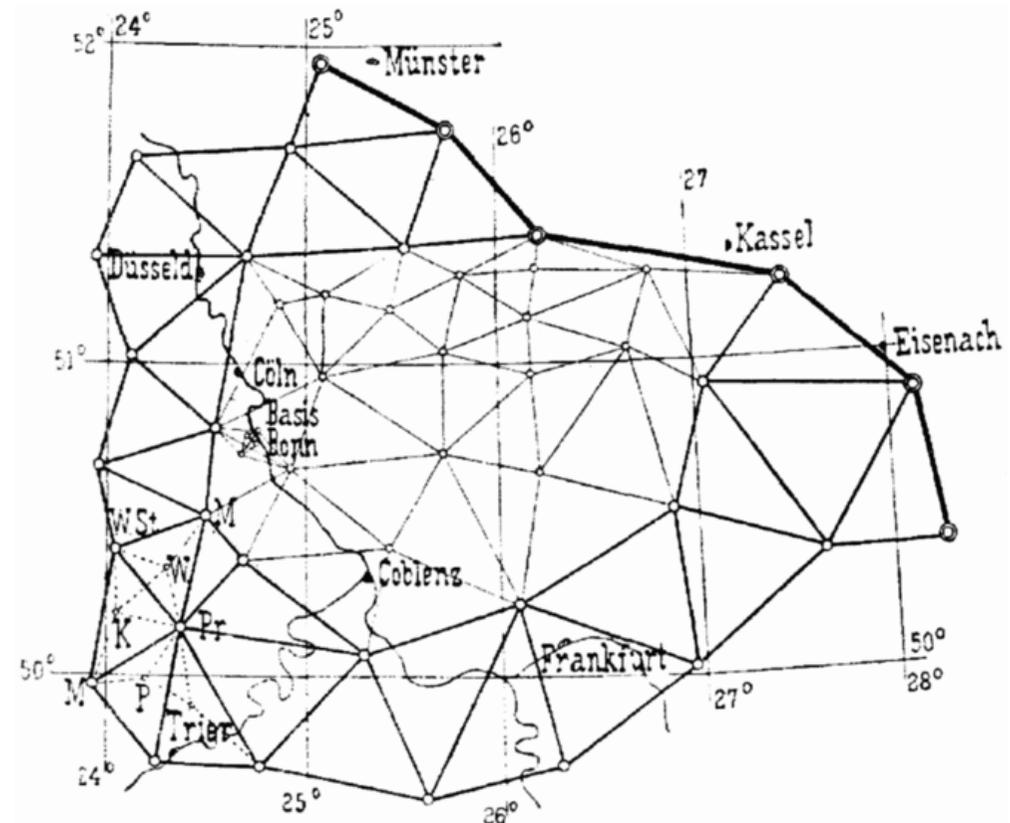
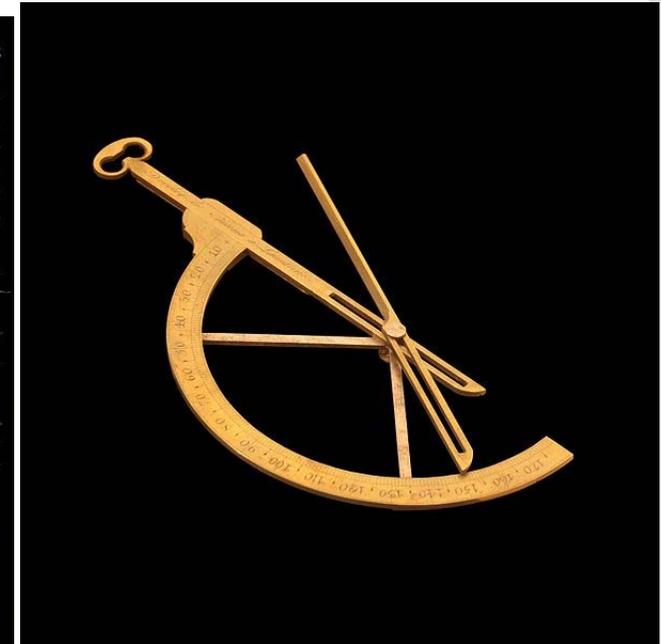


Fig. 4. Die rheinisch-hessische Kette und das nieder-rheinische Dreiecksnetz.

# Winkelmessung-Sextanten-Theodoliten



- Sextant – Banknote
- Theodolit Briefmarke
- Feinmechanische Gradeinteilung

# Theodoliten (Leica)



	TCRM1101plus	TCRM1102plus	TCRM1103plus	TCRM1105plus
Winkel- messung	1.5", 0.5 mgon	2", 0.6 mgon	3", 1.0 mgon	5", 1.5 mgon
Distanz- messung	3mm ± 2ppm (ohne Reflektor) 2mm ± 2ppm (mit Reflektor)			
Messzeit	3 s (ohne Reflektor bis zu 30m) 1 s (mit Reflektor)			
Reichweite*	Entfernung – Reflektor	3 km (Rundprisma)		
		1.5 km (360 degree prisma)		
	Entfernung – reflektorlos	80m (ohne Reflektor)		
		5 km (Rundprisma)		
Entfernung – XRange reflektorlos	200m (ohne Reflektor)			
	7.5 km (Rundprisma)			
Integrierte Programme	Orientierung und Höhenübertragung, Bogenschnitt, Spannmass, Absteckung			
Registrierung	PCMCIA SRAM/FLASH, RS232 Schnittstelle für externen Anschluss			
Vergrosserung	30 x			
Lot	Optisch: 2x Laser: in Alhidade, dreht mit Instrument, Genauigkeit ± 0.8mm bei 1.5 m			



	TC2003/TCA2003
Genauigkeit Hz, V	0.5" (0.15 mgon)
Genauigkeit (Dist.)	1mm + 1ppm
Reichweite*	2.5km / 3.5km
Vergrosserung	30 x
Kürzestes Zielweite	1.7 m

# Abstandssensoren - Triangulationssensoren

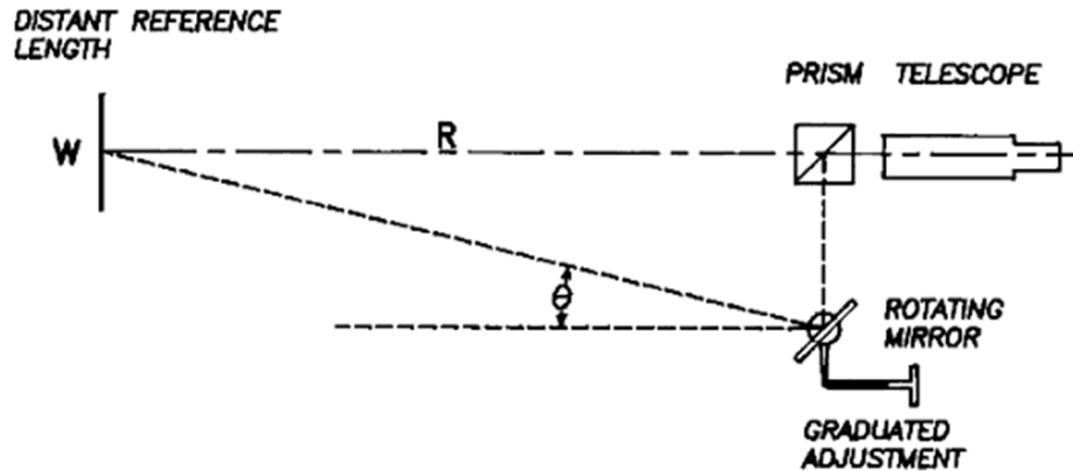
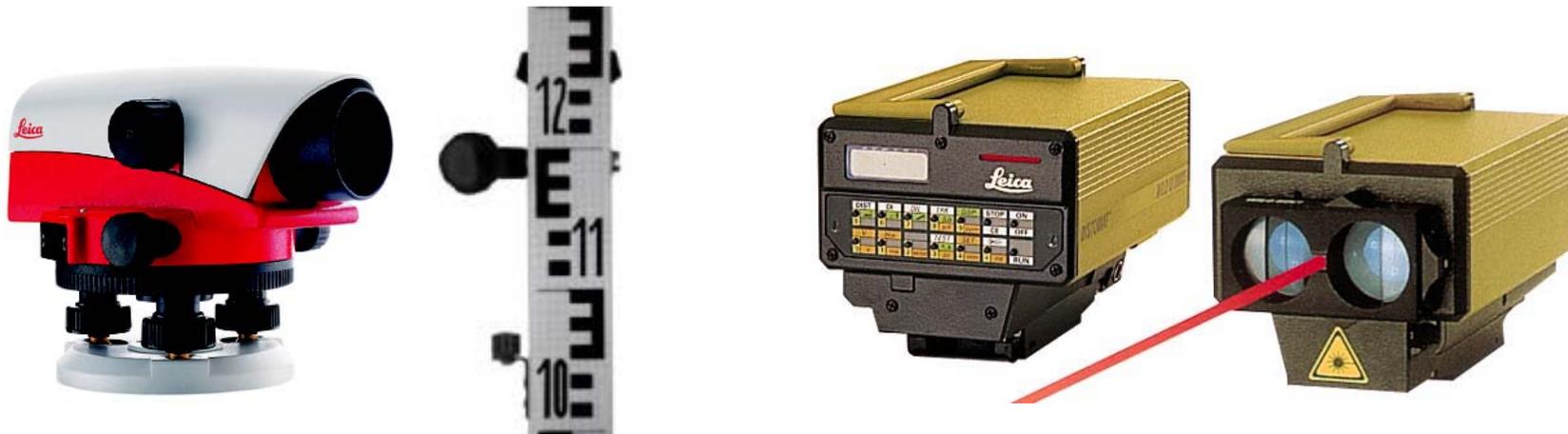


FIGURE 1 Stadia range meter. (From Patrick, 1969.)



# Abstandssensoren - Triangulationssensoren

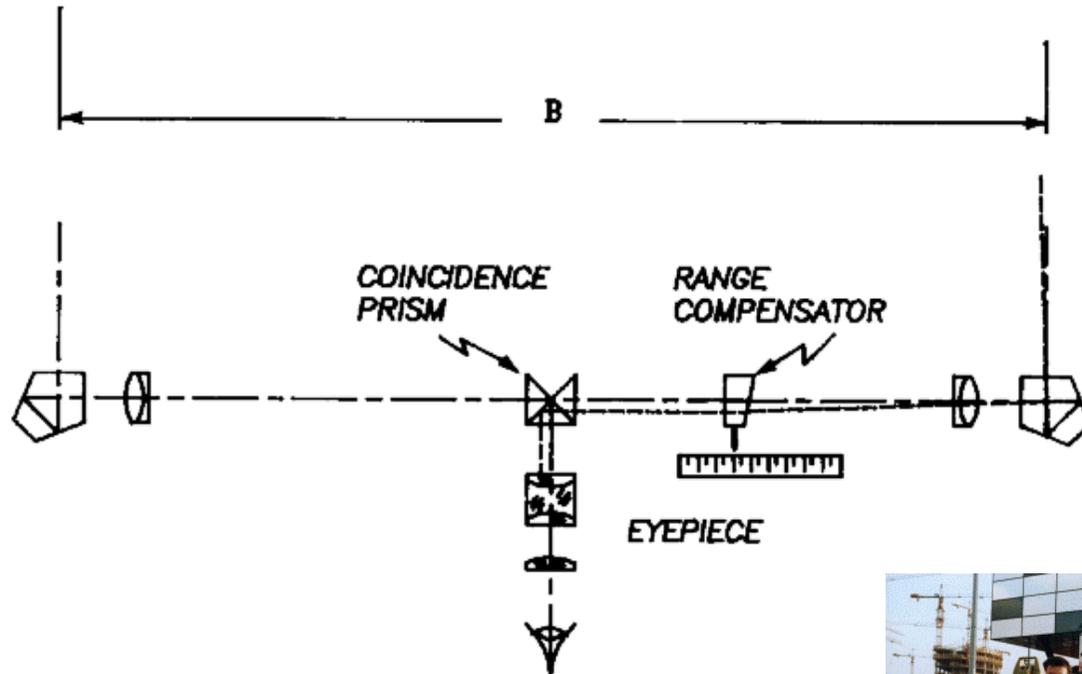


FIGURE 2 A range finder.

