

# Grundlagen der Robotik

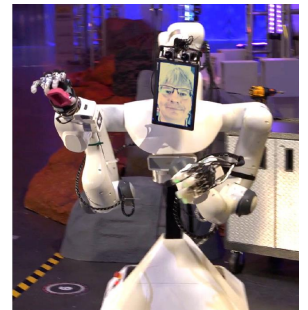
## 2. Sensoren

**Prof. Sven Behnke**



# Letzte Vorlesung

- Industrie-Roboter
- Neue Einsatzbereiche
- Asimov: Roboter-Gesetze
- Trends in der Robotik-Forschung
- Bestandteile von Robotern
  - Sensoren
  - Aktuatoren
  - Steuerung
- Beispielsysteme aus AIS-Arbeitsgruppe



# Ultraschall-Abstandssensoren

## ■ Funktionsprinzip

- Akustischer Ping wird erzeugt ( $> 20 \text{ kHz}$ )
- Reflektion durch Objekte
- Laufzeit ermöglicht bei bekannter Schallgeschwindigkeit Berechnung der Entfernung



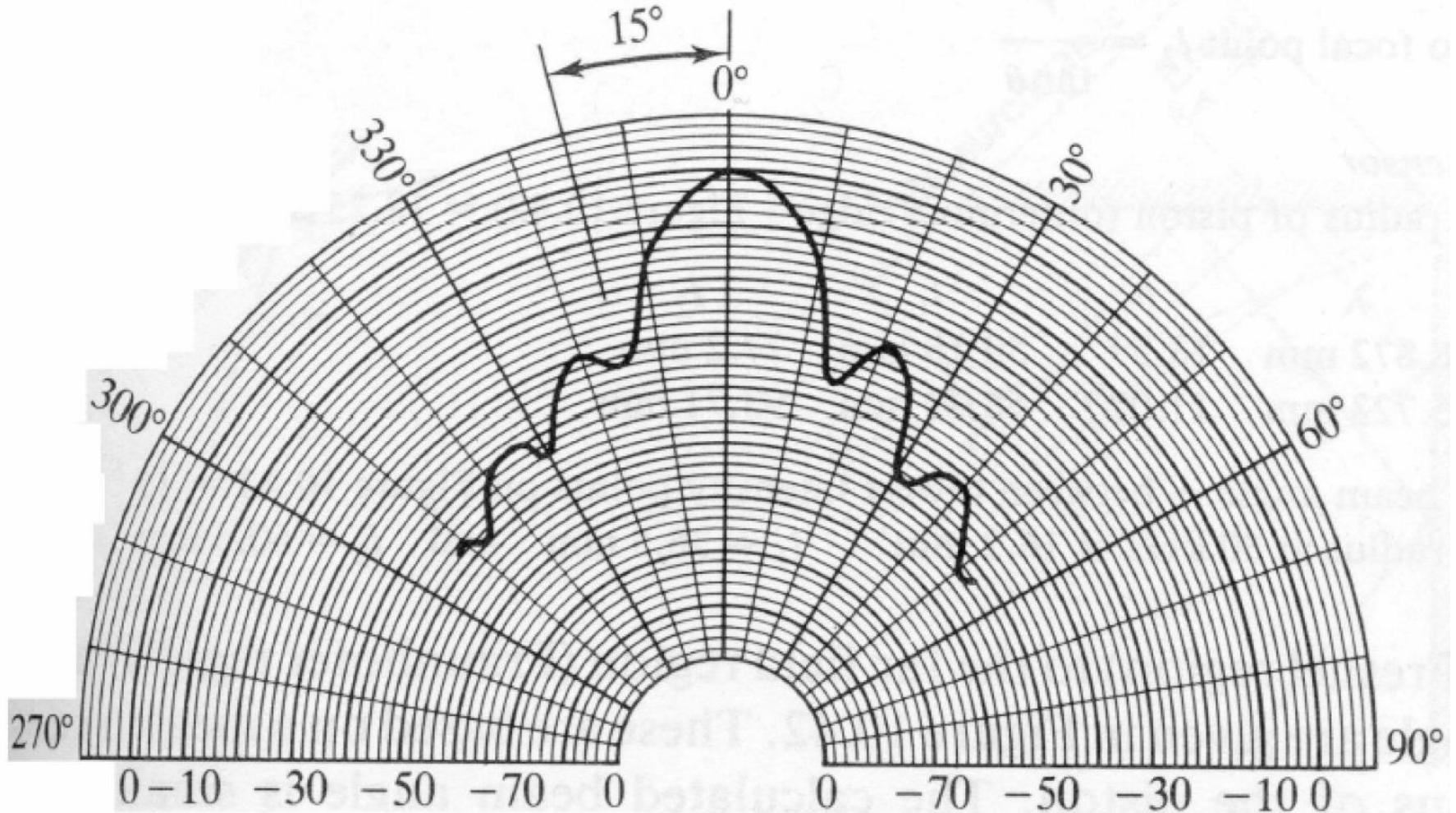
## ■ Anwendungen:

- Abstandsmessung
- Hindernisvermeidung (kurze Reichweite)
- Kartierung der Umgebung (lange Reichweite)

## ■ Eigenschaften:

- Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt vom Medium ab
- Temperaturabhängigkeit (Luft bei  $0^\circ\text{C}$   $330 \text{ m/s}$ ; bei  $20^\circ\text{C}$   $343 \text{ m/sec}$ ; bei  $40^\circ\text{C}$   $355 \text{ m/s}$ )  $\Rightarrow$  Kalibrierung!
- Schallwellen können auch im Objekt propagiert und vom Sender weg reflektiert werden
- Maximale und minimale Messdistanz

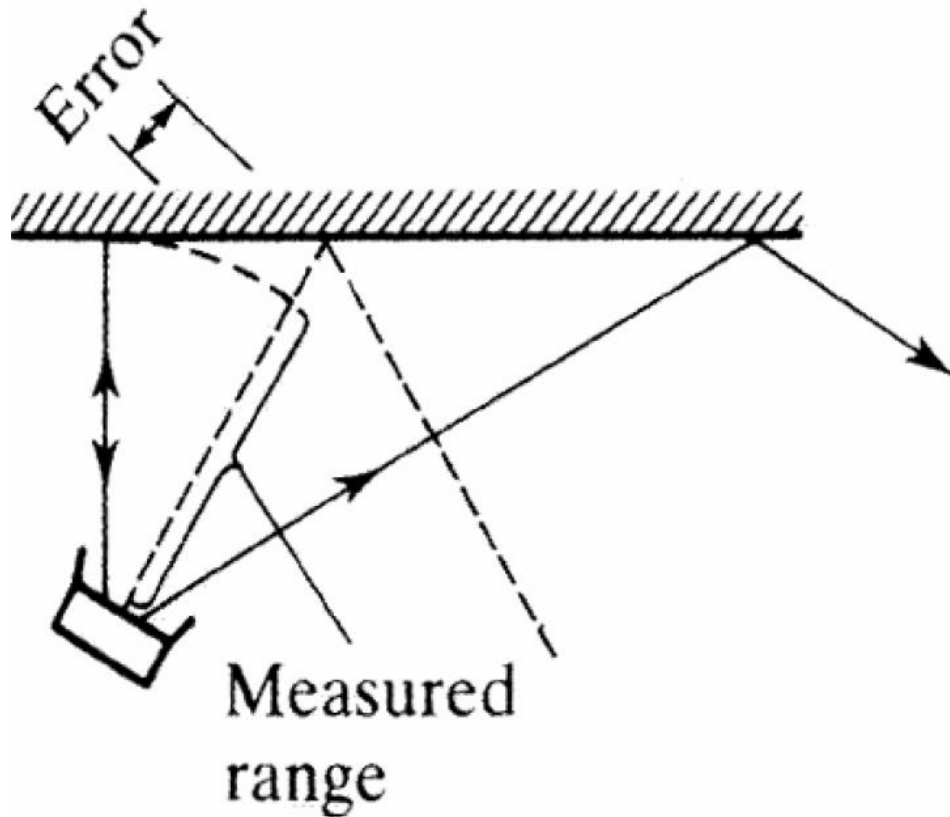
# Ultraschall Detektionskegel



# Ultraschall-Eigenschaften

- Echo ist umso besser, je größer die dem Sensor zugewandte Oberfläche ist
- Große, raue Objekte werden gut erkannt (Unebenheiten sind größer als die Wellenlänge)
- Auch optisch transparente Materialien können erkannt werden, z.B. Fenster (Vorteil gegenüber optischer Hinderniserkennung)
- Kleine Objekte reflektieren zu geringe Anteile des Signals
- Objekte mit glatten Oberflächen können das Signal in viele Richtungen streuen und daher unsichtbar sein
- Je kleiner die Wellenlänge (je höher die Frequenz) desto besser werden glatte Objekte erkannt

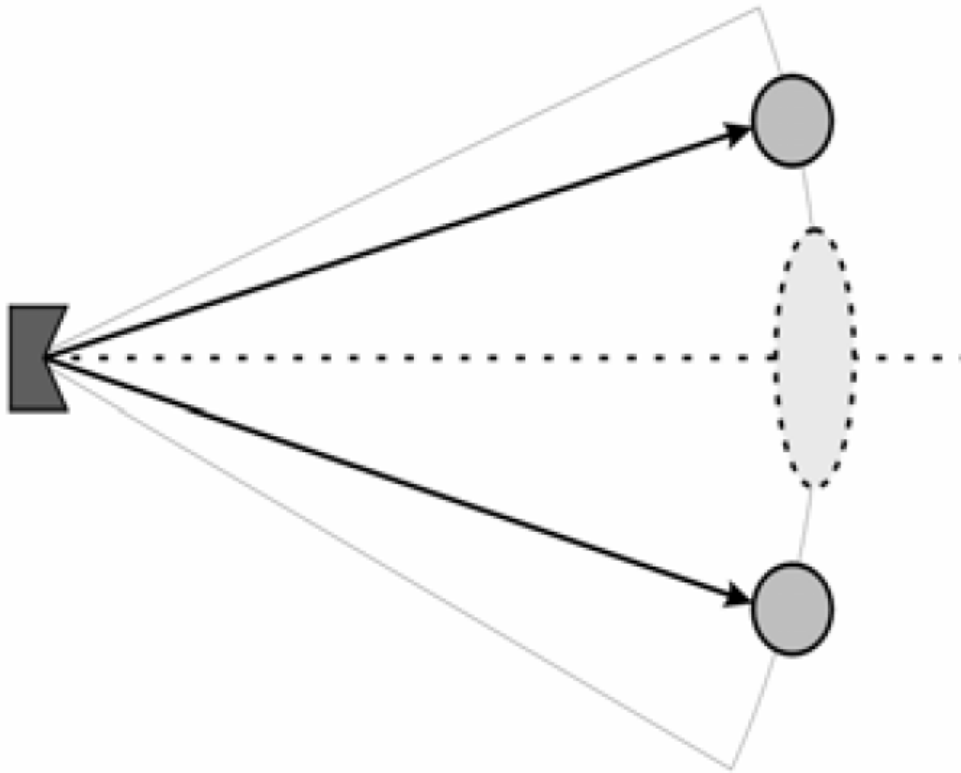
# Problem: Kurzsichtigkeit



- Bei diagonalem Auftreffen auf eine Fläche entstehen unterschiedliche Laufzeiten
- Da kürzeste Laufzeit gemessen wird, erscheinen diagonale Flächen näher als sie im Zentrum sind
- Je breiter der Schallkegel, desto größer der mögliche Fehler



