

# Sensoren

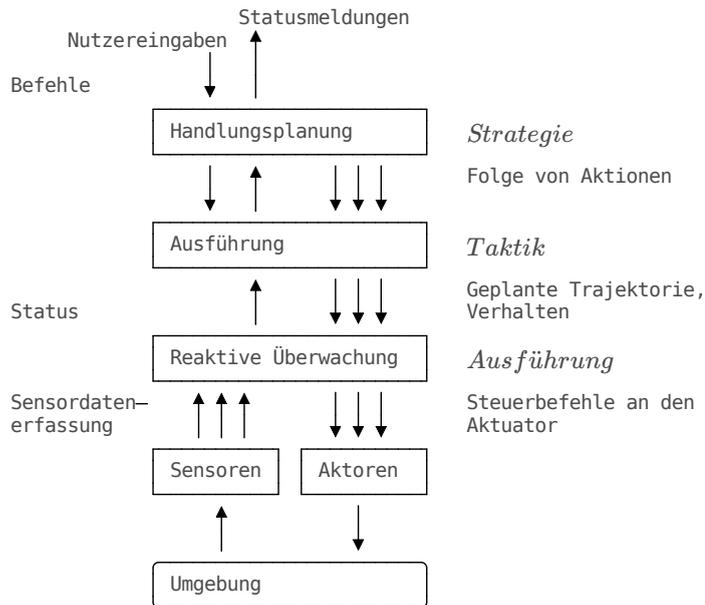
Parameter	Kursinformationen
Veranstaltung:	Robotik Projekt
Semester	Wintersemester 2024/25
Hochschule:	Technische Universität Freiberg
Inhalte:	Überblick Sensorsysteme im Robotikkontext
Link auf GitHub:	<a href="https://github.com/TUBAF-lfl-LiaScript/VL_SoftwareprojektRobotik/blob/master/04_Sensoren/04_Sensoren.md">https://github.com/TUBAF-lfl-LiaScript/VL_SoftwareprojektRobotik/blob/master/04_Sensoren/04_Sensoren.md</a>
Autoren	Sebastian Zug & Georg Jäger



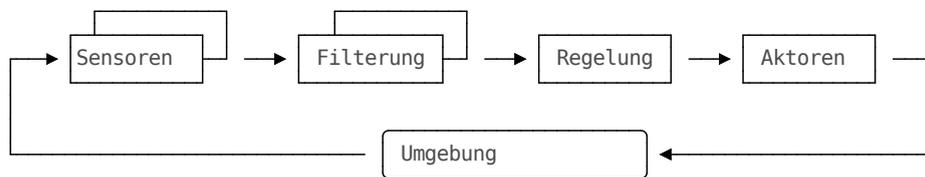
---

## Einordnung

Wie weit sind wir bisher gekommen? Dank ROSn können wir beliebige Knoten in unterschiedlichen Funktionen entwerfen und miteinander verknüpfen. Welche Elemente brauchen wir aber und wie verknüpfen wir diese?



Im weiteren Verlauf der Veranstaltung werden wir uns auf den letzte Ebene fokussieren und die elementare Verarbeitungskette verschiedener Sensorsysteme analysieren.



Beginnen wir also mit der Sensorik ...

## Sensorik des Menschen

**Aufgabe:** Gewinnung von Information über internen („Propriozeption“) bzw. externen Zustand („Exterozeption“) = „Wahrnehmung“ von Eigenzustand und Umwelt;

**Zielstellung:** Möglichkeit zur Reaktion auf innere und äußere Einflüsse

Klassifikation	Umsetzung
Modalitäten	+ Sehen, Hören, Riechen, Schmecken, Fühlen
	+ Temperatur, Gleichgewicht
	+ Hunger, Durst
Qualitäten	+ rot, grün, blau
	+ süß, sauer, salzig, bitter
	+ ungefähr 7 Grundgerüche
Intensität	Amplitude

Und wie funktioniert das? Sogenannten Rezeptoren ...

... sind spezialisierte Zellen, die von bestimmten inneren oder äußeren Reizen angeregt werden und sie dann in Form von elektrischen Impulsen oder chemischen Reaktionen weiterleiten.