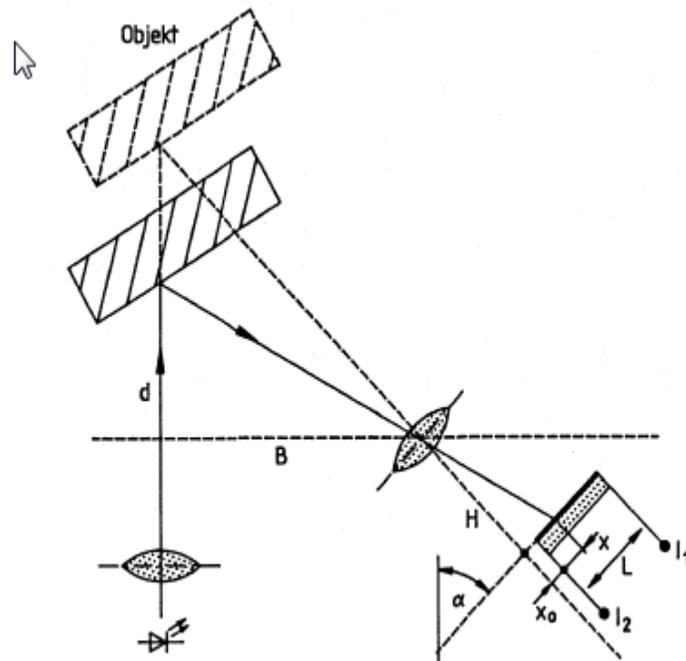


*Entfernungsmesser mit im Gerät realisierter Referenzlänge (Theodolith)*

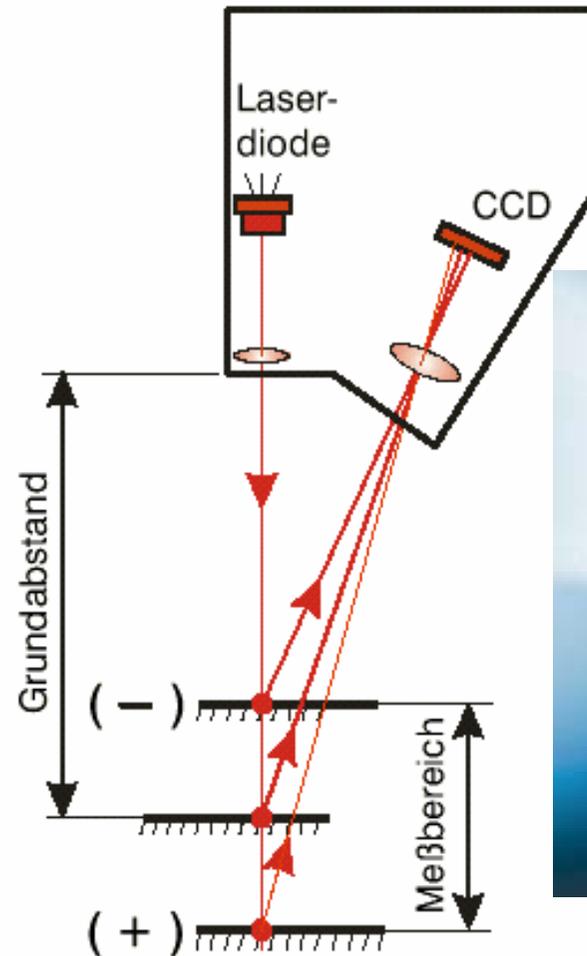
*Überlagerung zweier gleicher Bilddetails mit prismatischer Winkelablenkung (Triangulation)*

Genauigkeit:  $\Delta R = R^2 \cdot \Delta \theta / B$      $\Delta \theta \approx 3 \cdot 10^5$ ,  $B \approx 0.2 \Rightarrow \Delta R$  bei  $R=100$  m  $\approx 1$  m

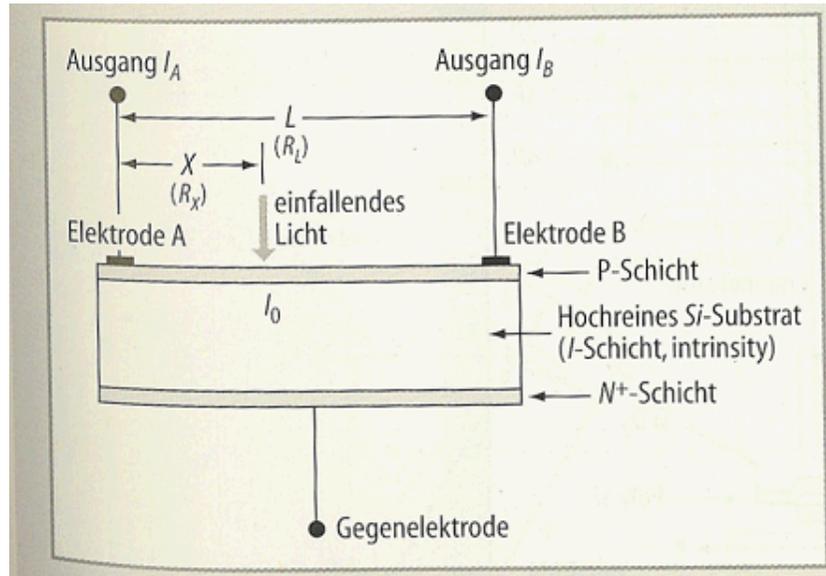
# Lasertriangulationslasersensor



$$d = B \cdot \frac{H \cdot \tan(\alpha) - (x + x_0)}{H + \tan(\alpha) \cdot (x + x_0)}$$



# PSD - Position Sensitive Device



Empfindlichkeit bei 940 nm ca. 0.6 A/Watt

Positionsauflösung:  $\sim 10^{-4}$

Bandbreite: ca. 50 MHz

Größe: 1 x 3 bis 1 x 37 mm<sup>2</sup>

Tiefenauflösung bis zu 1  $\mu$ m

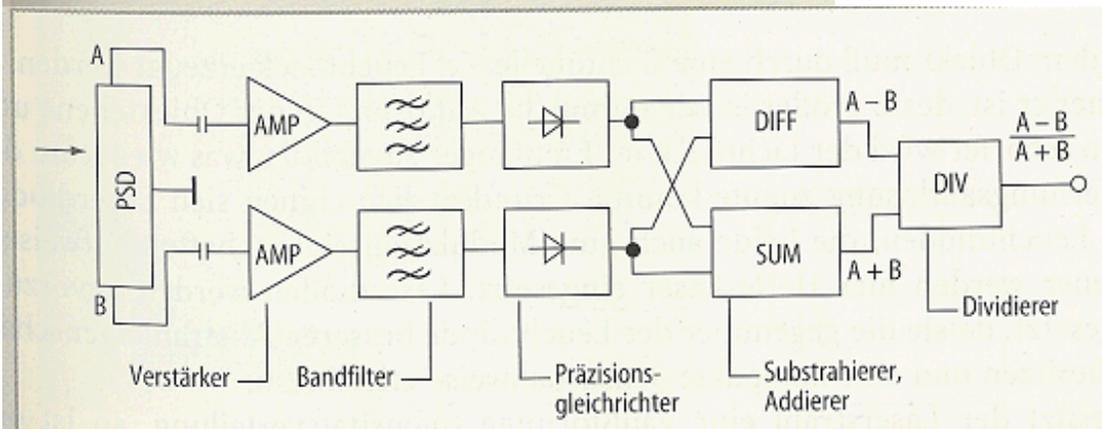


Abb. 10-75 AC-Auswertekonzept für PSD's in Triangulationssensoren

# CCD Chips

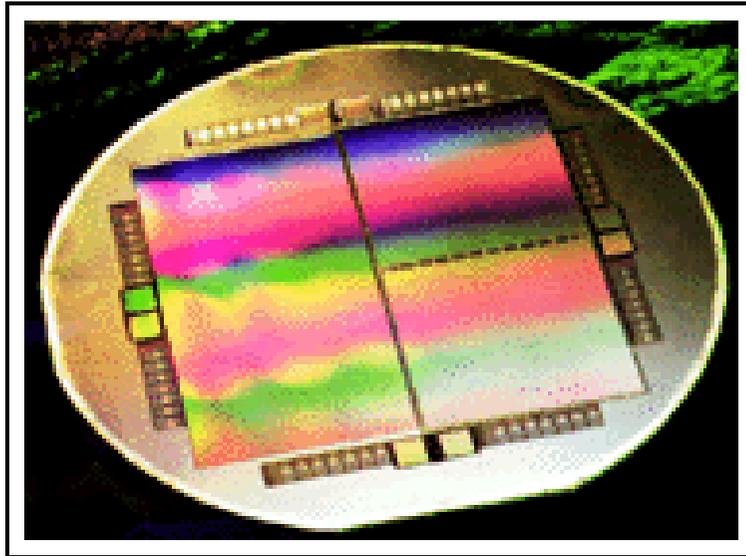
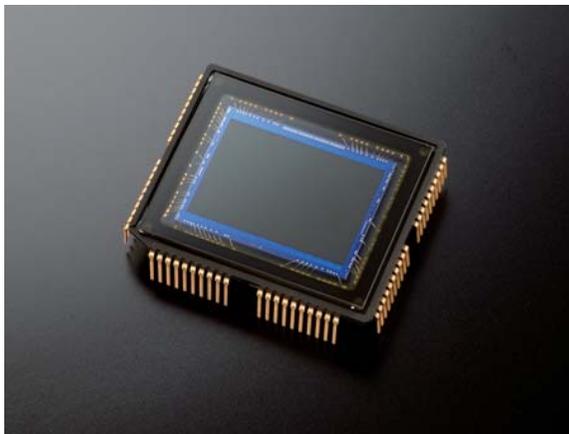


Photo 2. 2Kx4K and 2Kx2K  
CCD Imagers on a Wafer



SCIENCEPHOTOLIBRARY

# CCD

Anatomy of a Charge Coupled Device (CCD)