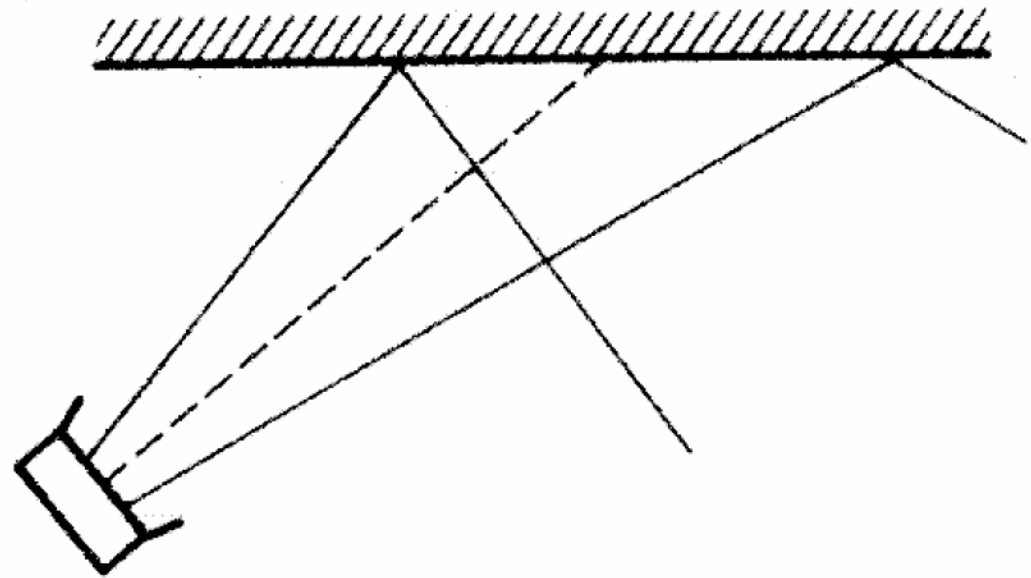
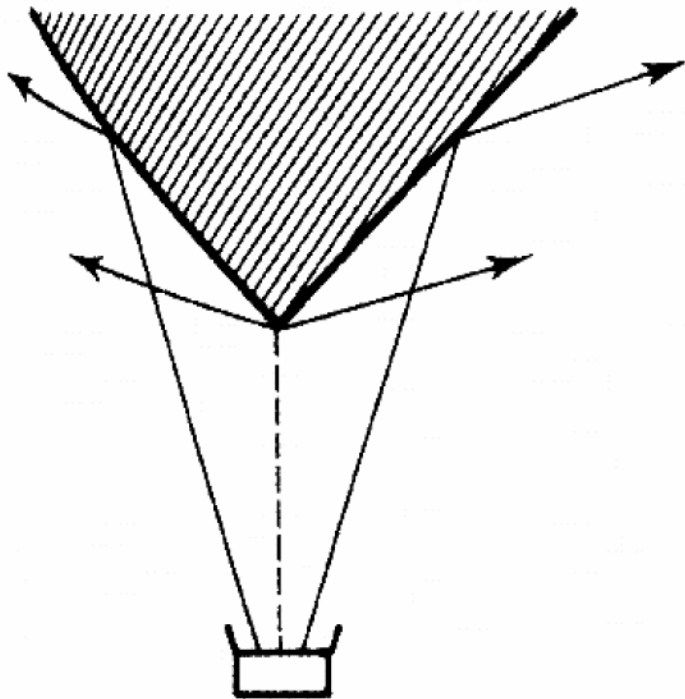
# Problem: Virtuelle Hindernisse



- Mehrere kleine Hindernisse werden als ein großes Hindernis wahrgenommen
- Je breiter der Schallkegel, desto größer müssen Lücken zwischen Hindernissen sein, um diese einzeln messen zu können

# Problem: Totalreflektion

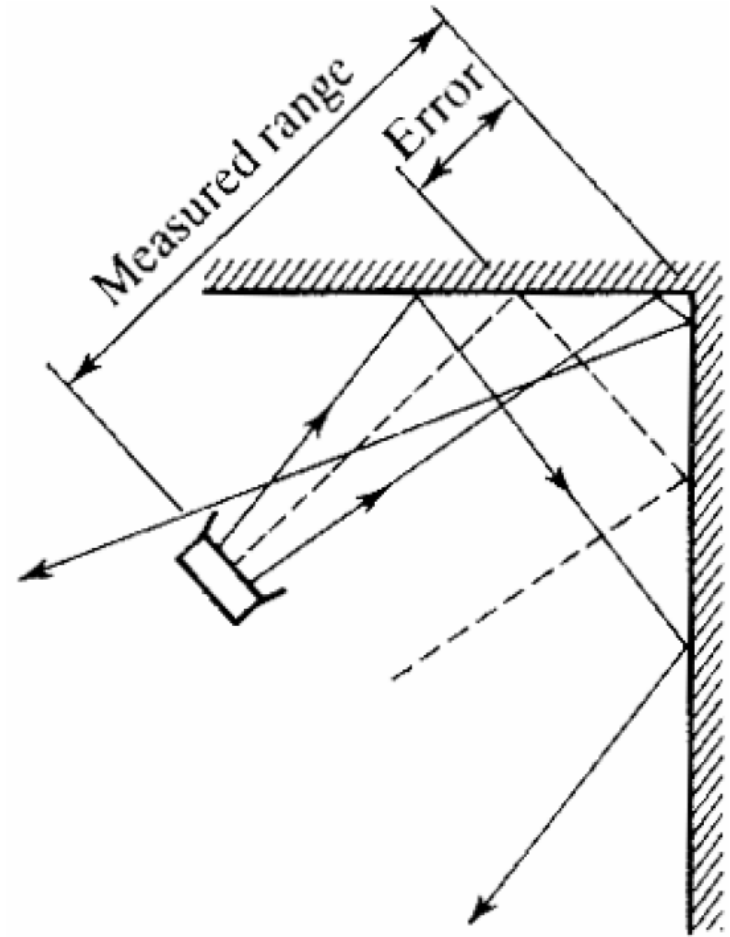
- Bei ungünstigem Auftreffwinkel wird der Schall weg vom Sensor reflektiert





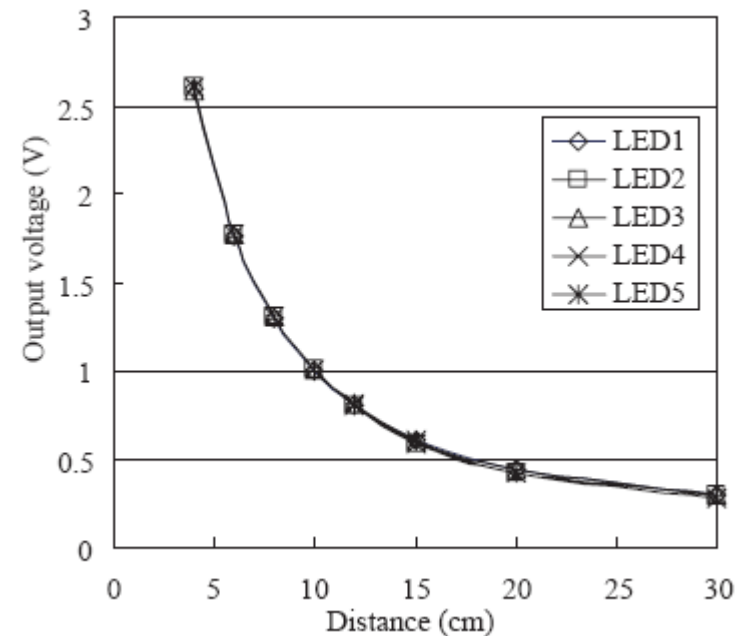
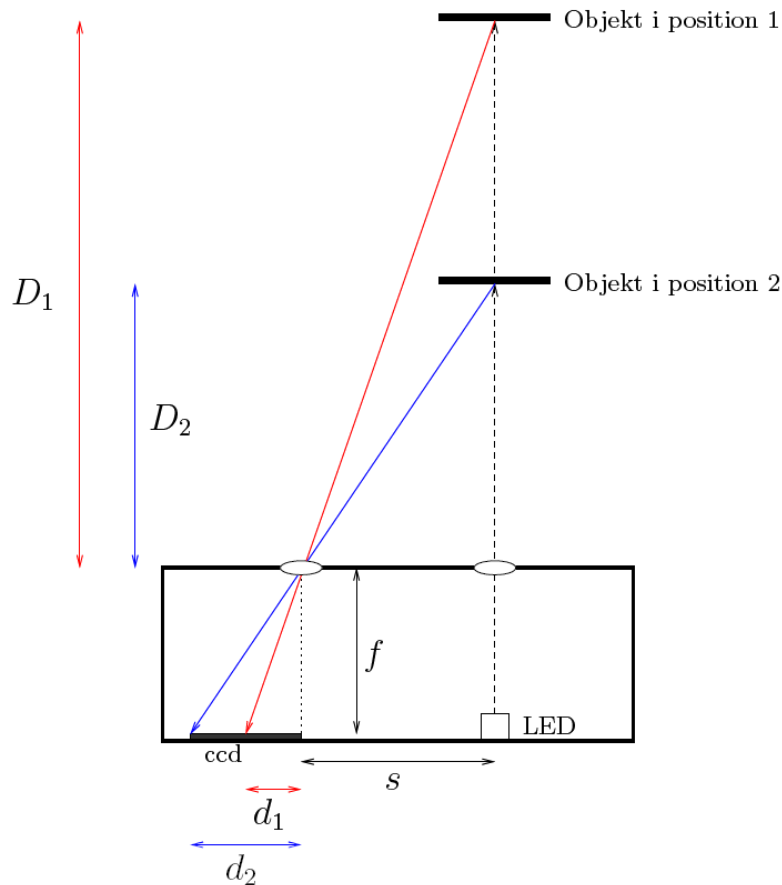
# Problem: Mehrfachreflektion

- Schallwellen werden nicht direkt, sondern zunächst weg vom Sensor und dann wieder zu ihm hin reflektiert
- Hindernisse erscheinen weiter weg als sie tatsächlich sind



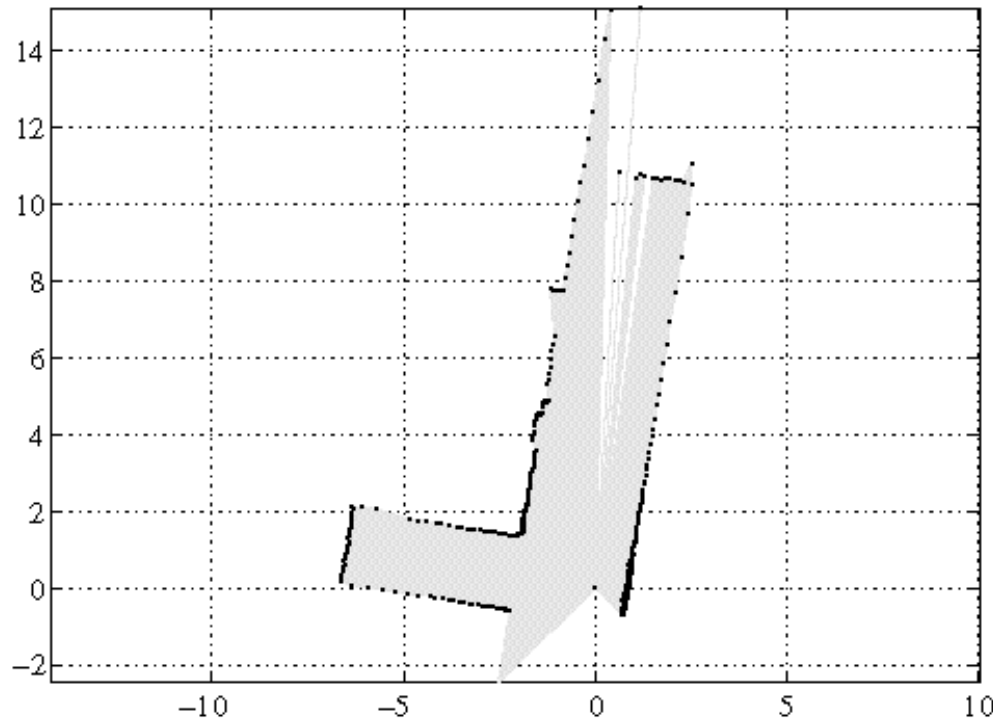
# IR-Abstandssensoren

- IR-Lichtstrahl wird reflektiert
- Triangulation der Entfernung
- Nicht-Lineare Kennlinie, verschiedene Messbereiche
- Anwendung: Sanitäreanlagen



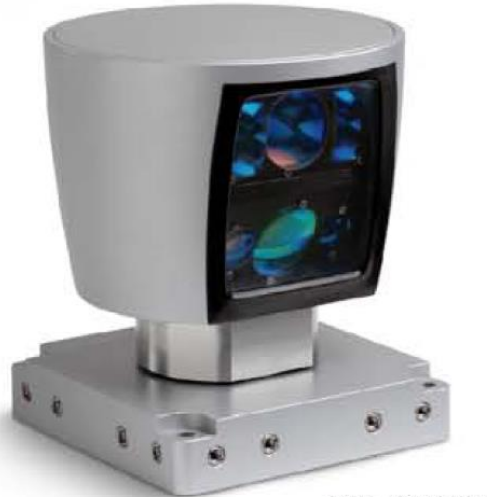
# Laser-Scanner

- Prinzip: rotierender Spiegel, Laufzeitmessung
- 270° Sichtbereich, 0.5° Winkelauflösung
- 30m Messbereich, 5cm Genauigkeit, 10-150Hz
- Anwendungen: Sicherheitsabschaltung, Lokalisierung, Kartierung