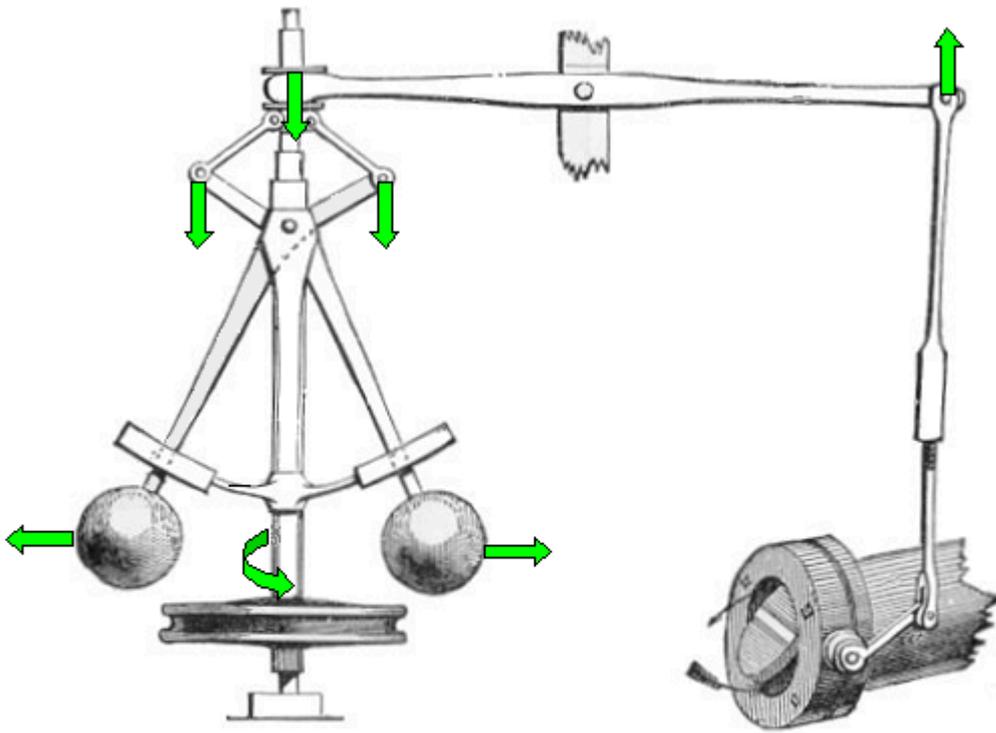
.. ein ausreichend starker Reiz bewirkt eine Veränderung des Membranpotentials (Generatorpotential)

... lösen ab einer gewissen Intensität des Reizes ein Schmerzempfinden aus.

Rezeptoren	Reiz
Mechanorezeptoren	mechanische Deformation
Thermorezeptoren	Temperaturänderung
Photorezeptoren	Licht
Chemorezeptoren	Geschmäcker und Gerüche

## Technische Sensoren

Sensoren (lateinisch „fühlen“ ) transformieren physikalische, chemische oder biologische Messgrößen in elektrische Signale und stellen damit das unmittelbare Interface eines Messsystems zur Umgebung dar.

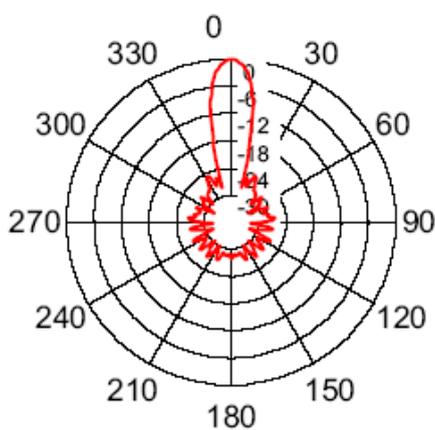


Fliehkraftregler <sup>[Kino]</sup>

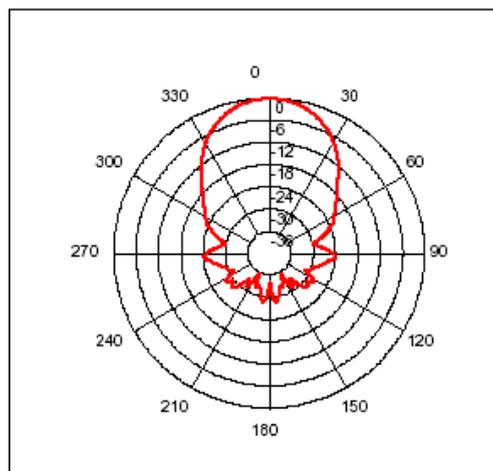
Achtung, die einschlägige deutsche Norm DIN 1319 1-4 vermeidet den Begriff und spricht stattdessen in Abschnitt 2 vom „Messaufnehmer“ als dem Beginn der Messkette. Entsprechend ist die Abgrenzung des eigentlichen Sensorbegriffes auch domainspezifisch und individuell unterschiedlich.