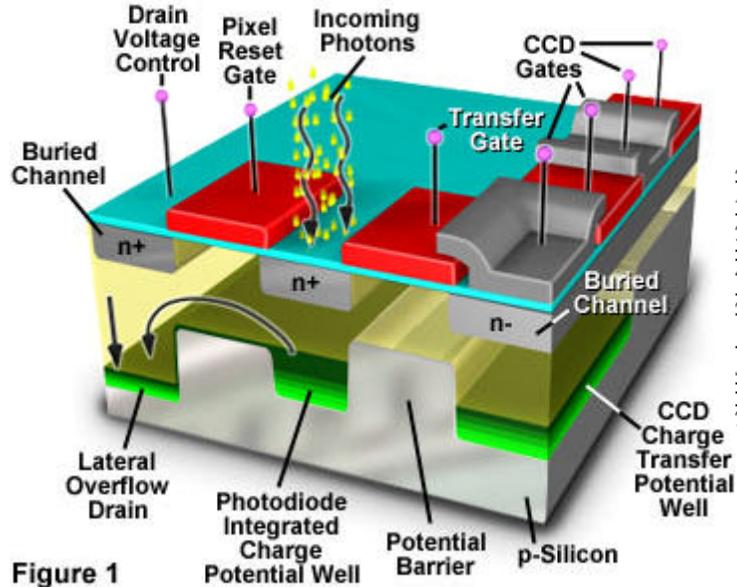


Figure 1

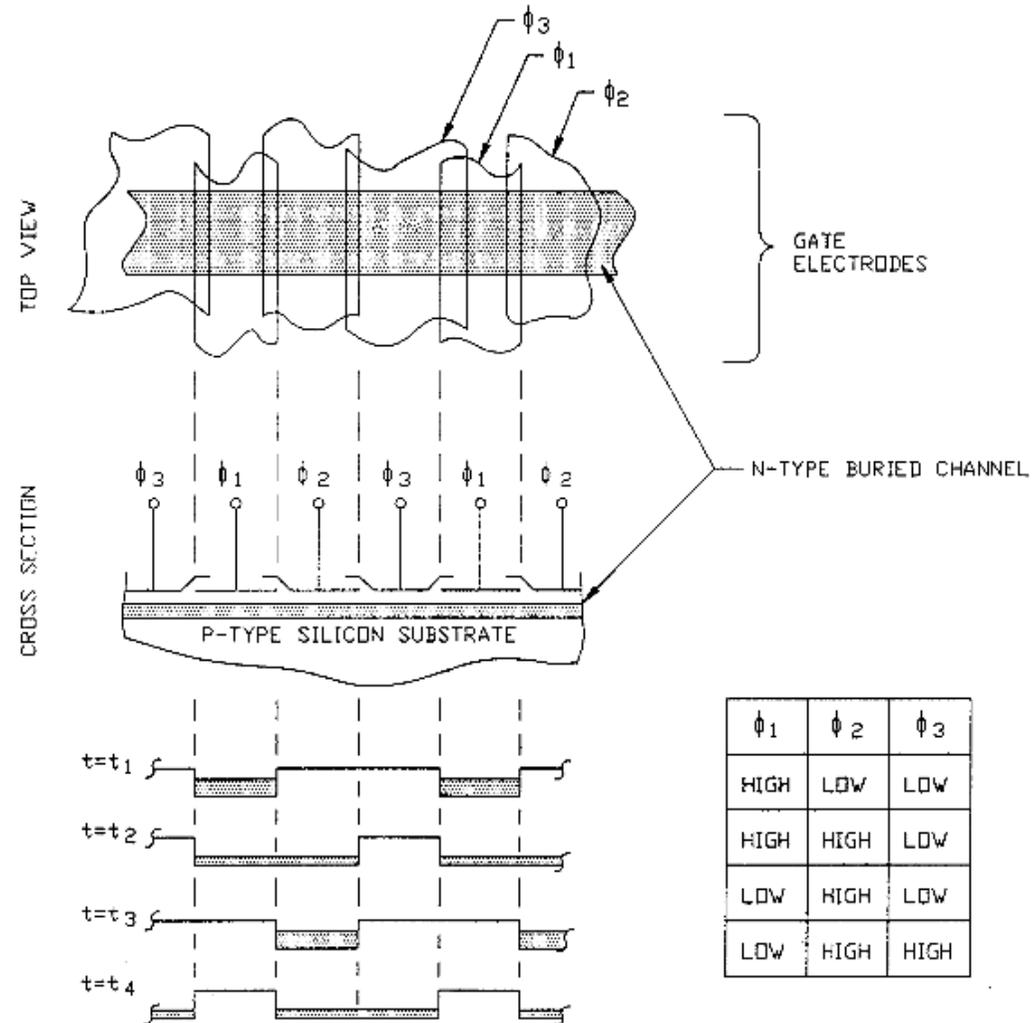
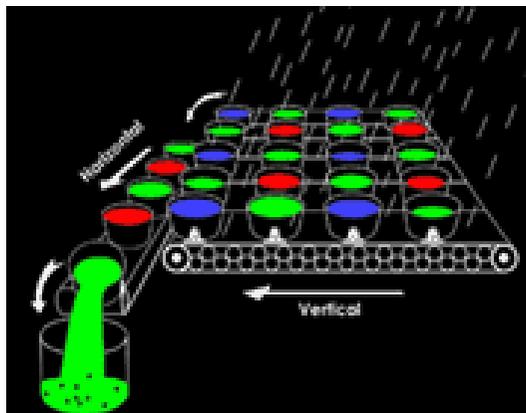


Figure 2. CCD Structure and Operation

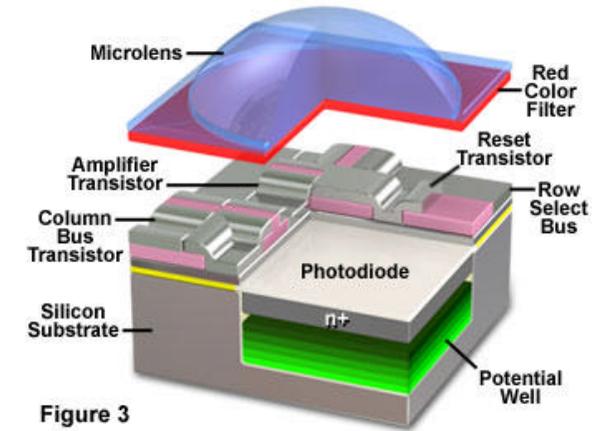
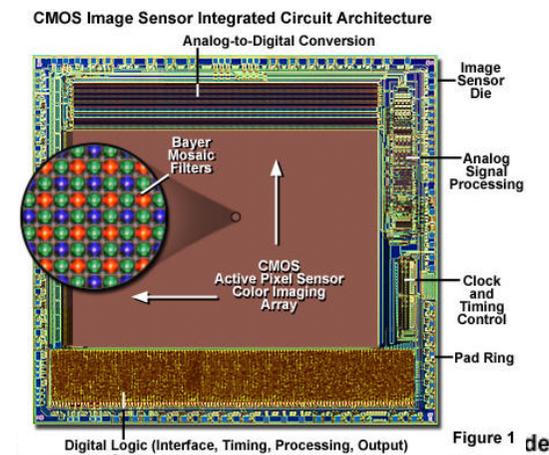
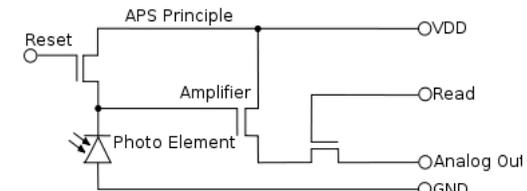
# Vergleich PSD - CCD

	PSD	CCD
Ortsauflösung	++	+
Bandbreite	++	+
Inhomogene Lichtverteilung	-	++
Preis	++	-

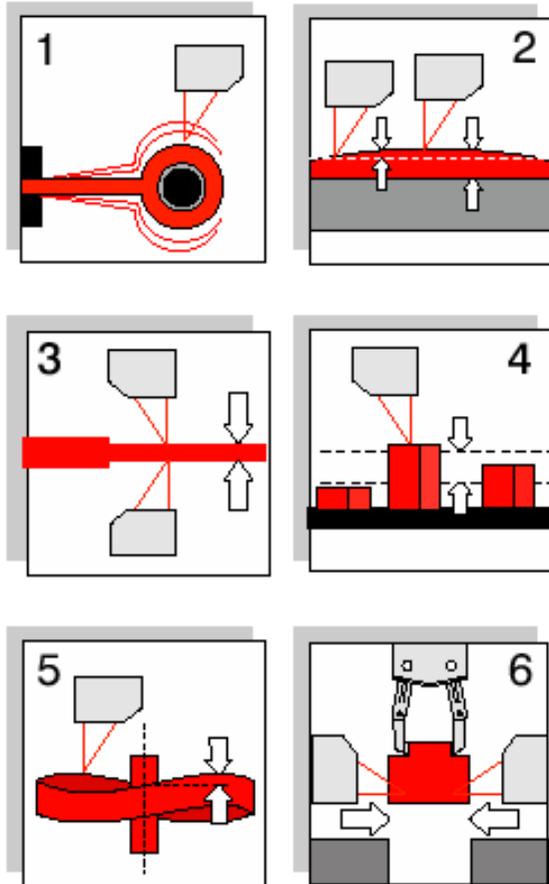
CCD-Systeme arbeiten digital, deshalb können intelligentere Schwerpunktbildung-Algorithmen eingesetzt werden.

# CMOS Bildsensor

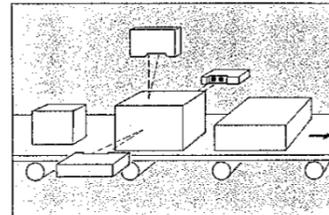
- Photodiode in Sperrrichtung
- MOSFET Verstärker
- Am Beginn des Belichtungsvorgangs wird die Spannung über der Photodiode durch den Reset Transistor auf definierten Wert gesetzt.
- Während der Belichtung wird die Sperrschichtkapazität der Diode durch den Photostrom entladen.
- Vorteile:
  - Geringere Spannung
  - Höhere Bildwiederholrate
- Nachteil:
  - Geringere Flächenausnutzung  
-> Rauschen
  - -> hohe Integrationsdichte nötig



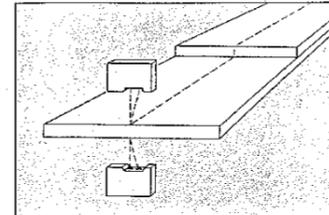
# Anwendungsbeispiele für Triangulationslasersensoren



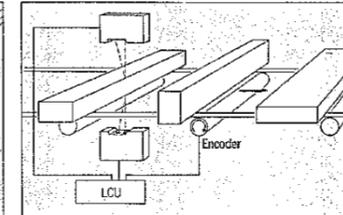
## Anwendungsbeispiele



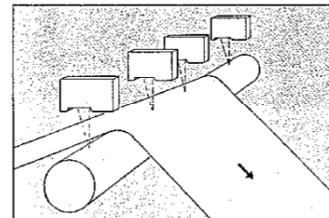
Breite, Höhe, Sortierung, Klassifizierung



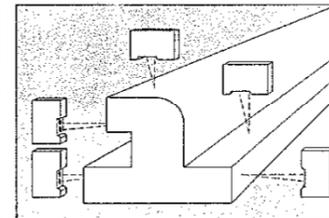
Dicke, Doppellage-Erkennung, Doppelung, Faltung  
Längsprofil



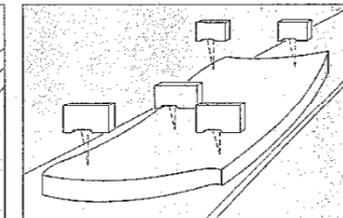
Dicke und Breite



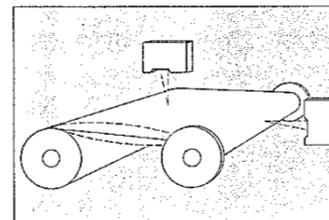
Dickenmessung gegen Rolle, Rollenschlag-  
Kompensation, Erfassung Material-Keilform



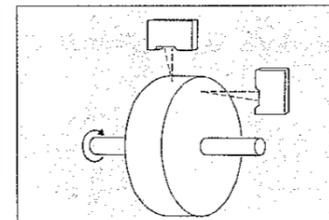
Maßhaltigkeit, Online-Messung nach dem  
Formkaliber