S300

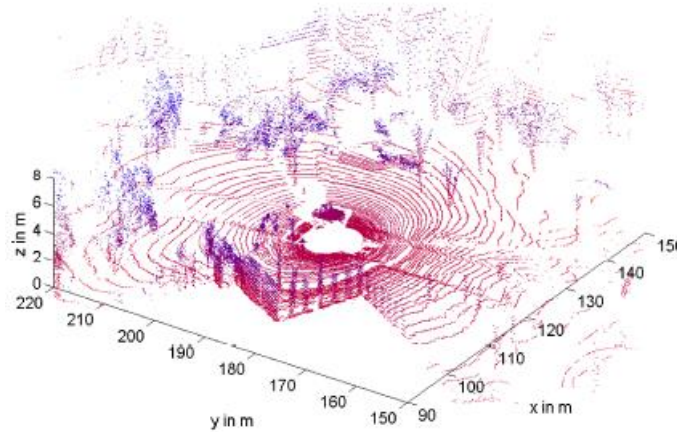
# Rotierende Laserscanner



Velodyne

HDL-64E S2

- 64 Strahlen, 10Hz Rotation, 26.8°FoV
- 1.3M Messungen/s



Beispiel:

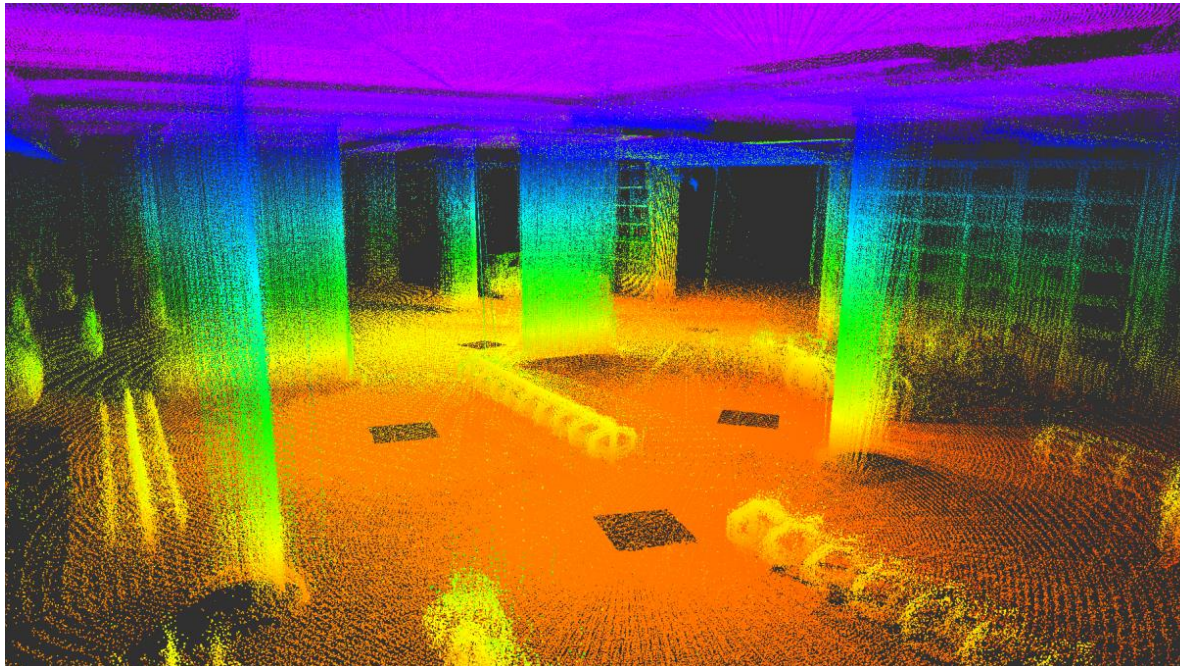
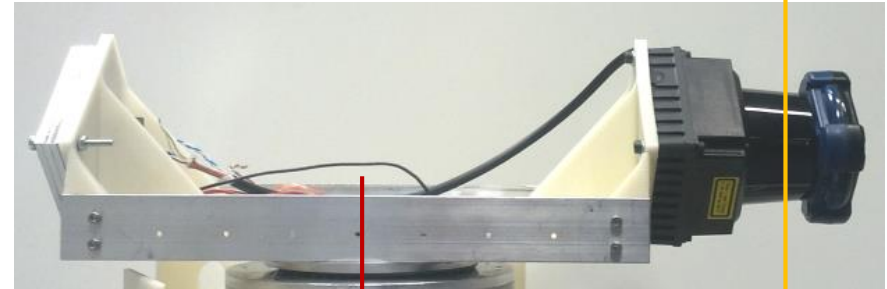
- Omnidirektionale Höhenbilder
- Bordsteindetektion

[Stückler, Schulz, Behnke 2008]



# Rotation eines 2D Laserscanners

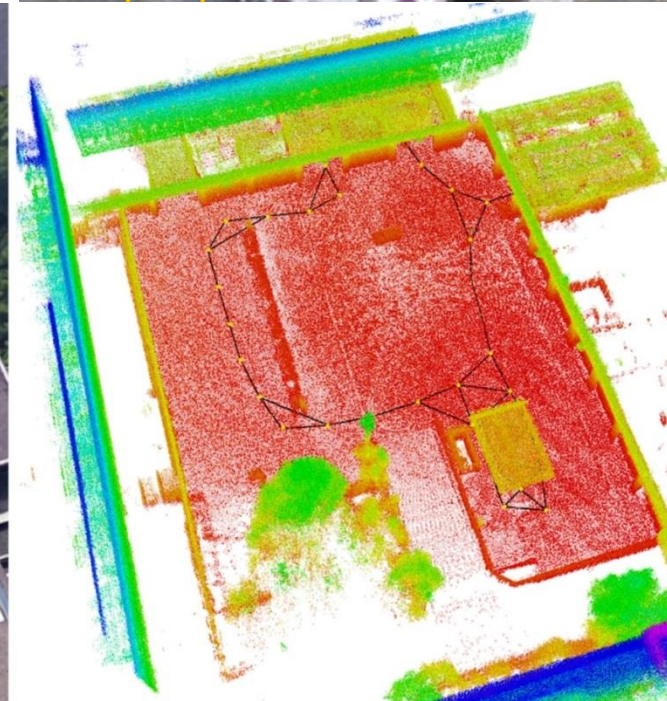
- 30 m omnidirektional
- Bis zu 2 Hz
- 40,000 Messungen/s
- Bis zu drei Echos





# Rotation eines 3D-Laserscanners

- Velodyne Puck VLP-16
  - $360 \times 30^\circ$  Sichtfeld statisch
  - 300.000 3D-Punkte/s
  - 100 m Reichweite
  - Kugelförmiger Sichtbereich



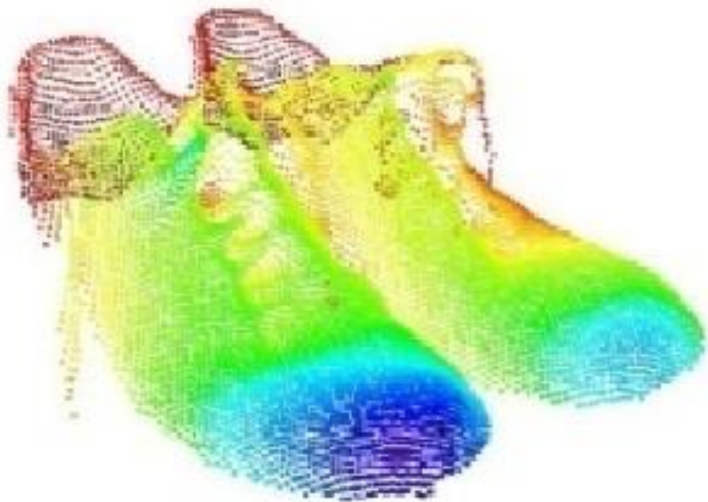
[Droeschel et al., Robotics and Autonomous Systems 2017]

# Time-of-Flight-Kameras



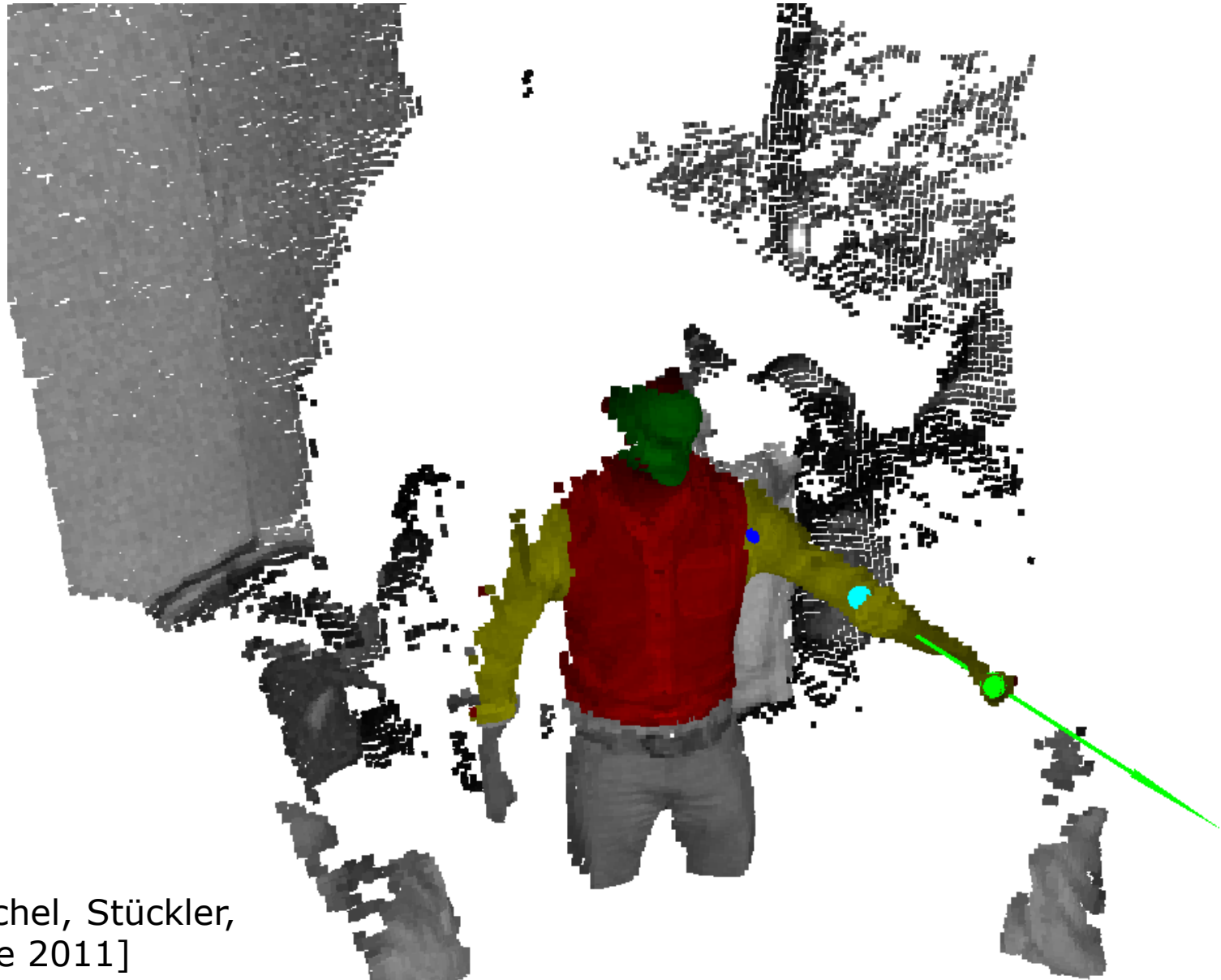
- Beispiel: Mesa SR4000

- Messung der Phasenverschiebung modulierten Lichts
- 176 (h) x 144 (v) QCIF
- 43.6° x 34.6° Sichtbereich
- 0.3 to 5.0 m, +/-1cm Genauigkeit
- Bis zu 54 fps





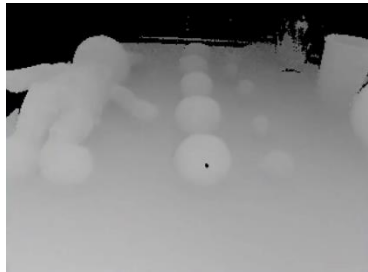
# Erkennung von Zeigegesten



[Droeschel, Stückler,  
Behnke 2011]