Parameter	Bedeutung
Messbereich	Ausdehnung erfassbaren physikalischen Messgröße (DIN 1319)
Auflösung	Vermögen physikalische Größen zu trennen und definiert über Granularitäten in Bezug auf Winkel, Entfernungen, Pixel usw.
Linearität	Abbildungsverhalten in Bezug auf den Zusammenhang zwischen Eingangsgröße und Ausgabewert. Im linearen Fall gilt $y = mx + n$
Meßfrequenz	Häufigkeit der Abtastung
Querempfindlichkeit	Abhängigkeit der Ausgabe von weiteren Parametern als der eigentlichen Messgröße
Ausgabeprotokoll	Ausgabeschnittstelle für die weitere Verarbeitung
Öffnungswinkel	Erfassungsbereich des Sensors bei gerichteter Datenerfassung
Energieaufnahme, Bauraum, ...	



[3]



[3]

Hinweis: Die Dämpfung eines Signals wird in "dB" angegeben und mittels  $L = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right)$  beschrieben.

Auf die Aspekte der Sensorfehler wird in der nächstfolgenden Veranstaltung eingegangen.

---

[3] Sensorkeulen verschiedener Ultraschallsensoren [robot electronics faq](#)

[Kino] Fliehkraftregler als Beispiel für die nicht elektrische Ausgabe von Messungen (Drehzahl) [Wikipedia Commons, Nutzer: Kino]

## Inertialsensorik

Ein Trägheitsnavigationssystem ermöglicht die Messung der Bewegungen über insgesamt sechs kinematische Freiheitsgrade. Über die physikalischen Beziehungen (Trägheits- und Impulsgesetze) der Größen

- Kraft,
- Beschleunigung,
- Winkelgeschwindigkeit (Drehrate),
- Geschwindigkeit

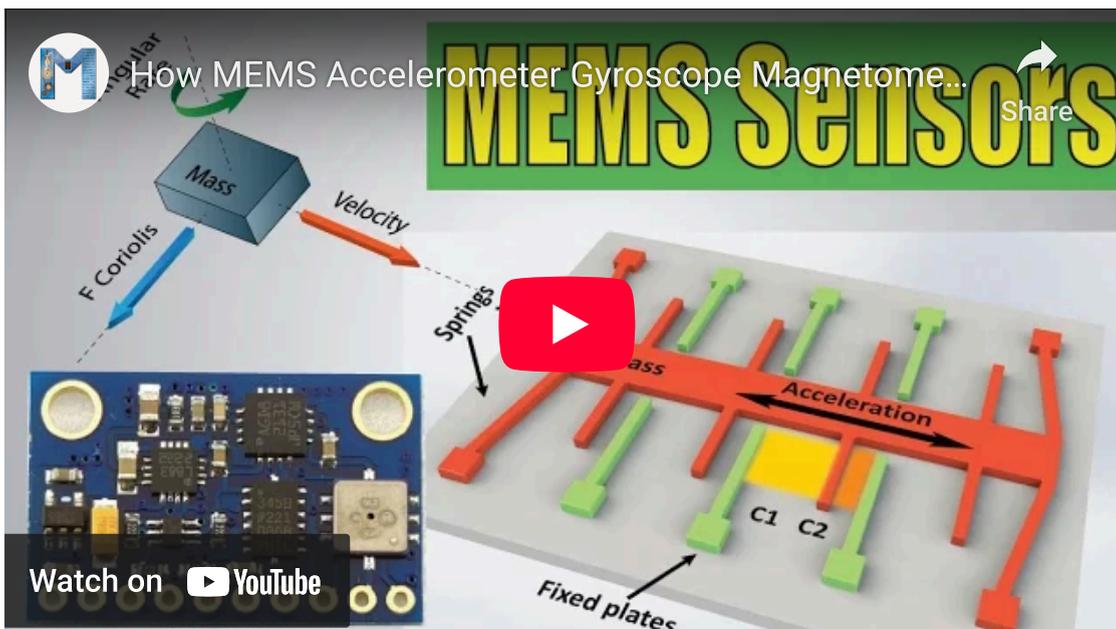
werden Positionsaussagen bestimmt. Hauptvorteil ist die Unabhängigkeit von jeglichen Ortungssignalen aus der Umgebung ist.