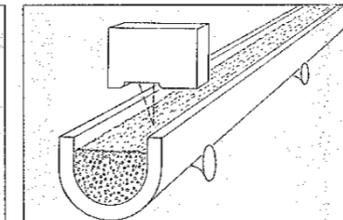
Ebenheit, Planlage, Dicke



Durchhang, Schwingung, Auslenkung,  
Wickelradius

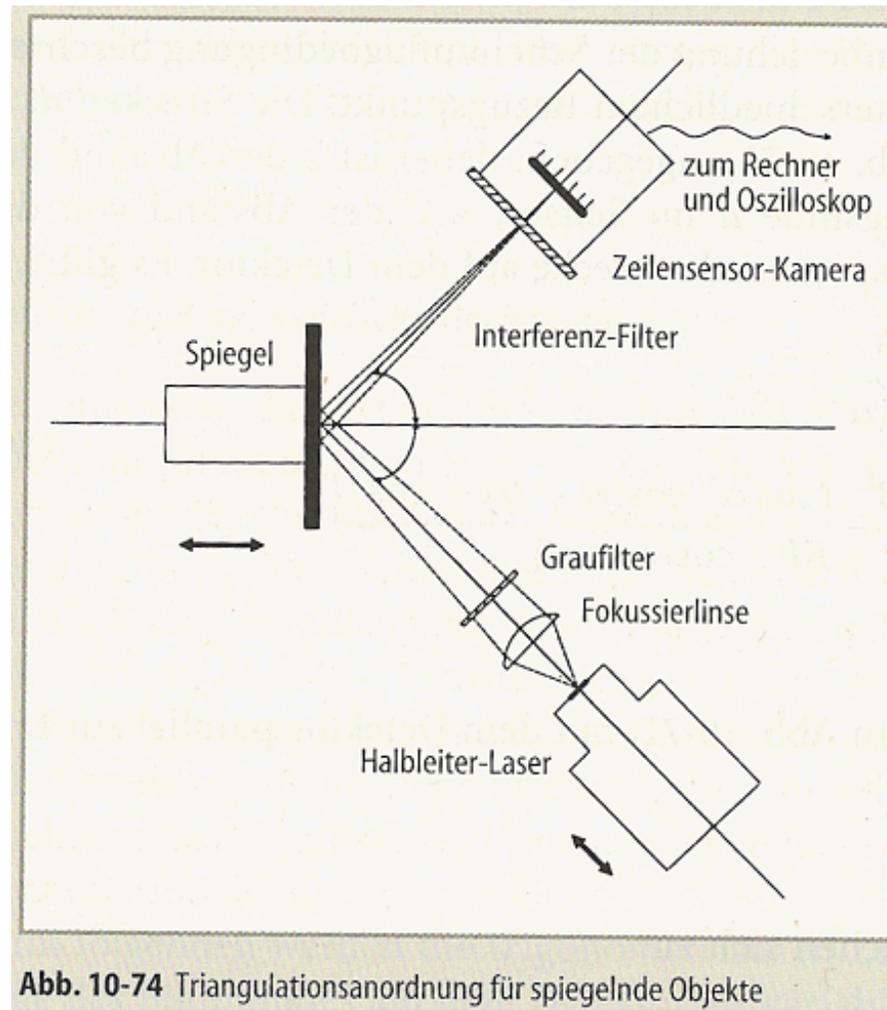


Rundlauf, Schlag, Zentrierung, Ovalität

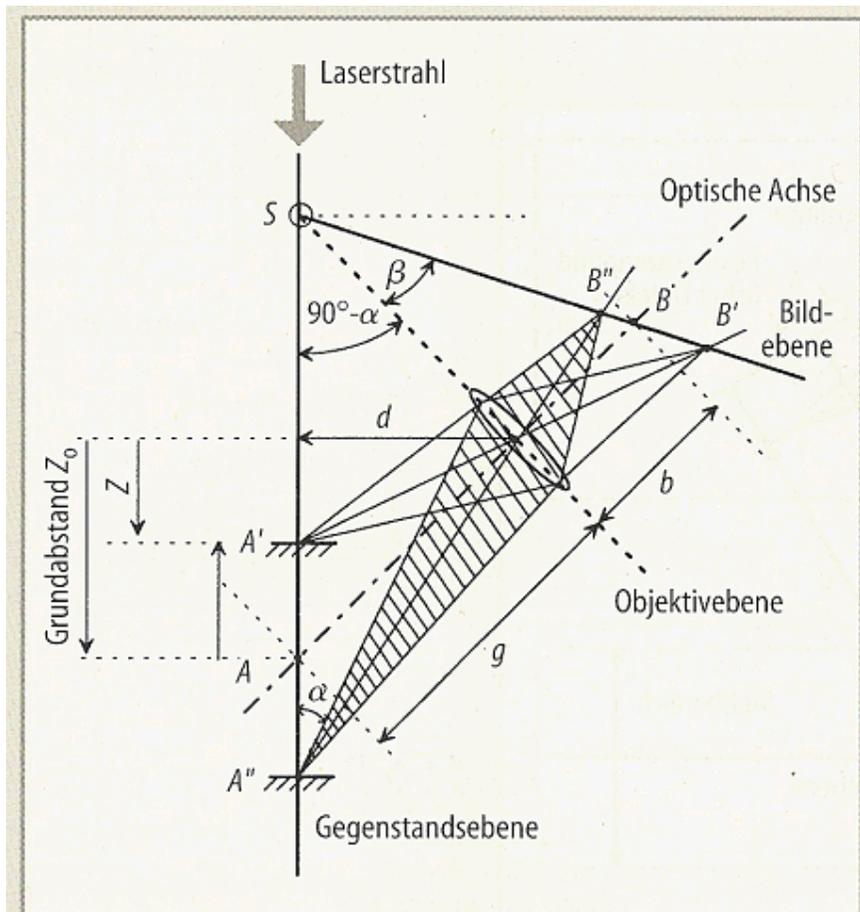


Füllstand, Niveau, Materialmenge, Füllgrad

# Triangulation bei spiegelnden Objekten



# Scheinflugbedingung bei Triangulation



**Abb. 10-73** Schärfenkorrektur durch Verkippen der Bildebene (Scheinflugkorrektur)

Änderung des  
Abbildungsmaßstabes  
bei Abstandsvariation

$$\text{Abbildungsgleichung: } \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

# Wackelbild

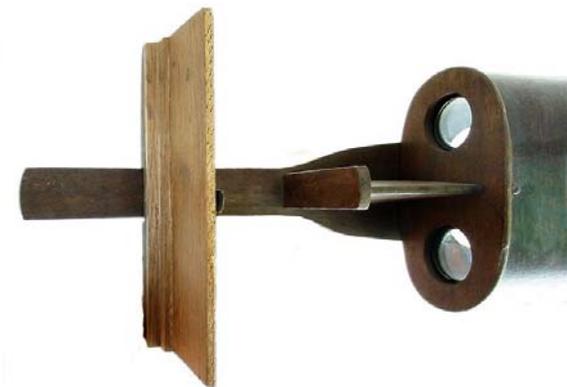


# Historische Stereo Kameras



Kamerwerk  
Dresden 50er  
Jahre

Nimslo USA  
1980



Stereo Bild betrachter Wien 1915

# Rangefinder

## ■ Stereoskopie (3D-Triangulation)

Parameter	Wert
Messbereich	1...25m
Messgenauigkeit (geschätzt)	+/- 0.1...1m
Messzeit	10 – 100ms
Preis	500...20000€



Quelle:  
Sony

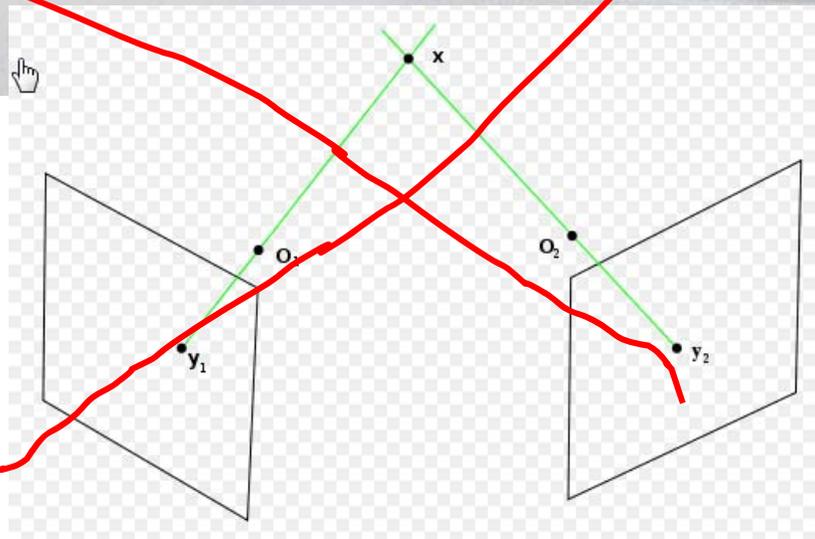
## ■ PMD-Kamera (3D)

Parameter	Wert
Messbereich	0.3...7m
Messgenauigkeit (schaltbar)	+/- 3mm
Messzeit	25ms
Preis	> 1000€



Quelle:  
PMDTec

# Keine Triangulation in der Kinect



# Abstandsmessung mit Laserpulsen

Laserpulse: 1 ns – 20ps

Leistung: ~ 100 Watt

Auflösung: ~ cm

$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \Rightarrow$

Zeitaufösung: ~ 20 – 100 ps

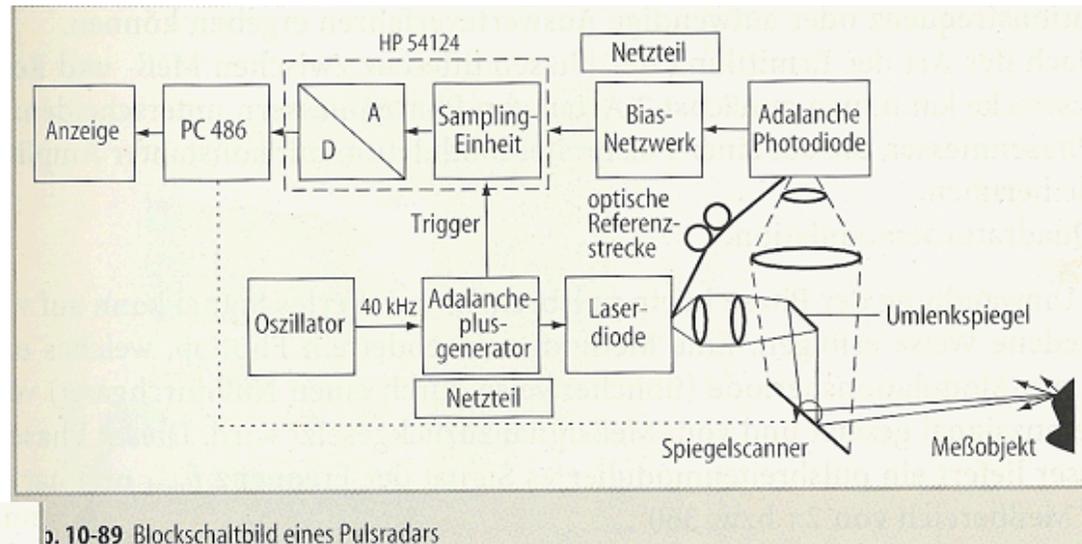


Abb. 10-89 Blockschaltbild eines Pulsradars

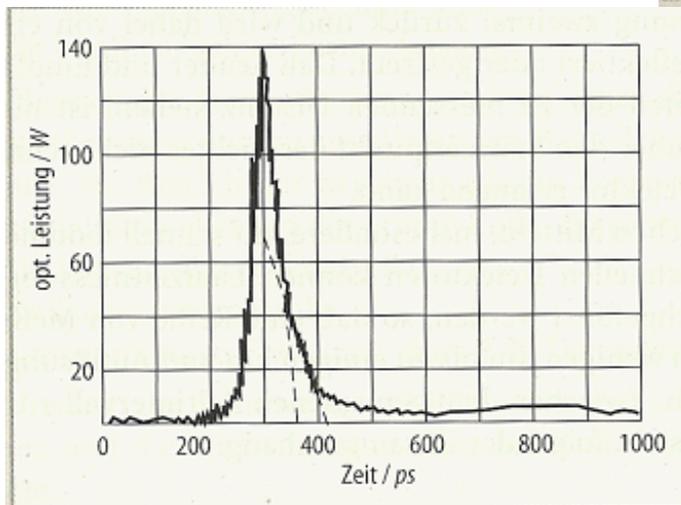
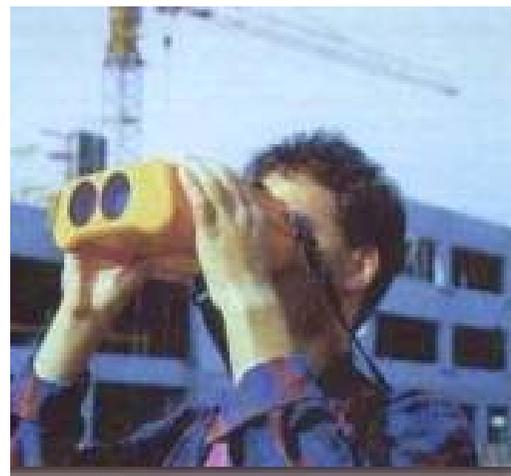
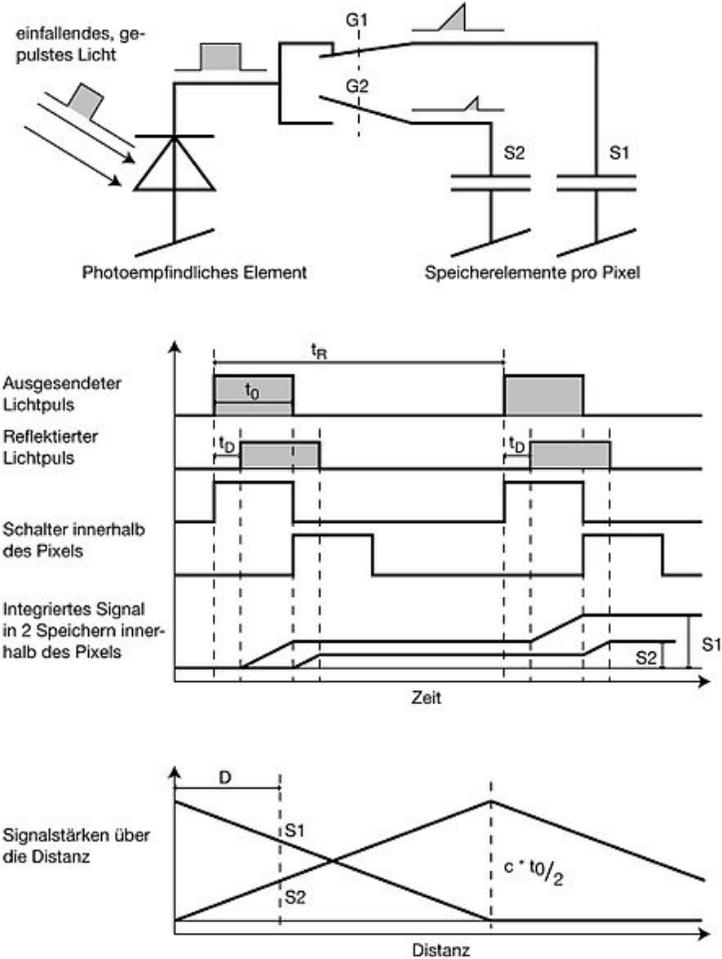