# Time-of-Flight-Kamera

- SoftKinetic DepthSense 325
- Geringer Mindestabstand 0.15–1.0 m
- 320 x 240 pixel, bis 60 Hz
- Weitwinklig 74° x 58°
- Preiswert



# Time-of-Flight-Kameras

## ■ Microsoft Kinect V2



**Farbbild 1080p**  
30 Hz



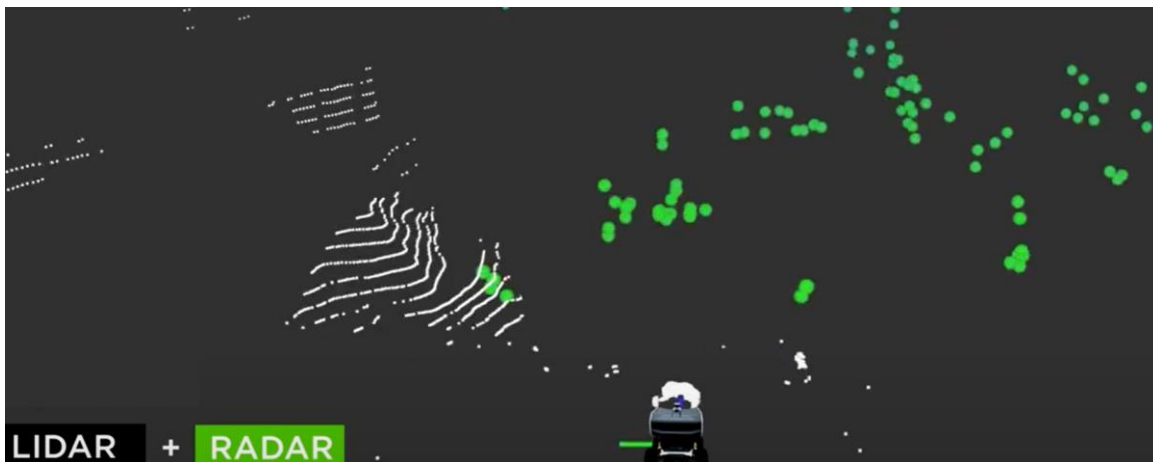
**Tiefenbild**  
512 x 424, 30 Hz  
FOV: 70 x 60  
Distanz: 0,5–4,5 m



**Infrarotbild**  
512 x 424  
30 Hz

# RADAR-Sensoren

- Beleuchten Szene mit Radiosignal 77 – 81 GHz
- Laufzeitmessung
- Geschwindigkeitsmessung durch Doppler-Effekt
- Bewegte Antennen oder Beam-Forming
- Funktionieren auch bei Rauch und Nebel
- Beispiel: Autonomics Radar
  - Bis 150m, 150° Sichtfeld, 0.3m Genauigkeit



# Stereo-Kameras

- Bildaufnahme aus zwei Blickwinkeln
- Finden von Korrespondenzen
- Disparität lässt auf Tiefe schließen



Adept MobileRanger C3D



Helligkeit



Tiefe



Helligkeit



Tiefe

# PrimeSense-Tiefensensor mit strukturiertem Licht

- MS Kinect
- Asus Xtion



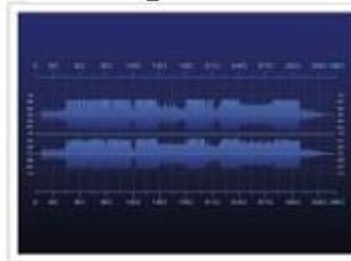
Farbbild



Tiefenbild



Audiosignal



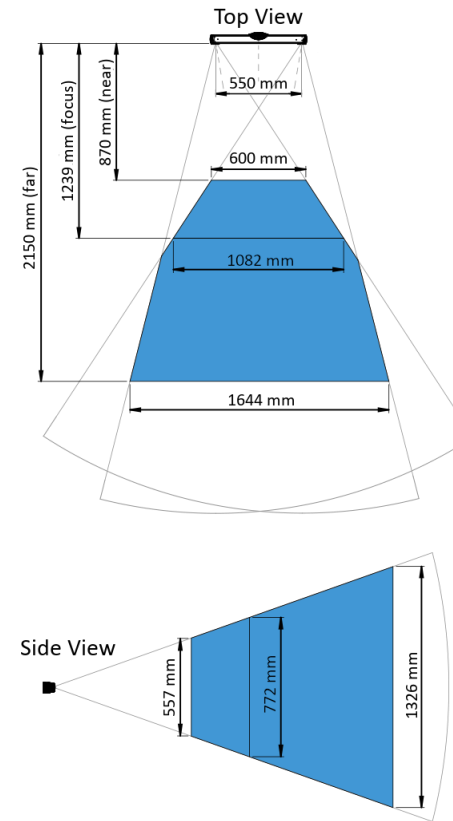
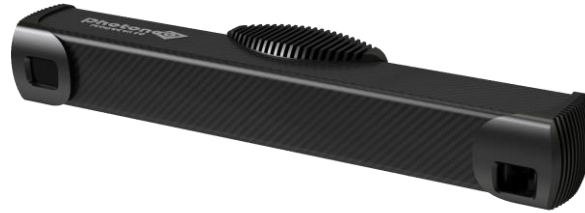
- Tiefenbild
  - 320x240
  - 30Hz
  - 1,2-3,5m
  - 57° x 43°
- "Light Coding"
  - Pseudo-zufälliges IR-Muster
  - Korrelation
  - Triangulation

[[www.primesense.com](http://www.primesense.com)]

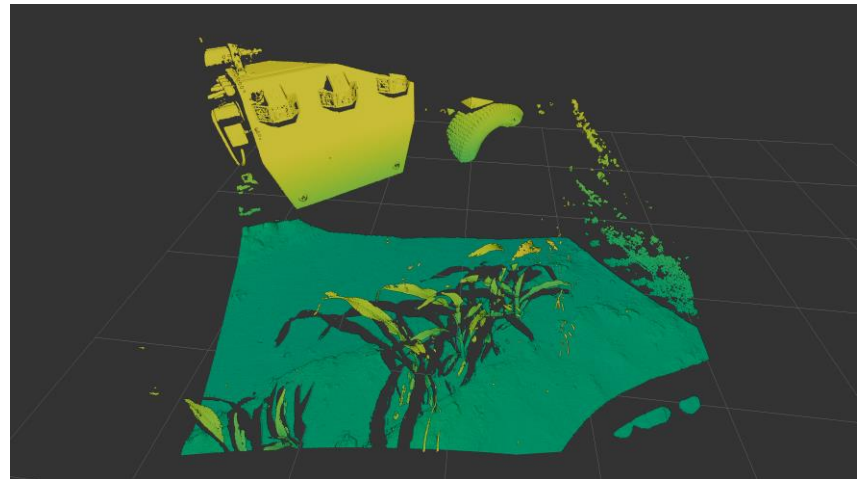


# Photoneo PhoXi 3D-Scanner

- Triangulation mit strukturiertem Licht im Infrarotbereich
- Auflösung: Bis zu 3,2 Millionen Punkte
- Messabstand: 87 – 215 cm, optimal: 124 cm
- Messzeit: 250 ms – 2,7 s
- Abmessungen: 8 x 7 x 62 cm
- Abstand von Projektor und Kamera: 55 cm