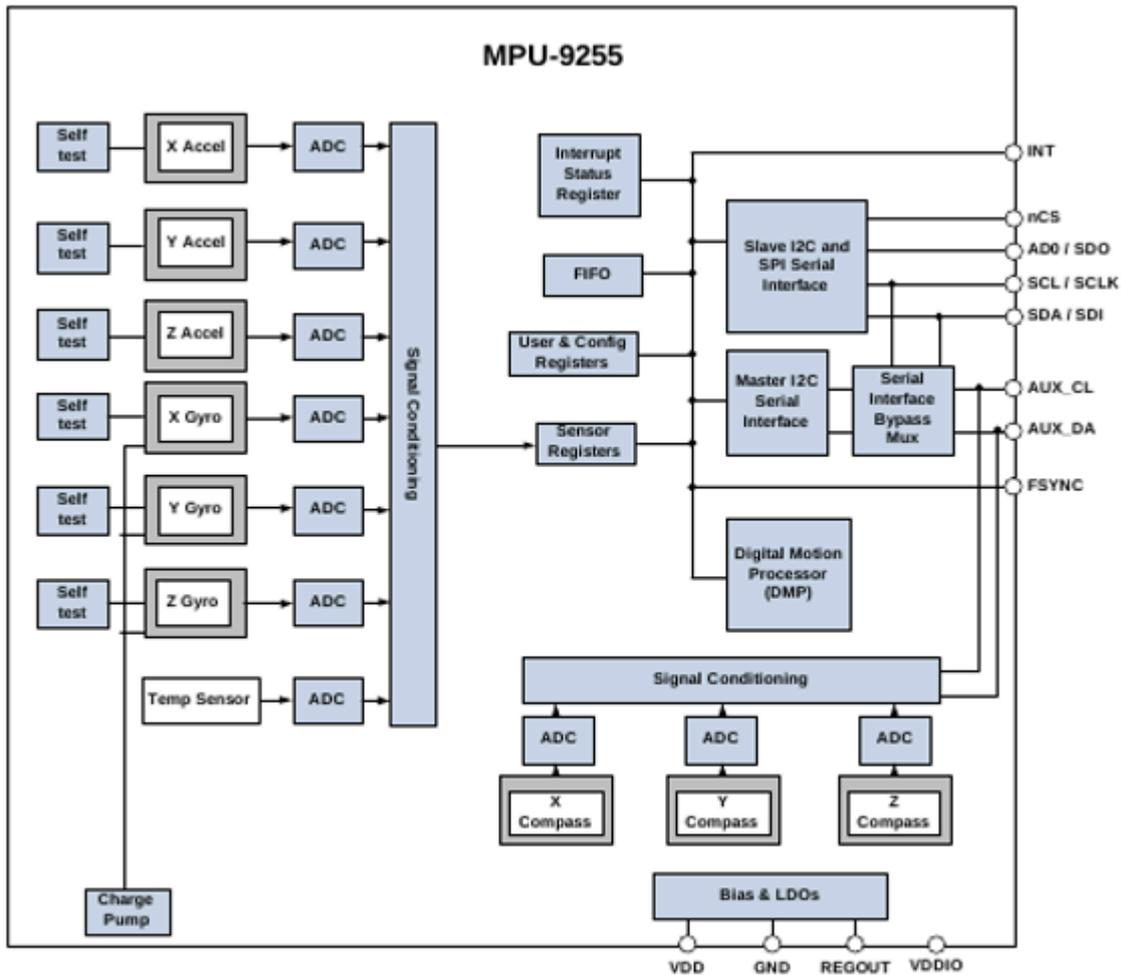
## Beschleunigungssensoren

Funktionsprinzip

Prinzip	Sensor
Dehnungsmesstreifen	... Bestimmung der Kraft auf die Testmasse, indem die Verformung der Befestigung (z. B. eines Stabes) mittels Dehnungsmesstreifen bestimmt wird.
Piezoelektrische Beschleunigungssensoren	... ein piezokeramisches Sensorplättchen wandelt Druckschwankungen in elektrische Signale um. Die Druckschwankung wird durch eine an der Piezokeramik befestigte (seismische) Masse erzeugt und wirkt bei einer Beschleunigung des Gesamtsystems auf die Piezokeramik.
Mikro-elektro-mechanische Systeme (MEMS)	Feder-Masse-Systeme, bei denen die „Federn“ nur wenige $\mu\text{m}$ breite Silicium-Stege sind und auch die Masse aus Silicium hergestellt ist. Durch die Auslenkung bei Beschleunigung kann zwischen dem gefedert aufgehängten Teil und einer festen Bezugselektrode eine Änderung der elektrischen Kapazität gemessen werden.