Abb. 10-88 Laserpuls einer Einzelchip-Laserdiode, Pulsbreite ca. 30 ns



# TOF Kameras



Jedes Pixel hat einen schnellen Schalter zwischen zwei Kondensatoren

Sehr starke gepulste Beleuchtung

# 3D Bild TOF Kamera



# Laserradar

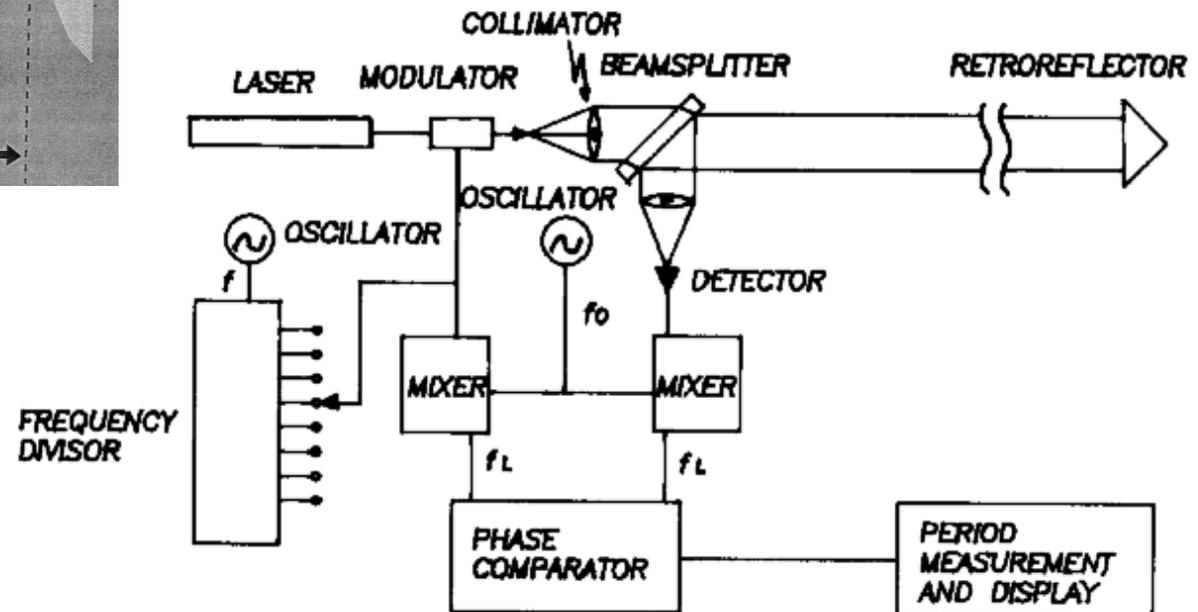
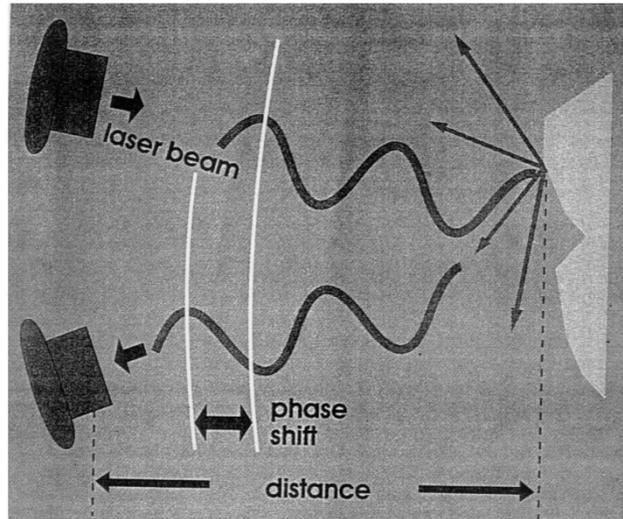


FIGURE 4 A wave modulation distance meter.

# Systemüberblick – Phasenmessprinzip

## ■ Phasenverschiebung

$$\Delta\varphi = 2\pi \left( f \cdot \frac{2D}{c} + n \right)$$

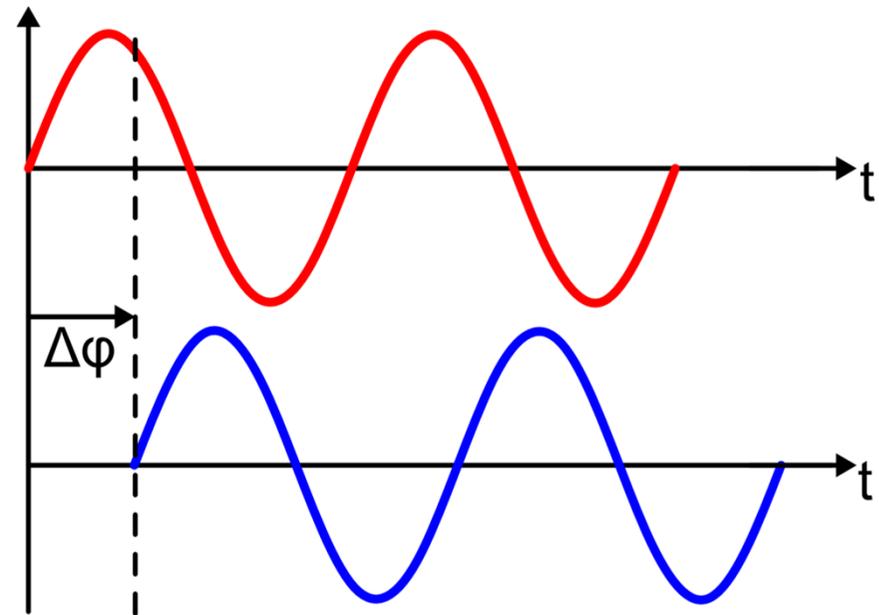
## ■ Eindeutigkeitsbereich

$$D_{\max} = \frac{c}{2f}$$

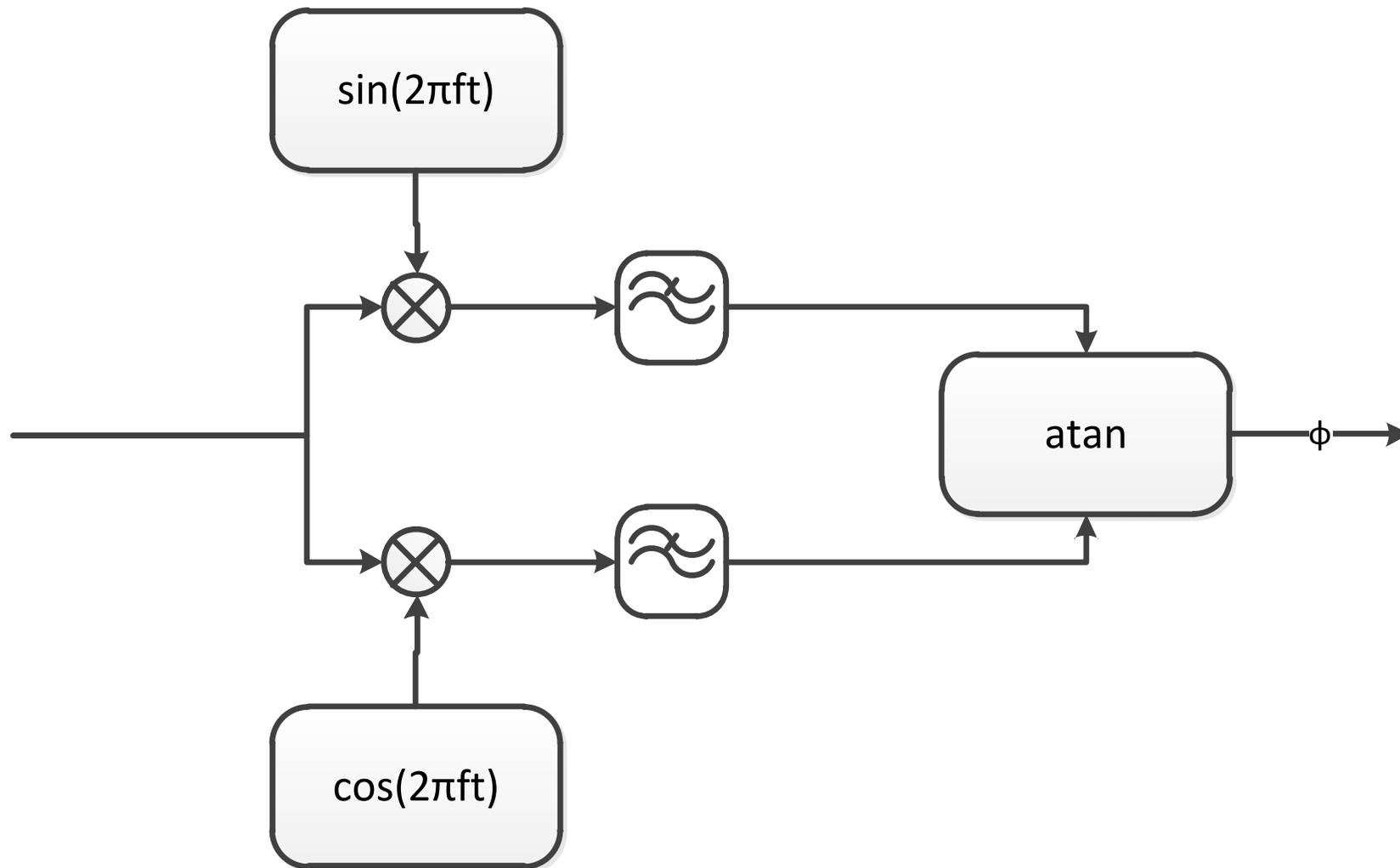
$$f_1 = 5\text{MHz} \rightarrow D_{\max} = 30\text{m}; \quad f_2 = 100\text{MHz} \rightarrow D_{\max} = 1.5\text{m}$$