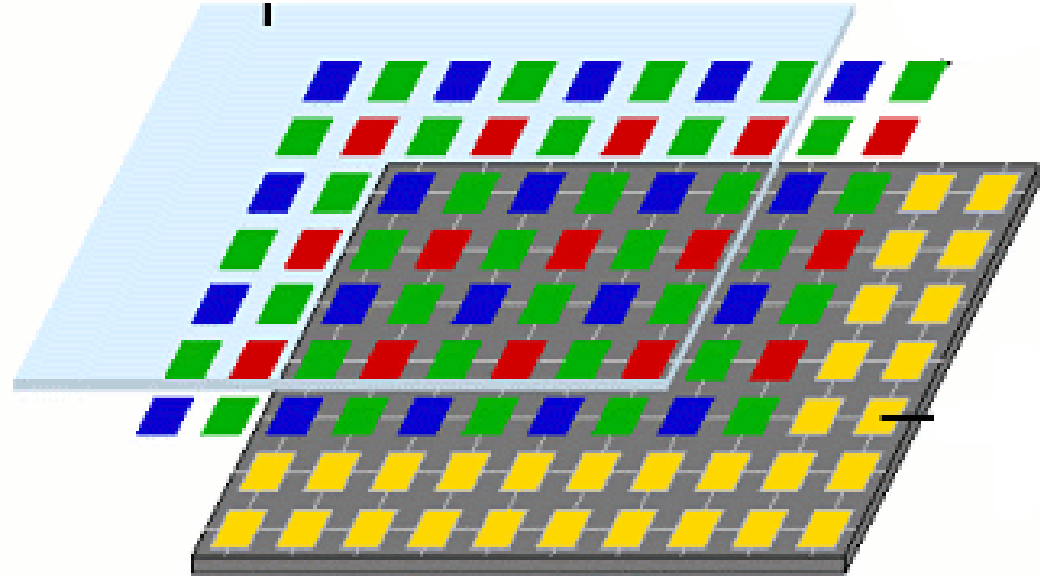
Nikon RGB



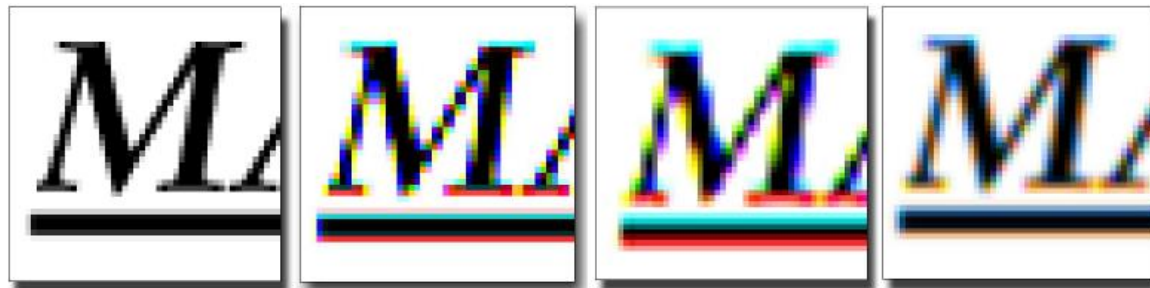
Photoneo point cloud



# CCD/CMOS Farbkameras



- Farbfilter im Bayer-Muster
- Farbinterpolation erforderlich



# Wahrnehmung der Spielsituation



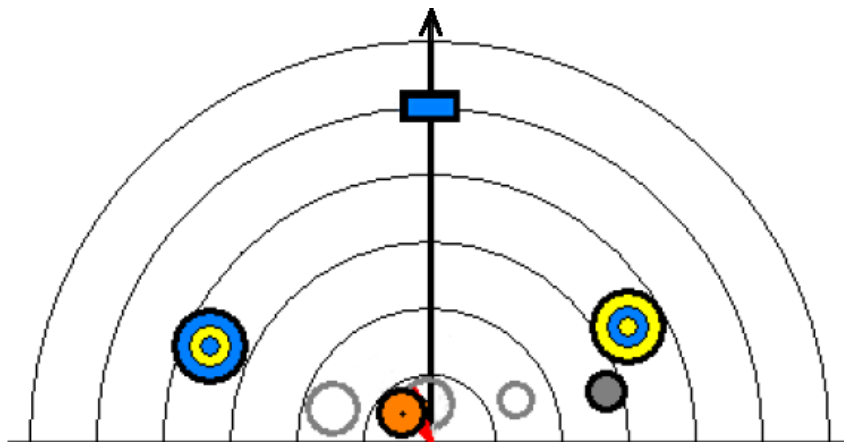
Links



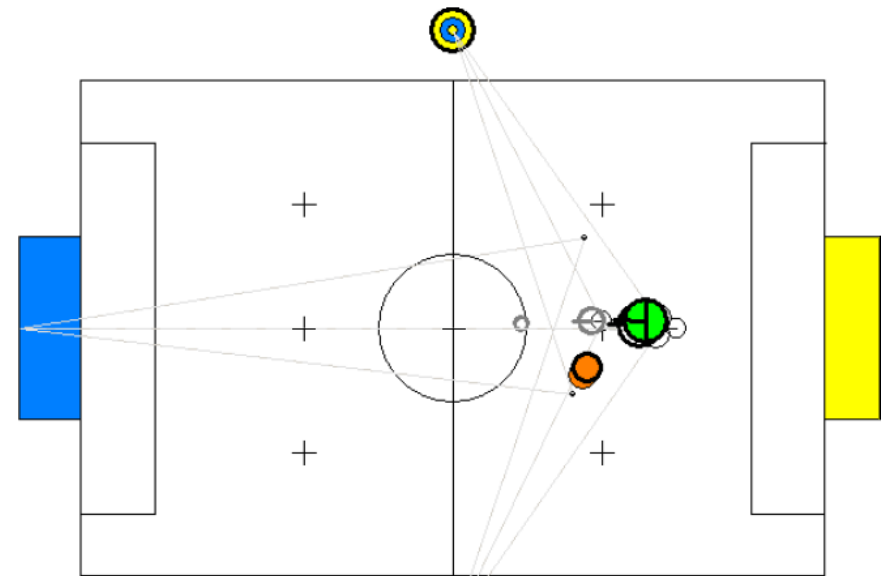
Mitte



Rechts

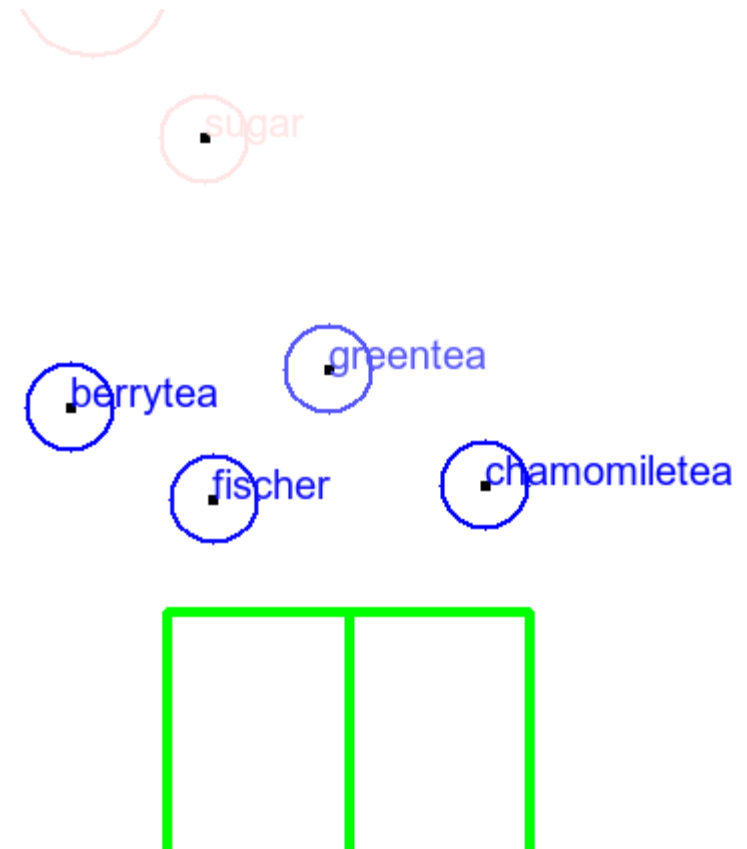
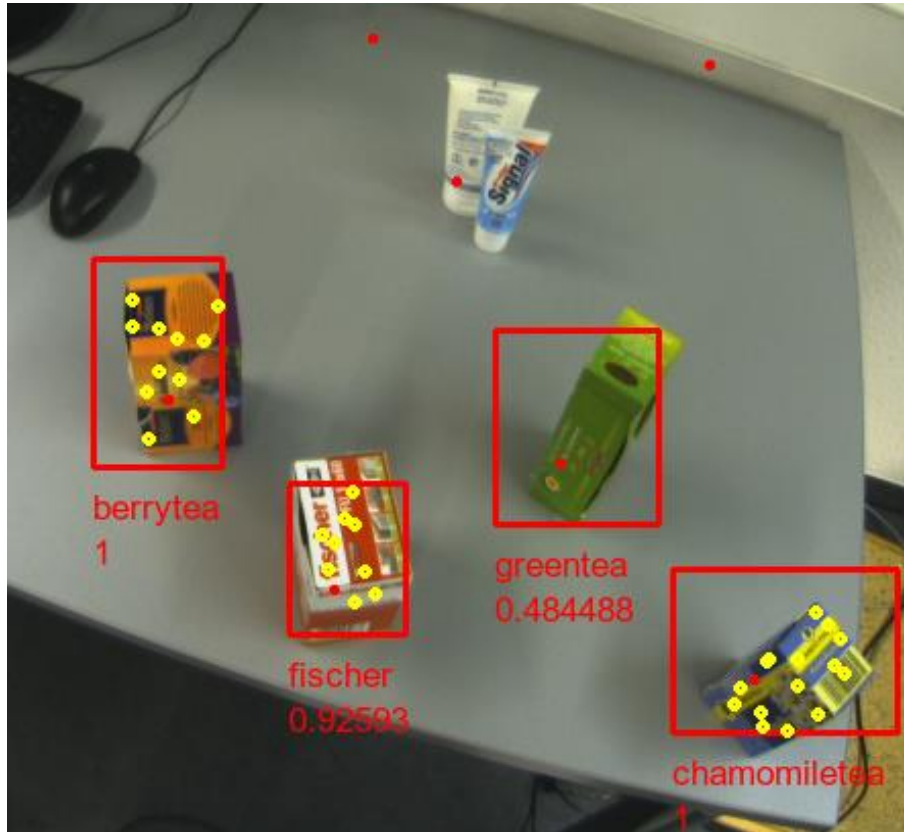


Egozentrische Sicht



Allozentrische Sicht

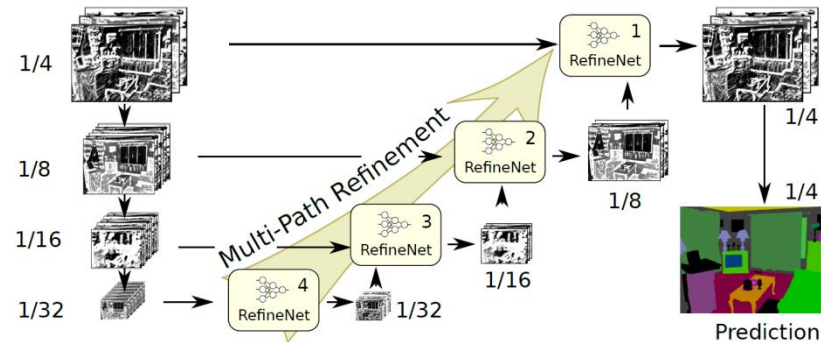
# Visuelle Objekterkennung



- Objektdetektion mit Laserscanner
- Abbildung in Bildebene
- Erkennung durch Farbe und Texturmerkmale (SURF)
- Objektverfolgung

# Semantische Segmentierung

- 24 MPixel Kamera
- RefineNet



[Lin et al.  
CVPR  
2017]



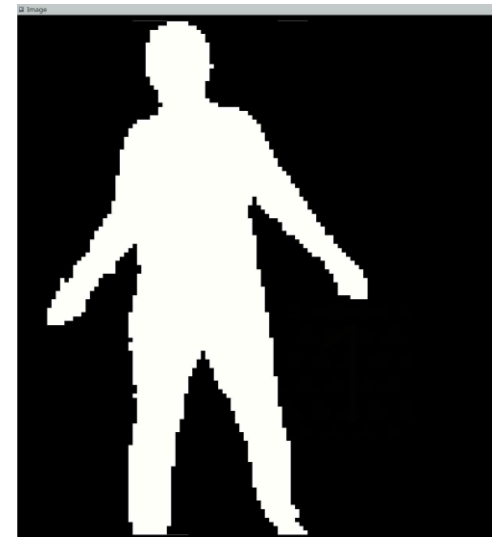
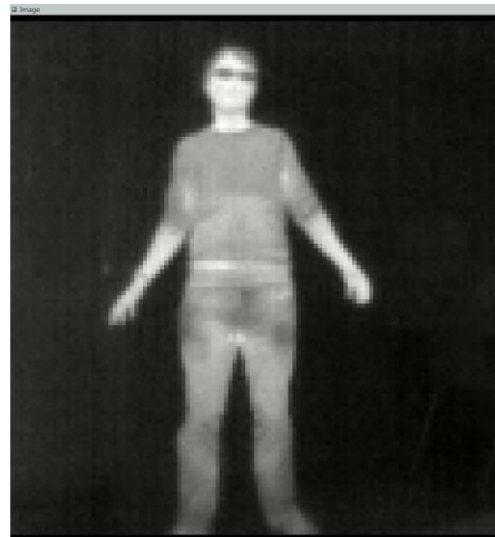
ronze\_wire\_cup  
conf: 0.749401  
sh\_spring\_soap  
conf: 0.811500  
playing\_cards  
conf: 0.813761  
quarium\_gravel  
conf: 0.891001  
crayons  
conf: 0.422604  
reynolds\_wrap  
conf: 0.836467  
paper\_towels  
conf: 0.903645  
white\_facecloth  
conf: 0.895212  
hand\_weight  
conf: 0.928119  
ots\_everywhere  
conf: 0.930464



mouse\_traps  
conf: 0.921731  
windex  
conf: 0.861246  
q-tips\_500  
conf: 0.475015  
fiskars\_scissors  
conf: 0.831069  
ice\_cube\_tray  
conf: 0.976856

# Thermalkameras

- Können Temperaturen messen
- Z.B. Langwellige Infrarot (LWIR)  
-Kamera FLIR Lepton
  - 160x120 @ 8.7 Hz
- Gut geeignet, um Personen zu detektieren

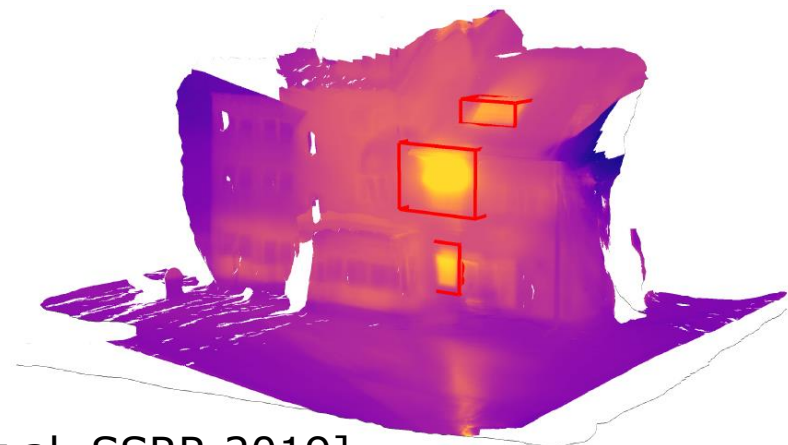




# Thermalkameras

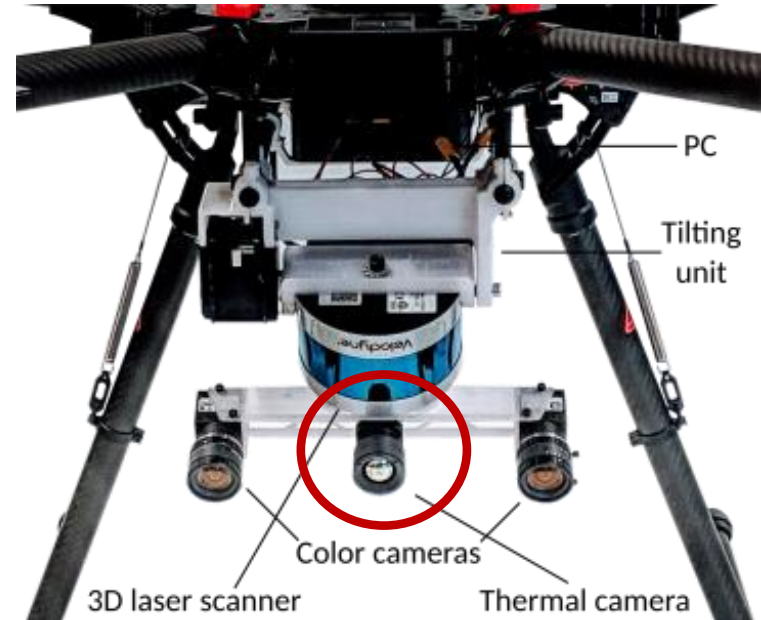
- Z.B. FLIR Boson 640
  - Langwelliges Infrarot,  $7,5\ \mu\text{m} - 13,5\ \mu\text{m}$
  - $640 \times 512$  pixel, 60Hz
- Detektion von Brandherden und Glutnestern