Konzentrieren wir uns auf das letztgenannte Konzept.

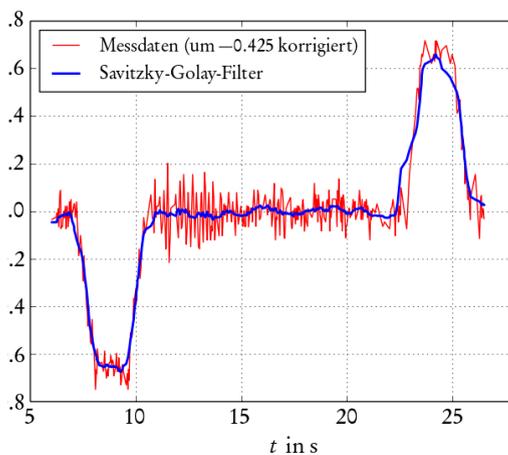




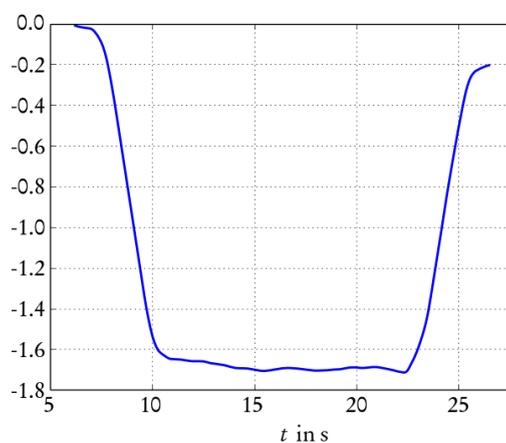
Handbuch MPU 9255 [\[InvenSense\]](#)

### Beispiel: Bewegung eines Fahrstuhles

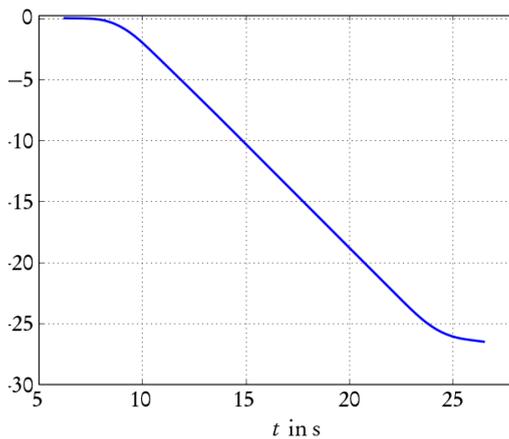
Aus den Samples des Beschleunigungssensors lässt sich mittels  $v = v_0 + \sum a_i \cdot t_i$  die Geschwindigkeit des Fahrstuhles bestimmen.



[Kling]



[Kling]



[Kling]

Aus der "Integration" der Samples über der Zeit folgt eine mangelnde Langzeitstabilität, daher koppelt man ein INS beispielsweise liefert eine Kombination mit einem Global Positioning System (GPS).

---

[InvenSense] *Handbuch MPU 9255* [InvenSense](#) ]

[Kling] *Aufzeichnung einer Fahrstuhlfahrt mit der IMU des Mobiltelefones* [Jordi Kling, [Zurückgelegter Weg einer Fahrstuhlfahrt mit Handysensorik](#) ]

## Gyroskope

Drehraten-Sensoren messen die Rotationsgeschwindigkeit eines Körpers. Durch Integration lässt sich daraus ableiten, um welchen Winkel sich ein Körper innerhalb einer Zeit gedreht hat. Die Drehraten um die drei Raumachsen bezeichnet man meist als