## ■ Phasenauflösung

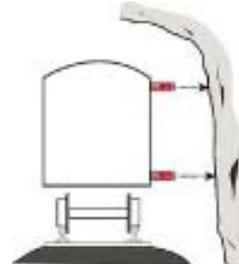
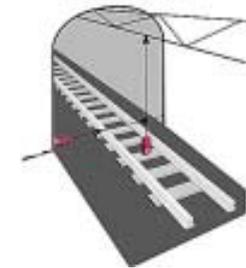
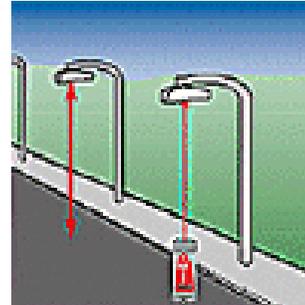
$$d\varphi = 2\pi \cdot \frac{dD}{D_{\max}} = 2\pi \cdot \frac{2\text{cm}}{30\text{m}} = 2\pi \cdot \frac{1\text{mm}}{1.5\text{m}} \cong 4\text{mrad}$$



# Messprinzip – IQ-Demodulator

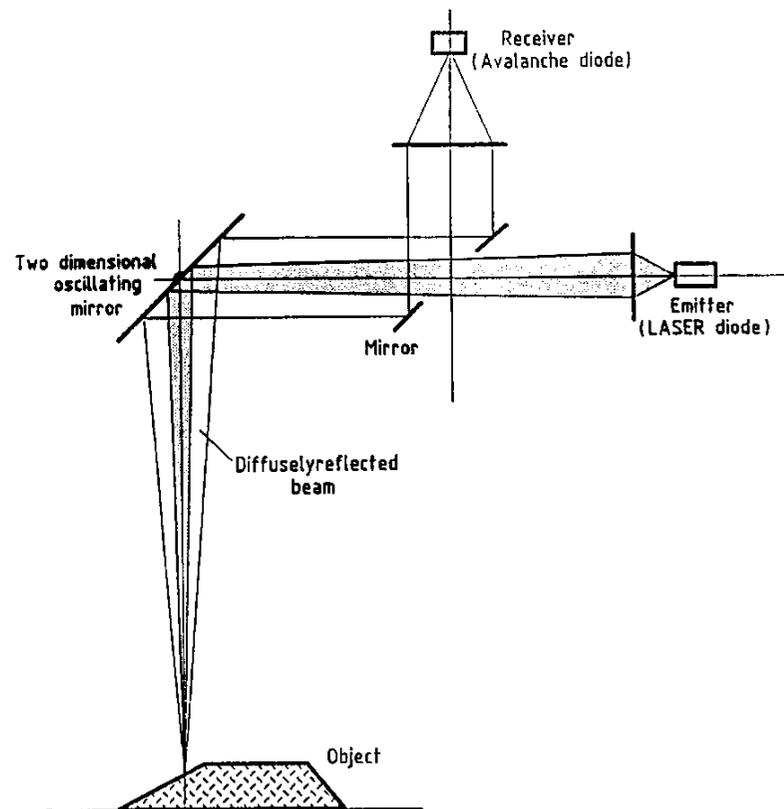


# Laserradar

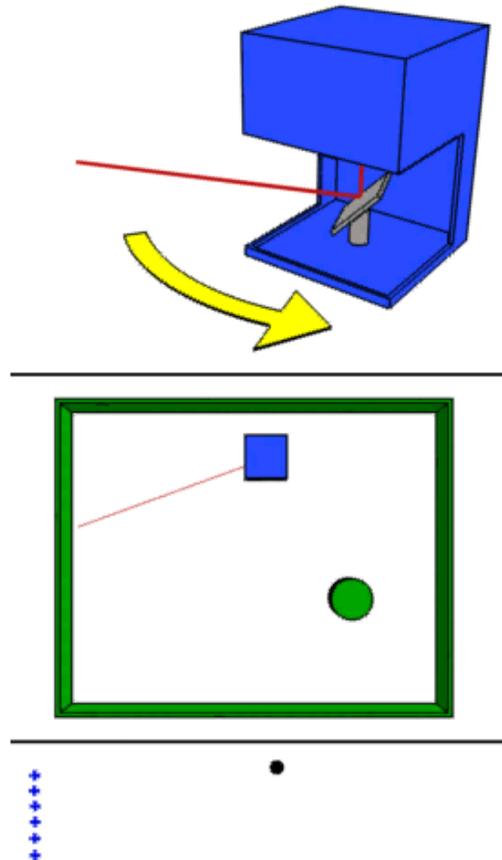


*Automatische Deformationsmessungen in einem Tunnel*

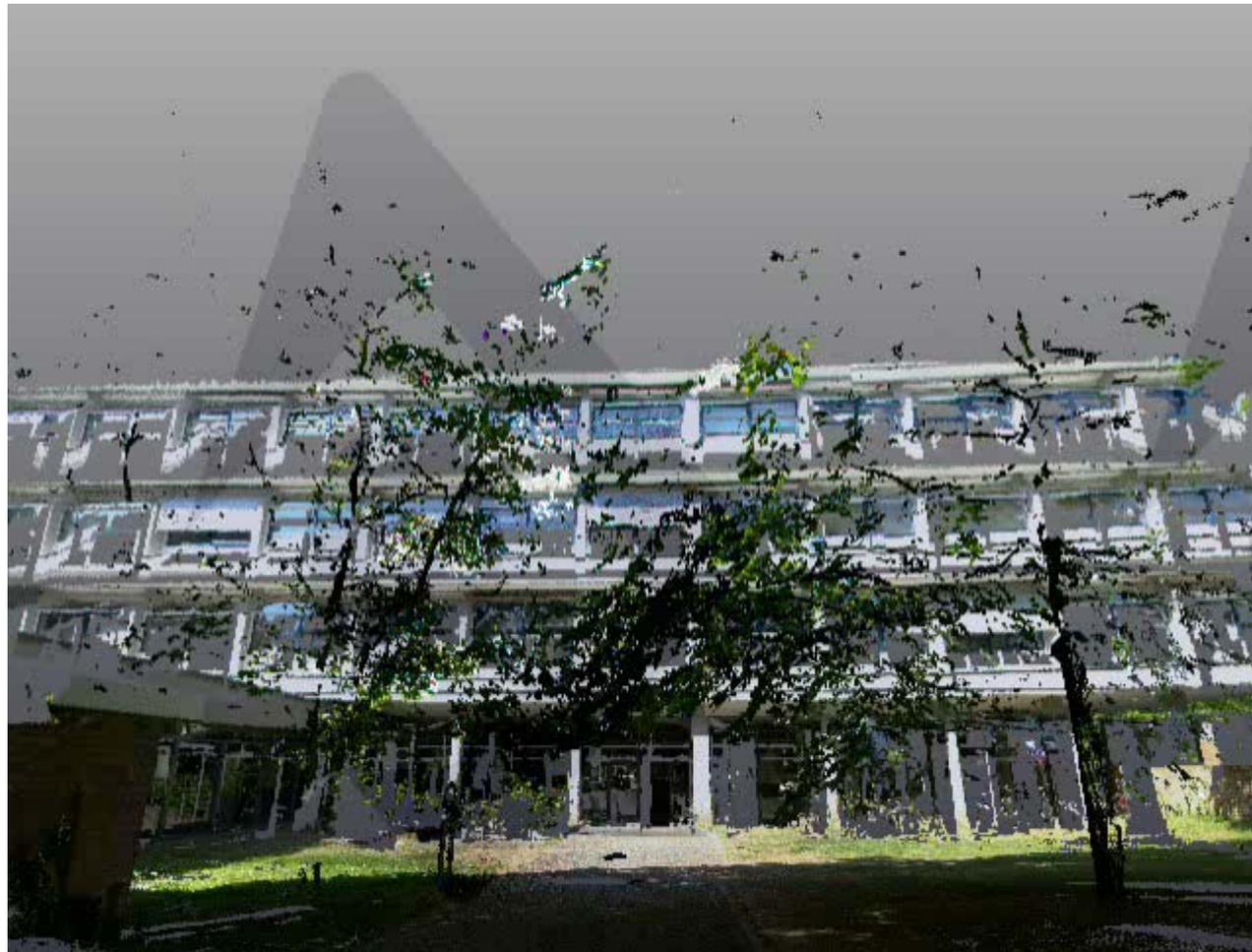
# Laserradar mit Feld für 3D Messung



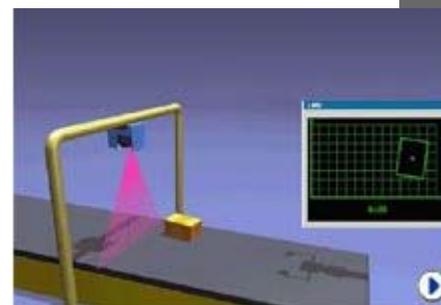
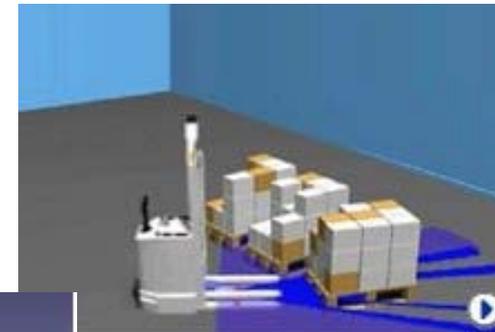
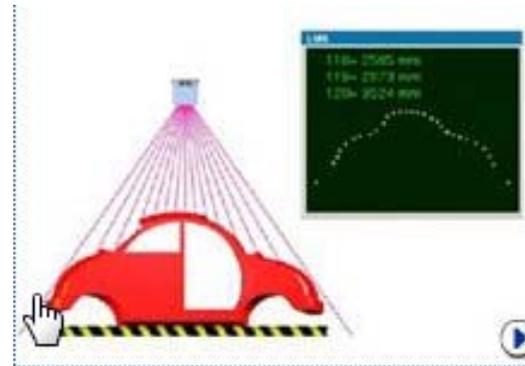
# Laserradar mit Drehspiegel