Brandhaus Dortmund

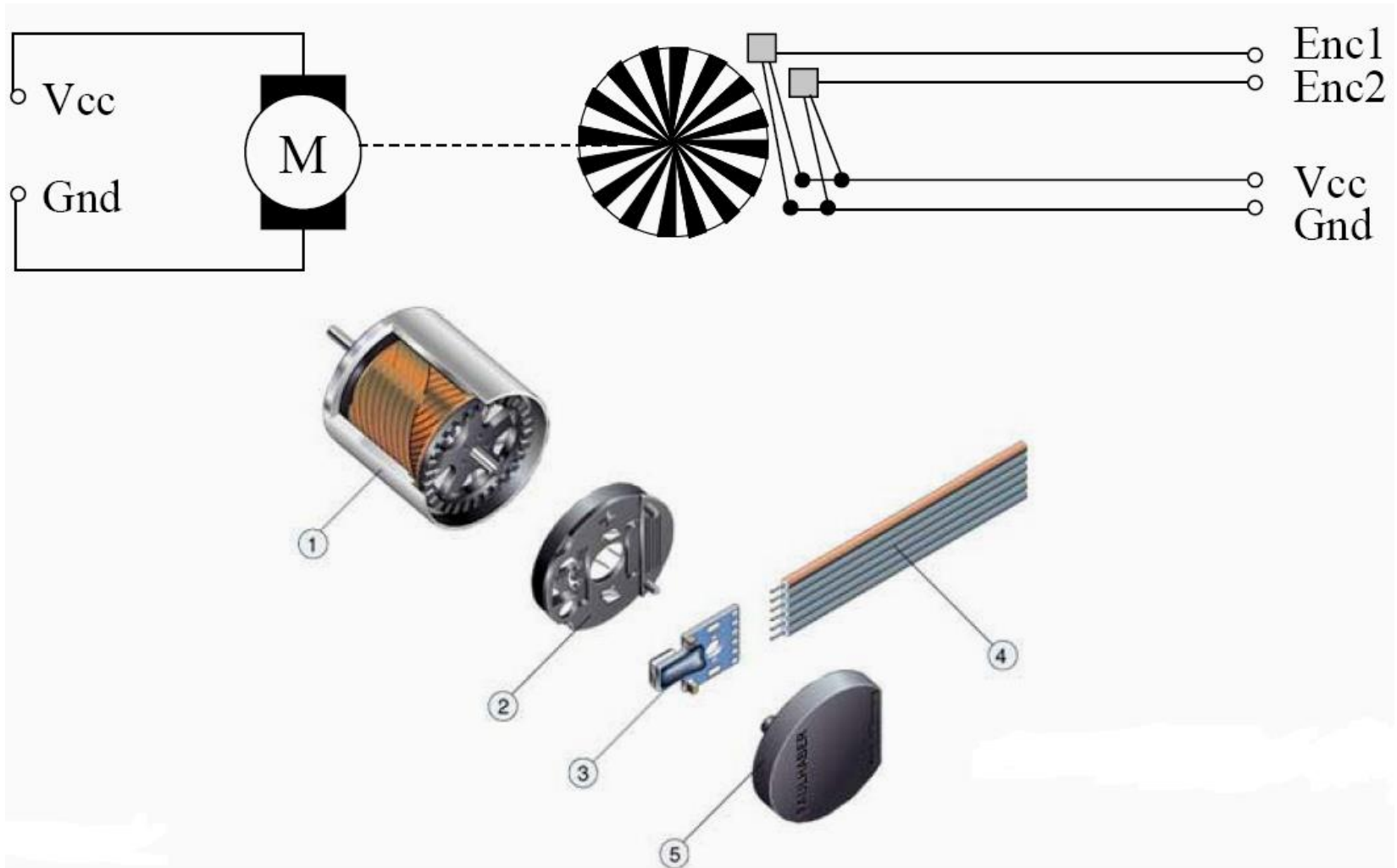


[Rosu et al, SSRR 2019]

Flugroboter mit Thermalkamera



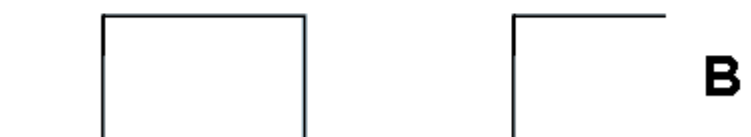
# Messung der Positionsänderung durch Inkrementelle Encoder





# Quadratur-Codierung

- Zeigt Geschwindigkeit und Drehrichtung an

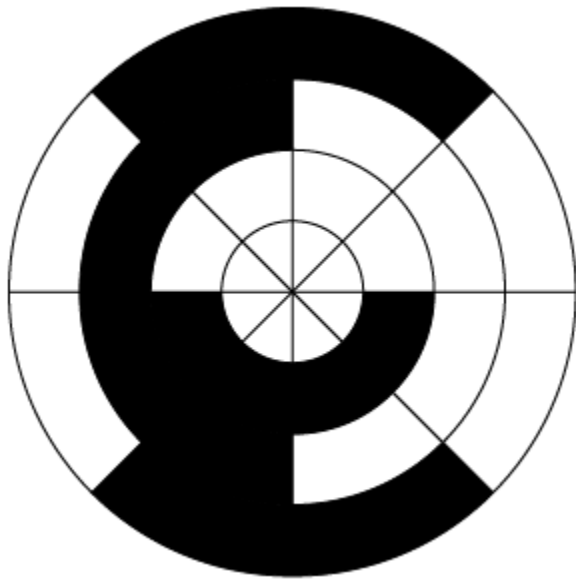


Rechtsdrehung

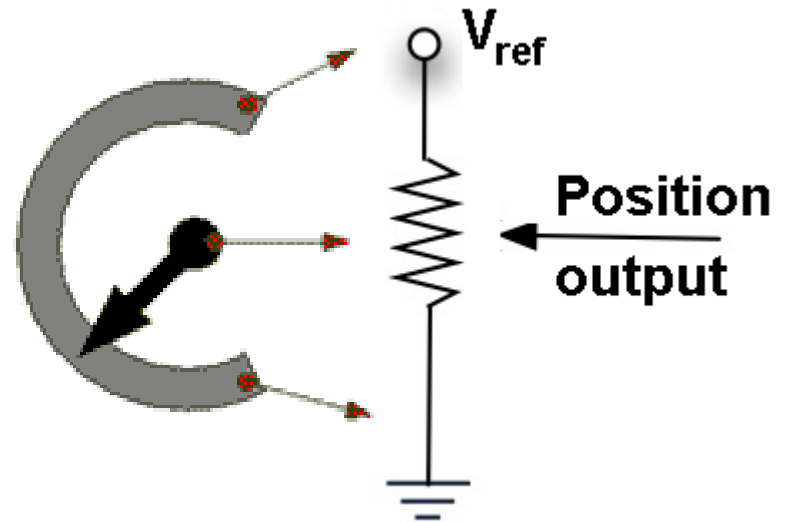
Linksdrehung

# Absolut-Encoder

## ■ Gray-Code



## ■ Potentiometer



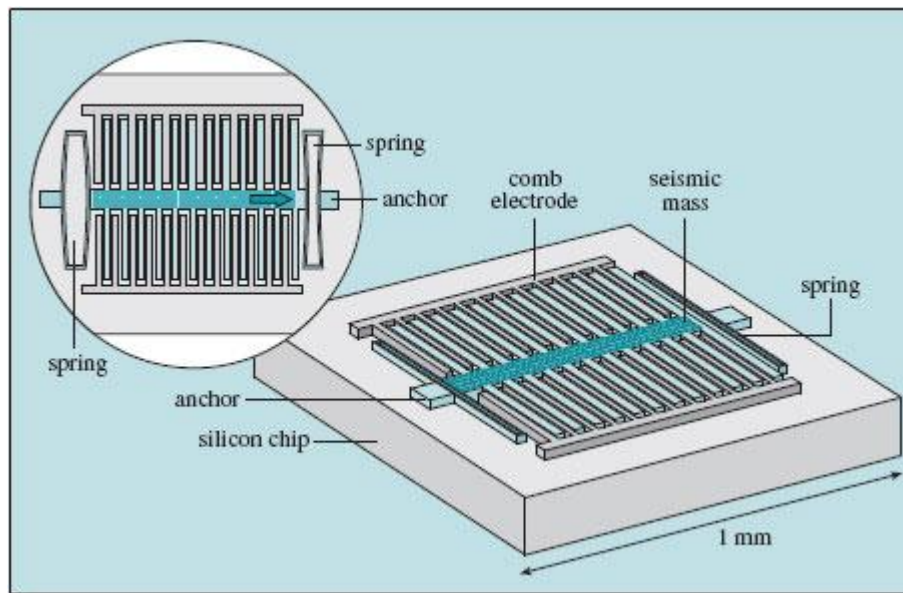
# Magnet-Encoder

- Berührungslose Messung eines bewegten Magneten
- Funktionsprinzip: Hall-Effekt
- Linear und rotierend, absolute und inkrementelle Varianten



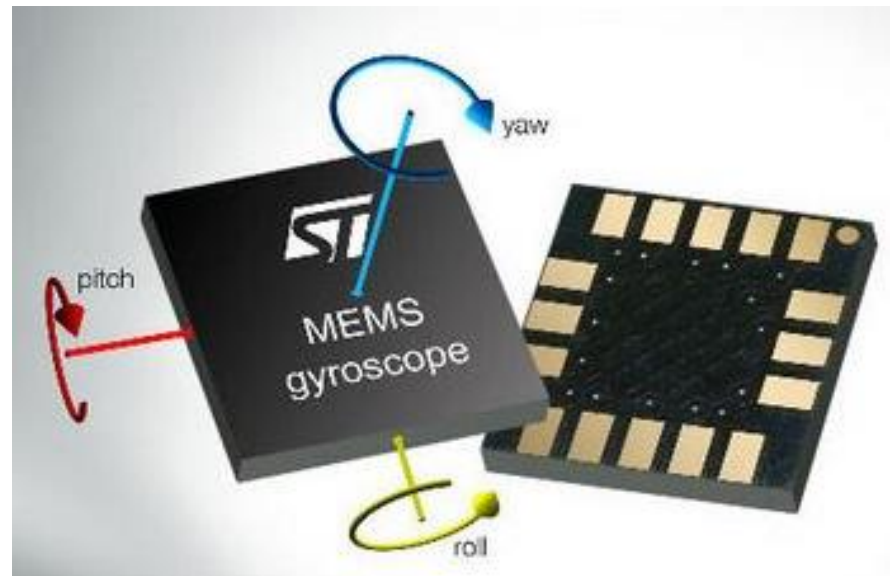
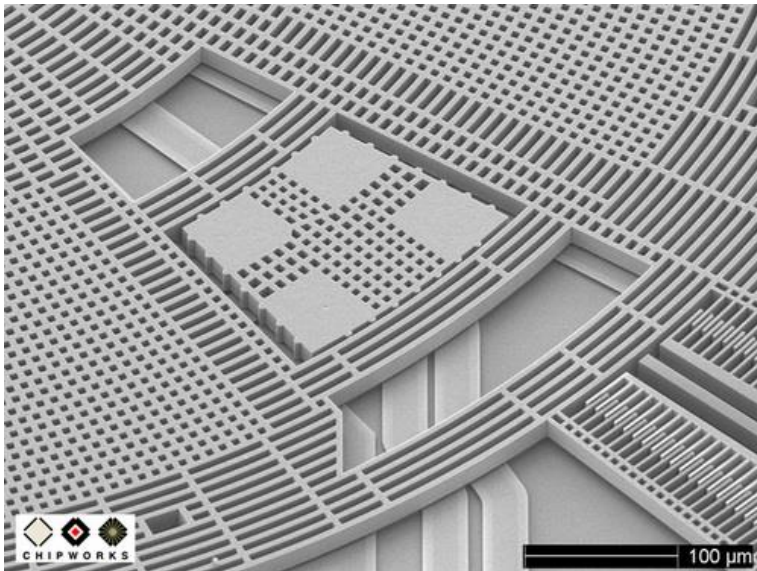
# Beschleunigungssensoren

- Mikromechanisch hergestellt (MEMS)
- Testmasse federnd aufgehängt
- Auslenkung wird durch Kondensator oder piezoelektrischen Effekt bestimmt
- Kleine Sensoren mit bis zu drei Achsen



# Drehratensensoren

- Ähnlich wie rotierende Objekte benötigen auch vibrierende Objekte eine Kraft, um sie aus der Vibrationsebene zu bewegen (*Corioliskraft*)
- Mikromechanische Ausführungen mit bis zu drei Achsen