# Faro 3D Scanner mit ITIV Signalverarbeitung



# Sick Laser Scanner

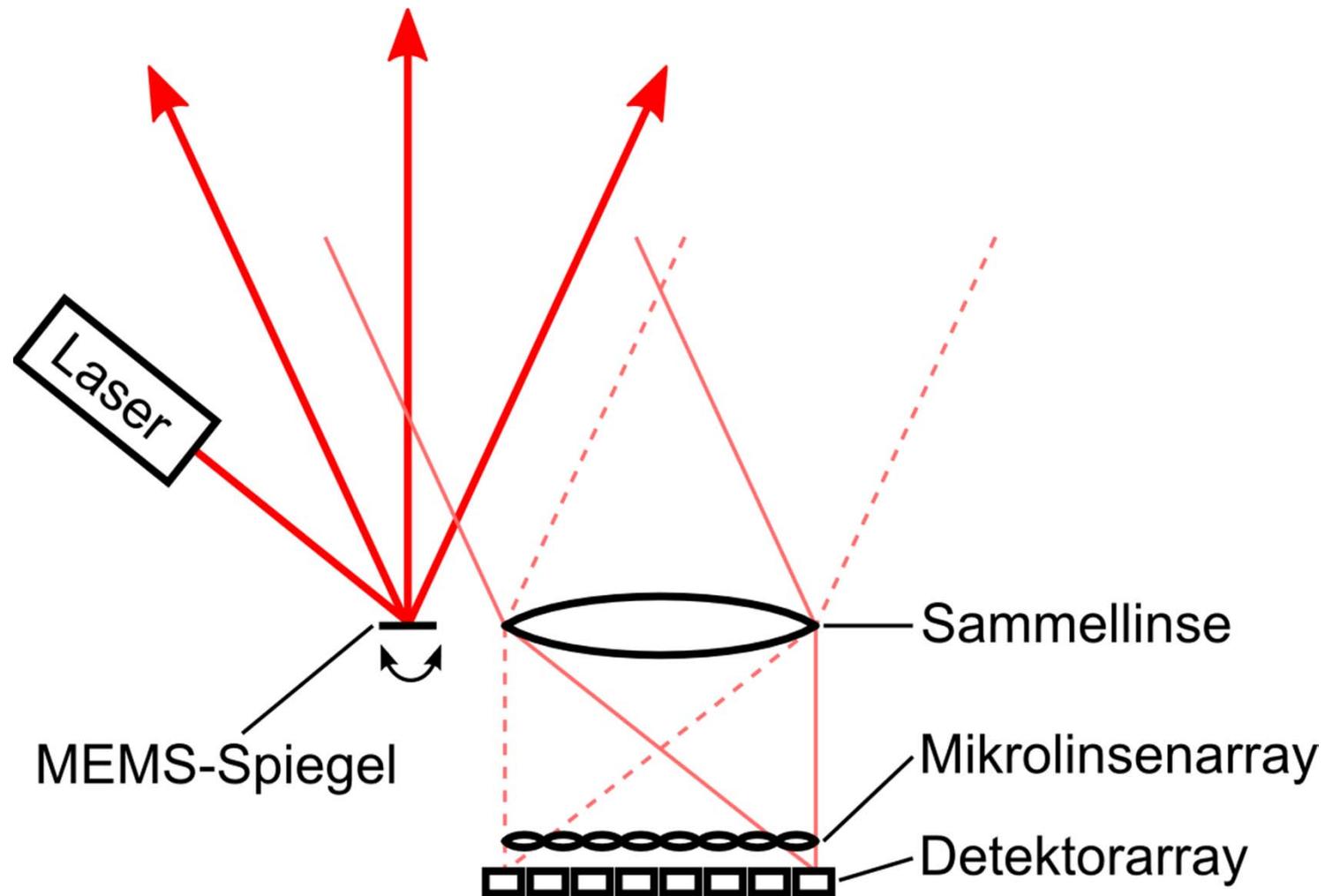


# Fahrerlose Transportsysteme

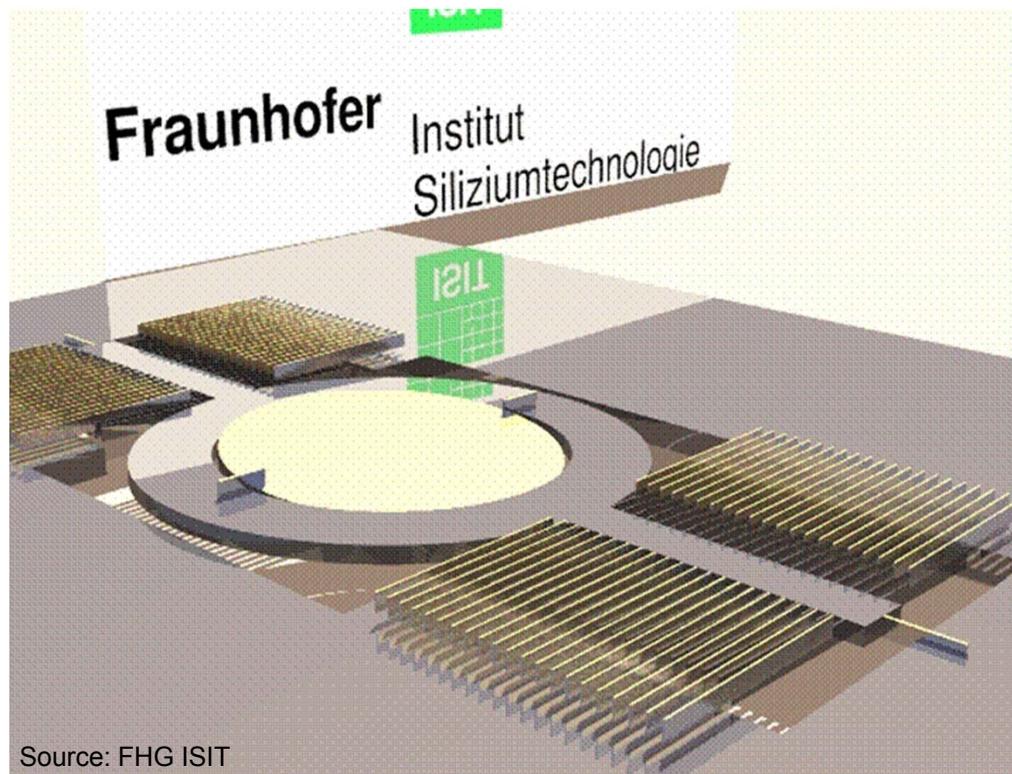




# Systemüberblick – Optischer Aufbau Sari



# Stand der Technik – Scannende MEMS Mikrospiegel

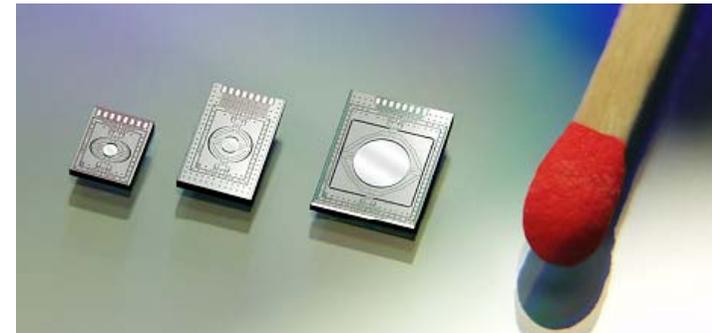
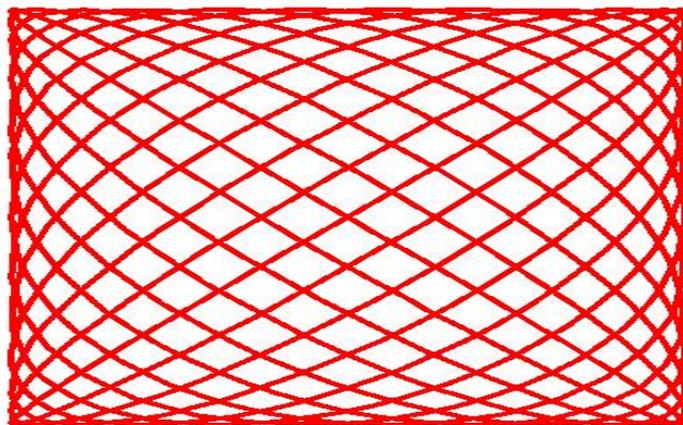


- 2-Achsen Scan
- $f_{\text{res}} \approx 20 \text{ kHz}$
- Spiegelgröße:  $\varnothing \approx 1 \text{ mm}$
- Hohe Stoßfestigkeit ( $> 2000g$ )
- Electro-statisches Antriebsprinzip

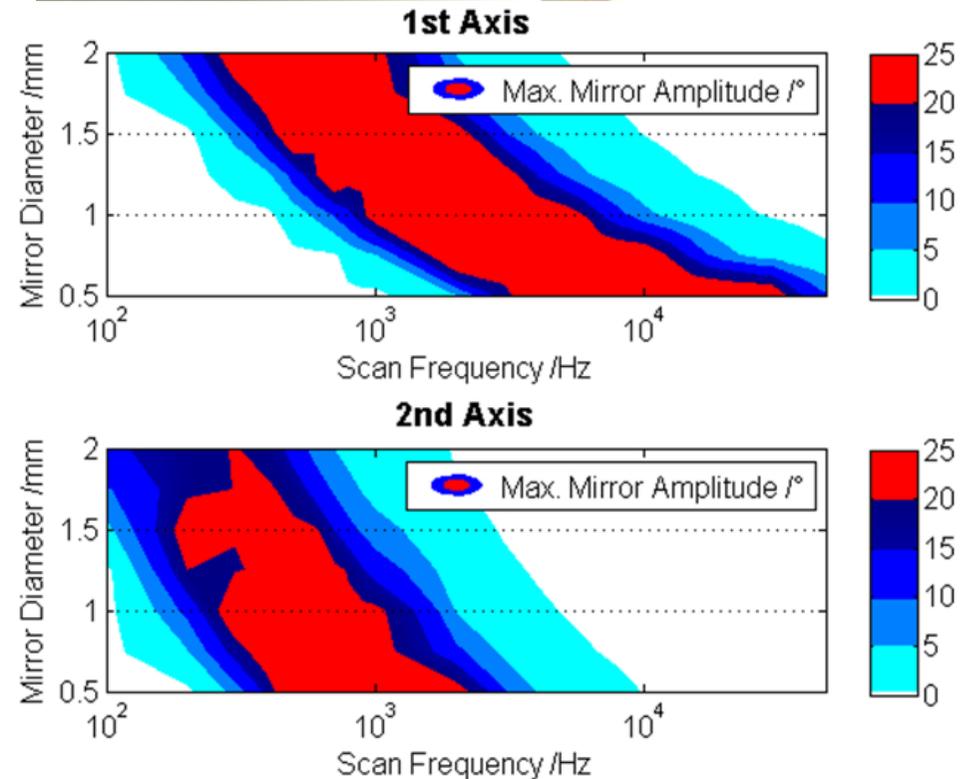
# Stand der Technik – Elektrostatische Mikrospiegel

Parameter	Wertbereich
Spannung	0...100V
Resonanzfrequenz	0.1...40kHz
Max. Auslenkwinkel	+/-60°
Durchmesser	0.5...3mm

- Resonanzfrequenzen voneinander abhängig

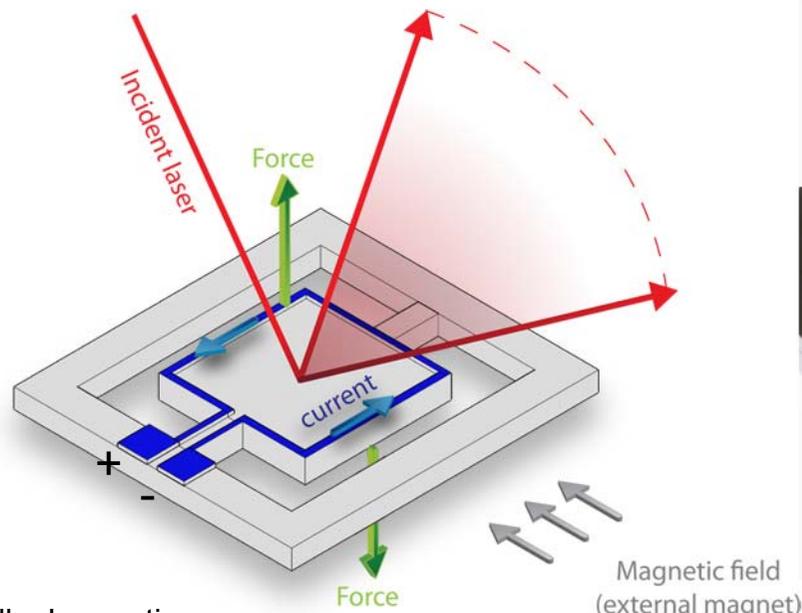
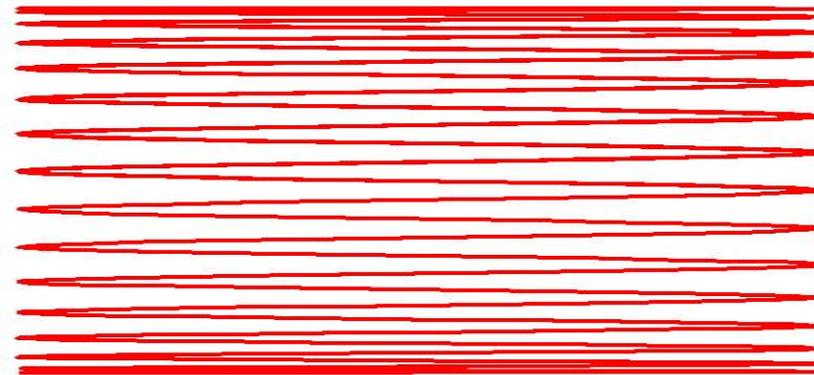