# Temperaturmessung

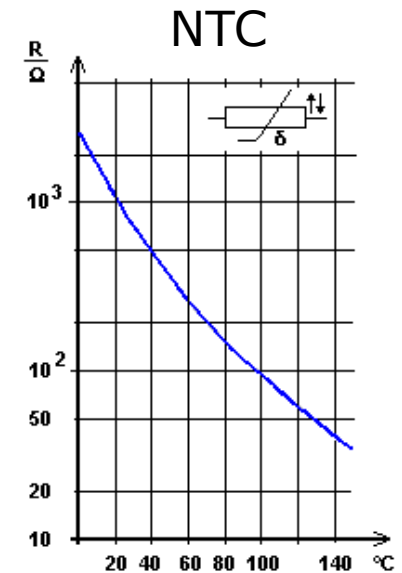
## ■ Thermoresistive Sensoren:

### ■ Metalle

- Widerstand ändert sich mit der Temperatur
- Häufig genutzt: Platin
- Messbereich  $-200^{\circ}\text{C}$  bis  $+500^{\circ}\text{C}$
- Ausführung als Draht oder Metallfilm
- Problem: Stromfluss erzeugt Wärme

### ■ Keramische Materialien

- positiver (PTC, Kaltleiter) oder negativer (NTC, Heissleiter) Temperaturkoeffizient

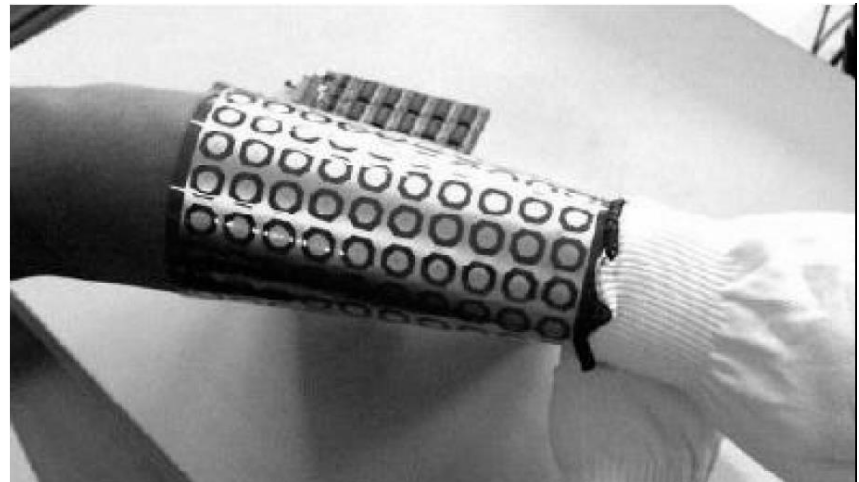
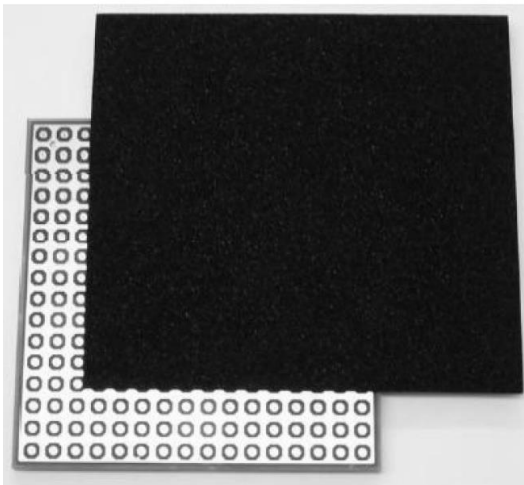


## ■ Thermoelektrische Sensoren:

- Zwei verschiedene Metalle in Kontakt
- Thermoelektrischer (Seebeck-) Effekt erzeugt Spannung proportional zur Temperatur am Kontakt

# Künstliche Haut

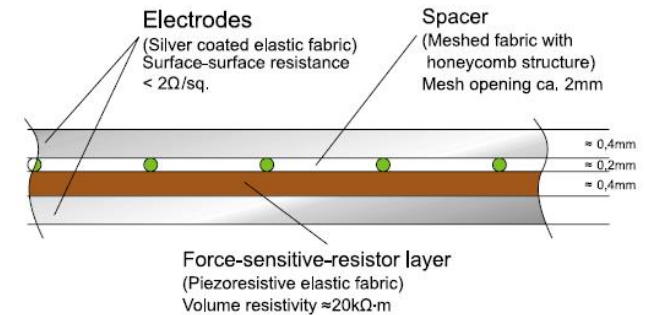
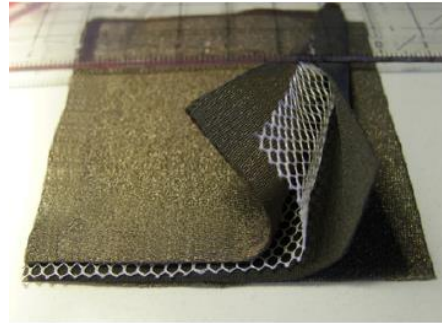
- Erfassung von Position und Druckkraft
- Schutzfunktion (Polsterung, Schmutz, ...)
- Z.B. Matten aus Schaumstoff
  - Elektroden-Matrix
  - Kraftmessung durch Widerstandsänderung





# Datenhandschuh

- Piezo-resistives Gewebe
- 54 Zellen



# Kapazitive Sensoren

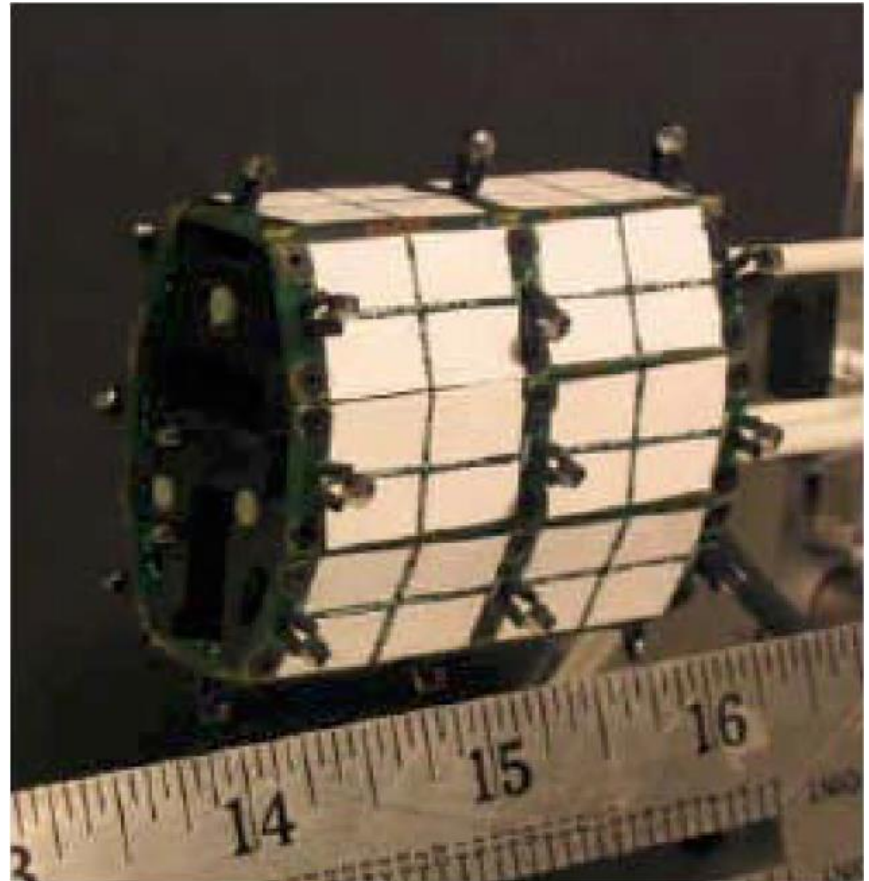
- Änderung der Kapazität von Kondensatoren durch leitfähige Objekte, wie Finger



# The Huggable (MIT)

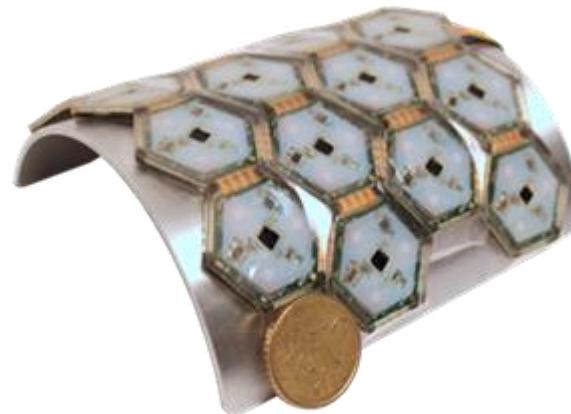
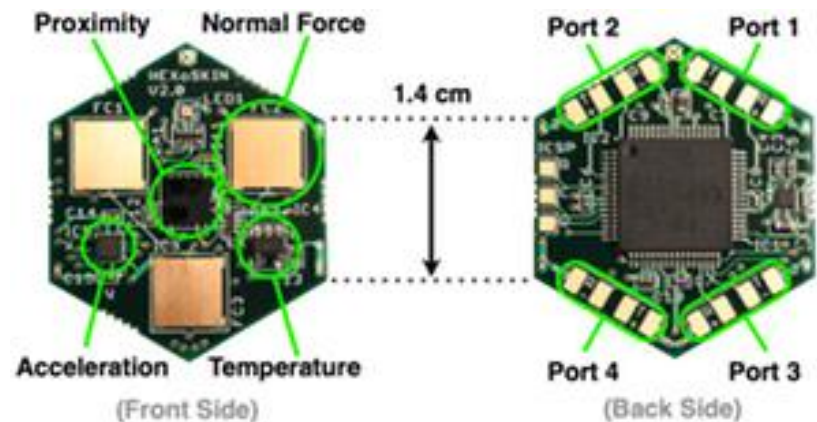
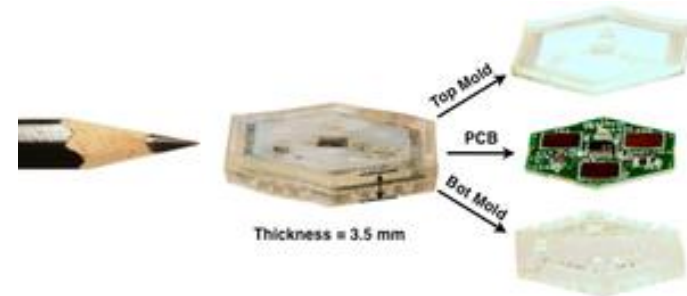