Quelle:  
Fraunhofer  
IPMS

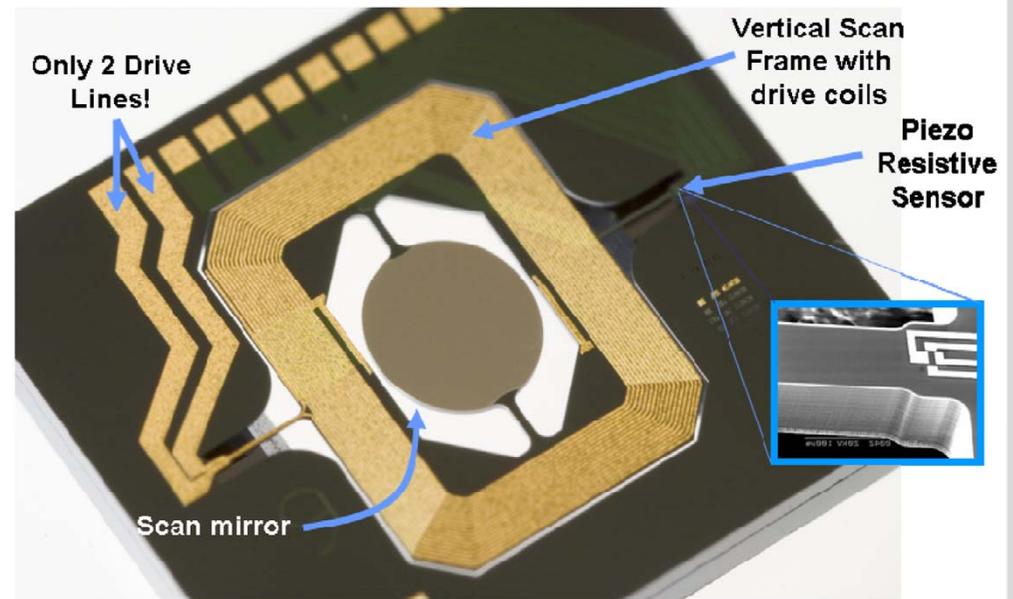


# Stand der Technik – Elektrodynamische Mikrospiegel

Parameter	Wertbereich
Spannung	0...5V
Resonanzfrequenz	1...25kHz
Max. Auslenkwinkel	+/-17.5°
Durchmesser (typ.)	1mm



Quelle: Lemoptix



Quelle: Microvision

# Stand der Technik – Mikrospiegel im Vergleich



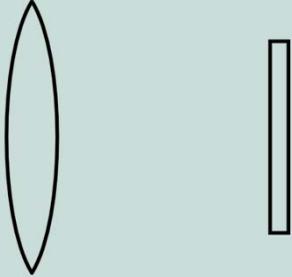
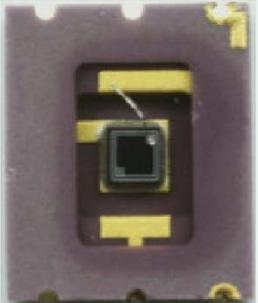
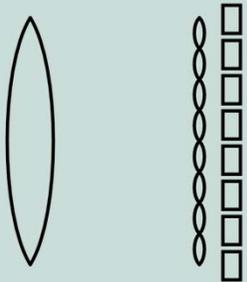
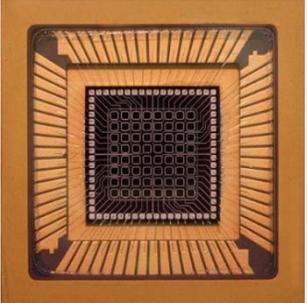
Source: Microvision, Inc.



Source: FHG IPMS

	Elektro-dynamisch		Elektro-statisch	
Anregung	Elektro-magnetisch		Elektro-statisch	
2-Achsen-Scan	Ja (noch nicht erhältlich)	-	Ja	+
Scanwinkel	+/- 17.5°	-	+/- 60°	+
Anz. Hersteller	2 (Vertrieb nur 1)	-	> 5	+
Spannung	0...5V	+	0...100V	-
Scantrajektorie	Zeilenscan	+	Lissajous-Figur	-

# Mögliche Detektor-Konzepte

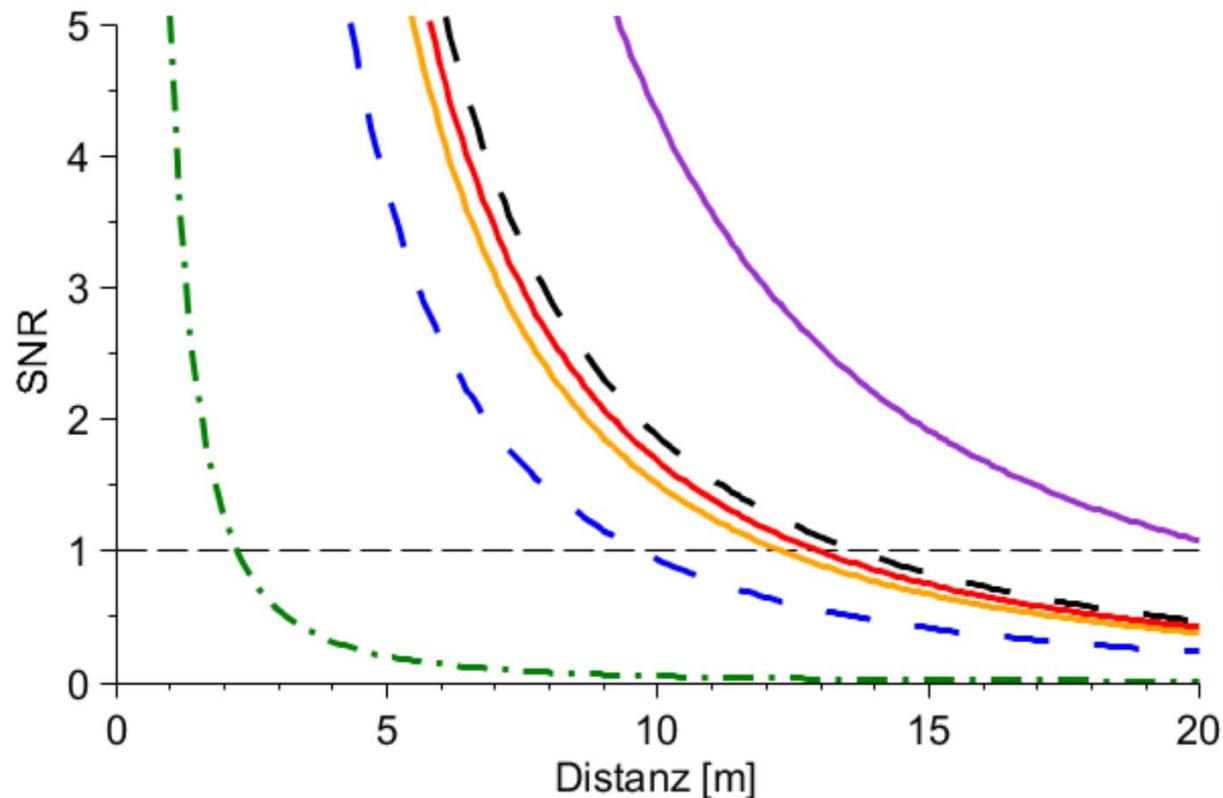
Detektorkonzept	Aufbau	Verwendeter Detektor
1. Einzeldetektor		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avalanche Photodiode                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Akt. Fl.: <math>\varnothing = 3\text{mm}</math></li> <li>• <math>f_{\text{Cutoff}} = 80\text{ MHz}</math></li> <li>• <math>\text{NEP} \approx 0.4\text{pW/Hz}^{1/2}</math></li> </ul> </li> </ul> 
2. Insektenauge		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Array aus PIN-PD                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Akt. Fl.: <math>1 \times 1\text{mm}</math></li> <li>• <math>f_{\text{Cutoff}} = 350\text{ MHz}</math></li> <li>• <math>\text{NEP} \approx 0.35\mu\text{W/Hz}^{1/2}</math></li> </ul> </li> </ul> 
3. Hybrid		<ul style="list-style-type: none"> <li>• APD-Array (8x8)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Akt. Fl.: <math>200 \times 200\mu\text{m}</math></li> <li>• <math>f_{\text{Cutoff}} = 175\text{ MHz}</math></li> <li>• <math>\text{NEP} \approx 0.3\text{pW/Hz}^{1/2}</math></li> </ul> </li> </ul> 

# SNR-Abschätzung – Detektorrauschen

Parameter	Wert
Laserleistung $P_S$	300mW
Reflexionsgrad $\rho_{Fl}$	10%
Anzahl Detektoren (Hybrid)	9x9

$$P_R = \frac{\rho_{Fl} d_L^2}{4D^2} \cdot P_S$$

$$\text{SNR}_{\text{det}} = \frac{P_R}{NEP}$$

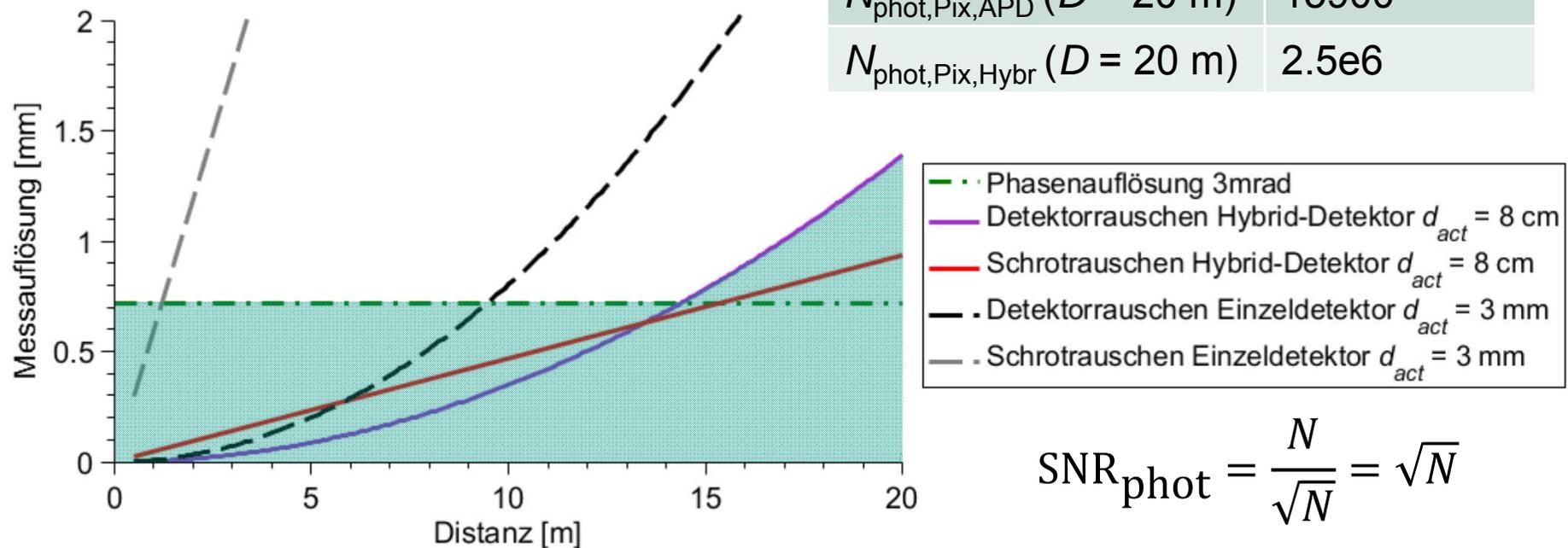


- Hybrid mit PIN,  $d_L = 5 \text{ cm}$
- Hybrid mit PIN,  $d_L = 8 \text{ cm}$
- Hybrid mit APD,  $d_L = 4 \text{ mm}$
- - Einzeldetektor  $d_{act} = 1.5 \text{ mm}$
- - Einzeldetektor  $d_{act} = 3 \text{ mm}$
- · Insektenauge  $d_{ML} = 8 \text{ mm}$

# Erreichbare Messauflösung – Schrotrauschen

- Einzeldetektor durch Schrotrauschen begrenzt
- Hybrid-Detektor durch Detektorrauschen begrenzt

Parameter	Wert
Auflösung (Pixel)	100x100
$f_{fast}$	1 kHz
$f_{slow}$	30 Hz
$T_{Pix}$	1.5 $\mu$ s
$N_{phot, Pix, APD} (D = 20 \text{ m})$	15900
$N_{phot, Pix, Hybr} (D = 20 \text{ m})$	2.5e6



$$SNR_{phot} = \frac{N}{\sqrt{N}} = \sqrt{N}$$