- QTC Kraftsensoren
- Thermistoren
- Sensoren für elektrische Felder



# Hex-O-Skin (TUM)

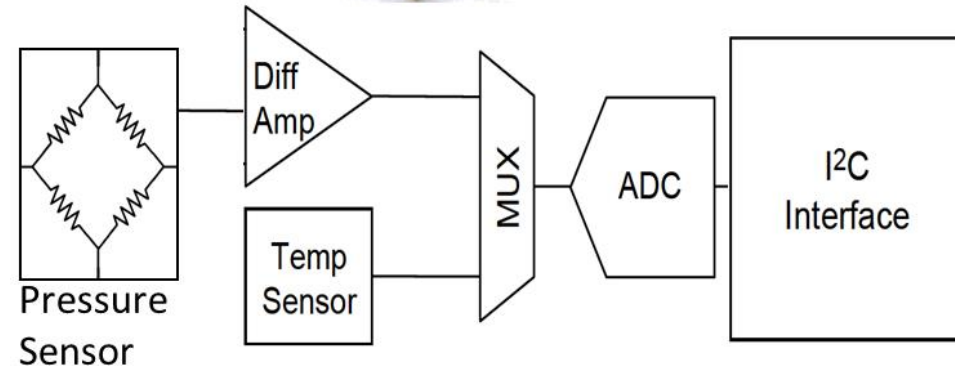
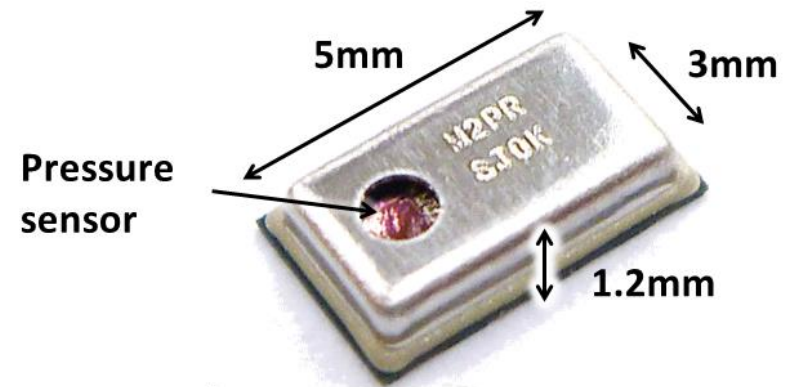
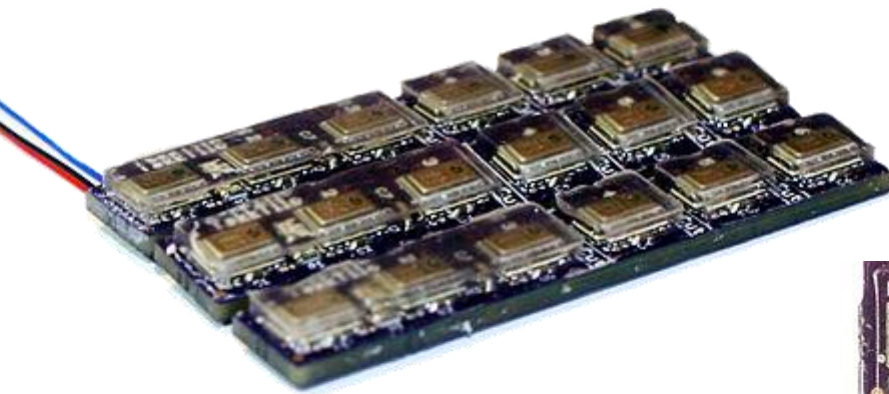
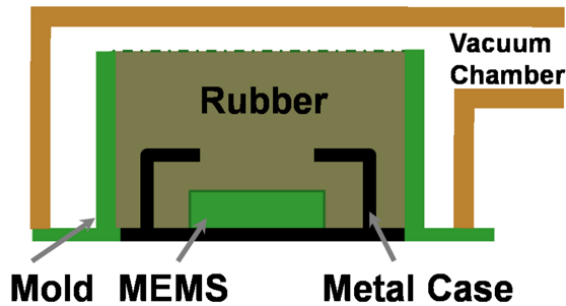
- Sensorzelle mit lokaler Intelligenz
- Mehrere Modalitäten
  - Nähe
  - Beschleunigung
  - Normalkraft
  - Temperatur
- Sensornetzwerk



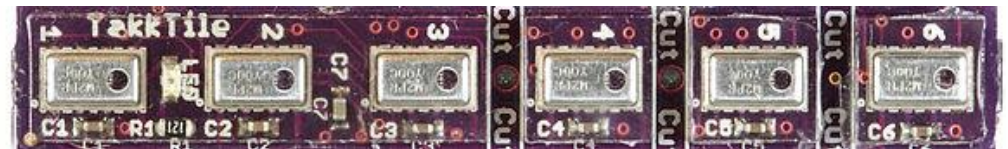


# TakkTile Haptische Sensoren

- Preiswerte  
Luftdrucksensoren
- Eingegossen in Silikon



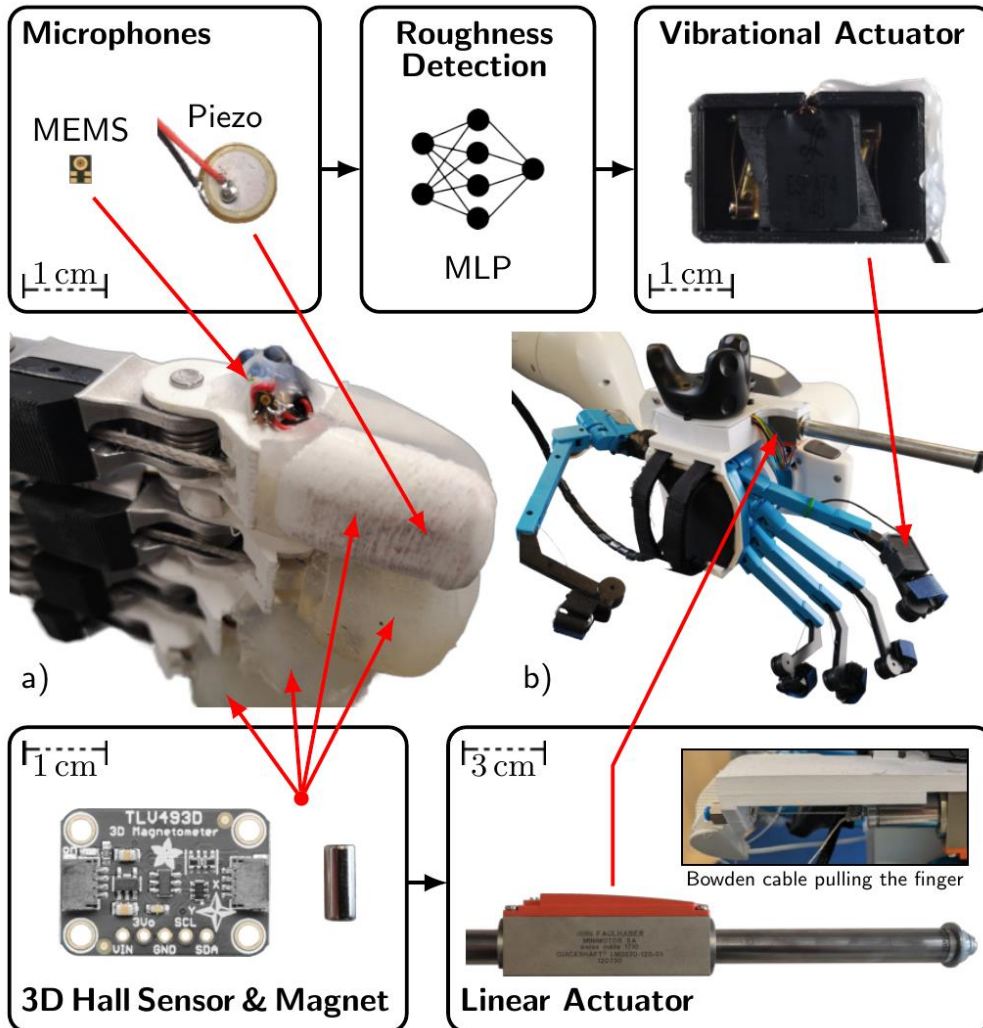
[Tenzer et al. RAM 2014]



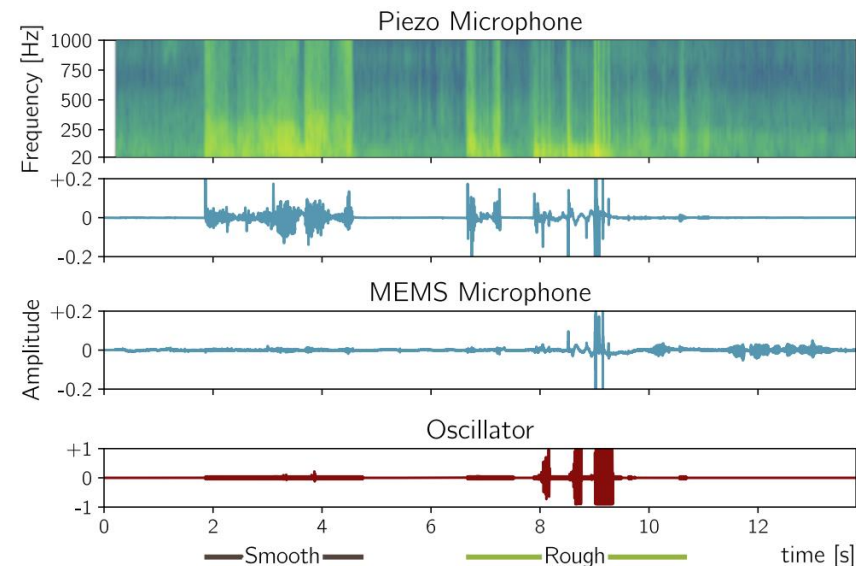
<http://www.takktile.com>



# Mikrofone und Hall-Sensoren



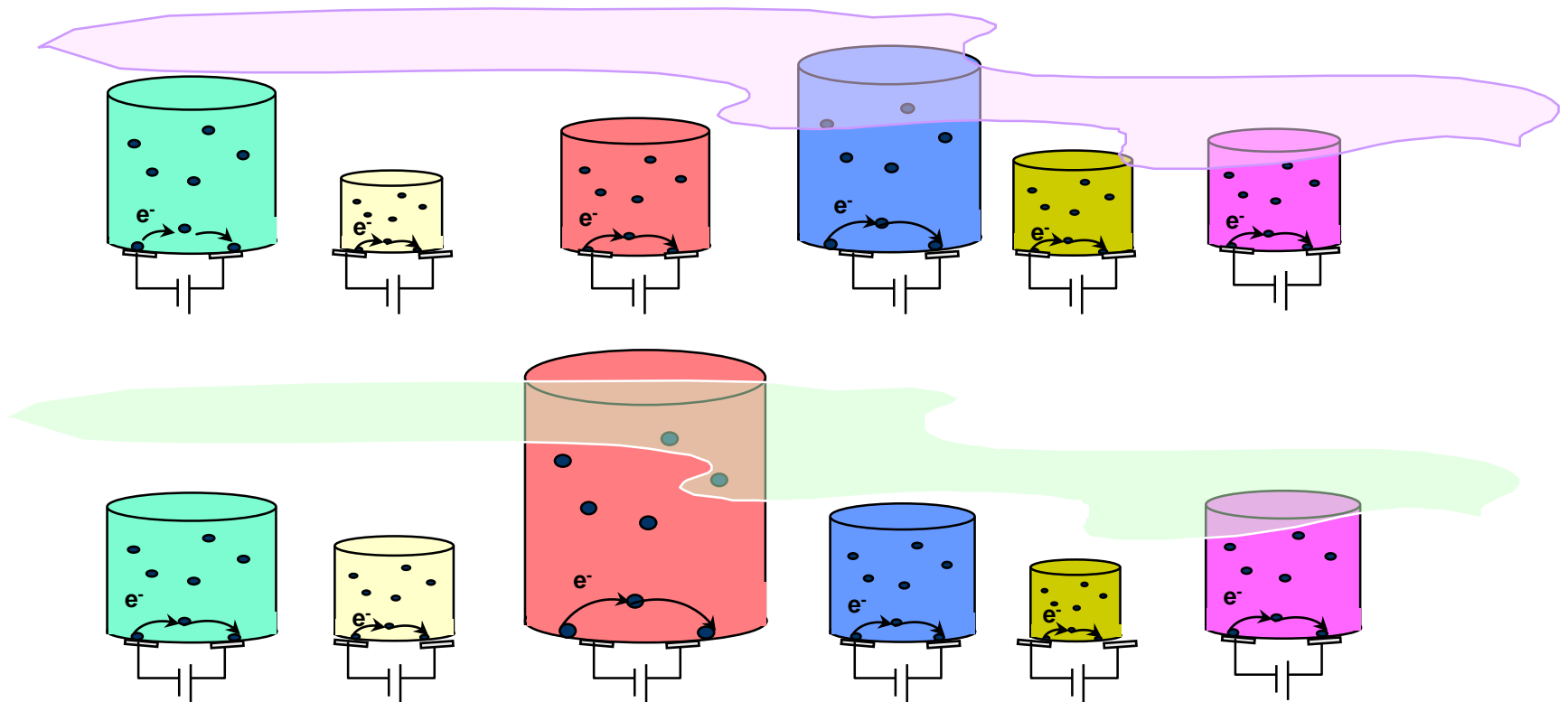
- Messung von Interaktionskräften und Vibrationen beim Streichen über Oberflächen
- Unterscheidung von rauen und glatten Oberflächen



[Pätzold et al. SMC 2023]

# NASA ENose

- Widerstand verschiedener Polymer-Filme ändert sich unterschiedlich je nach Luftzusammensetzung



# Übungsgruppen

Tutoren: Johannes Napp-Zinn, Tim Sinen, Jan Stettner

	Mo	Di	Mi	Do	Fr
8 (c.t.) - 10		<b>Übung</b> Sinen			
10 (c.t.) - 12		<b>Übung</b> Stettner			
12 (c.t.) - 14	<b>Übung</b> Napp-Zinn				
14 (c.t.) - 16	<b>Übung</b> Napp-Zinn	<b>Übung</b> Stettner		<b>Vorlesung</b>	
16 (c.t.) - 18		<b>Übung</b> Sinen			

- Anmeldung via **TVS** bis zum 19. Oktober  
<https://puma.cs.uni-bonn.de>
- Erste Übung am 23./24. Oktober
- Im Seminarraum IZ 0.011

# Folien und Übungsaufgaben

[www.ais.uni-bonn.de](http://www.ais.uni-bonn.de)

Teaching

User: **AIS**

Pwd: **Avatar**