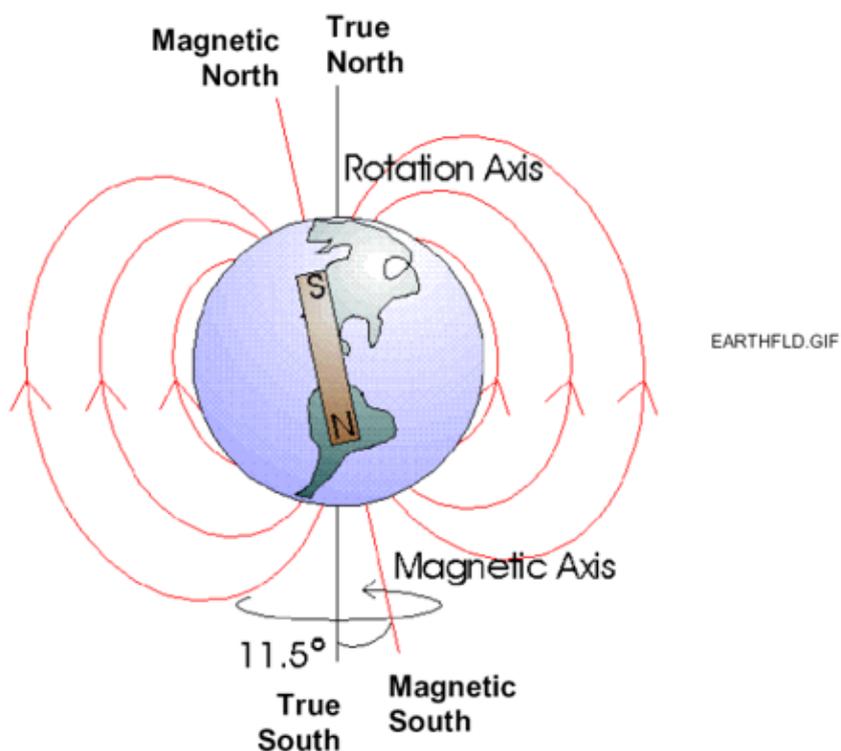
- Gierrate (Drehung um Hochachse, engl. yaw)
- Nickrate (Drehung um Querachse, engl. pitch)
- Rollrate (Drehung um Längsachse, engl. roll)

Wie kann man das Ganze anwenden?



## Kompassensoren

Das Erdmagnetfeld wird seit 1800 Jahren zur Orientierung verwendet. Der Kompass wird in Europa erstmals im 13. Jahrhundert erwähnt.



Die Abweichung zwischen geografischem und magnetischem Pol beträgt für Dresden im Januar 2021 ca.  $4,1^\circ$  in westliche Richtung.

Den Missweisungsrechner des GFZ Potsdam finden Sie unter [Link](#)

Messprinzip

Magnetfeldsensoren beruhen auf Wirkungen des magnetischen Feldes in hart- oder weichmagnetischen Werkstoffen, Halbleitern, ultradünnen Schichten, Lichtleitern, Flüssigkeiten oder deren Oberflächen.

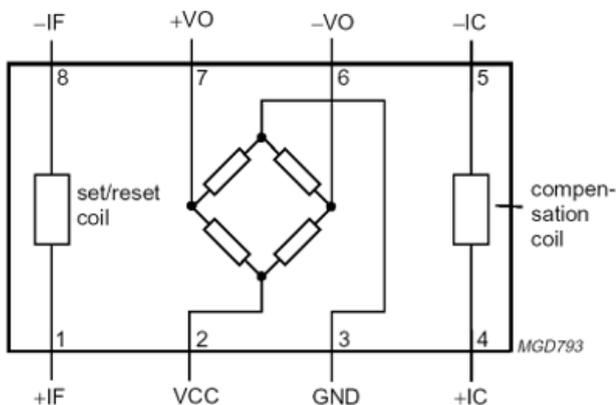
Prinzip	Sensor
Hall-basiert	... evaluiert die elektrische Spannung in einem stromdurchflossenen Leiter, der sich in einem Magnetfeld befindet. Die Spannung fällt dabei senkrecht sowohl zur Stromfluss- als auch zur Magnetfeldrichtung am Leiter ab.
Magneto-resistiv	... basierend auf dem magneto-resistiven Effekt ändert sich der Widerstand eines Leiters, sofern er von einem Magnetfeld umgeben ist.

Letztgenanntes Messprinzip basiert auf den 1857 von Lord Kelvin beschriebenen magneto-resistiven Effekt.

$$R = R_0 \cdot \left(1 + \frac{\Delta R}{R} \cdot \cos^2 \alpha\right)$$

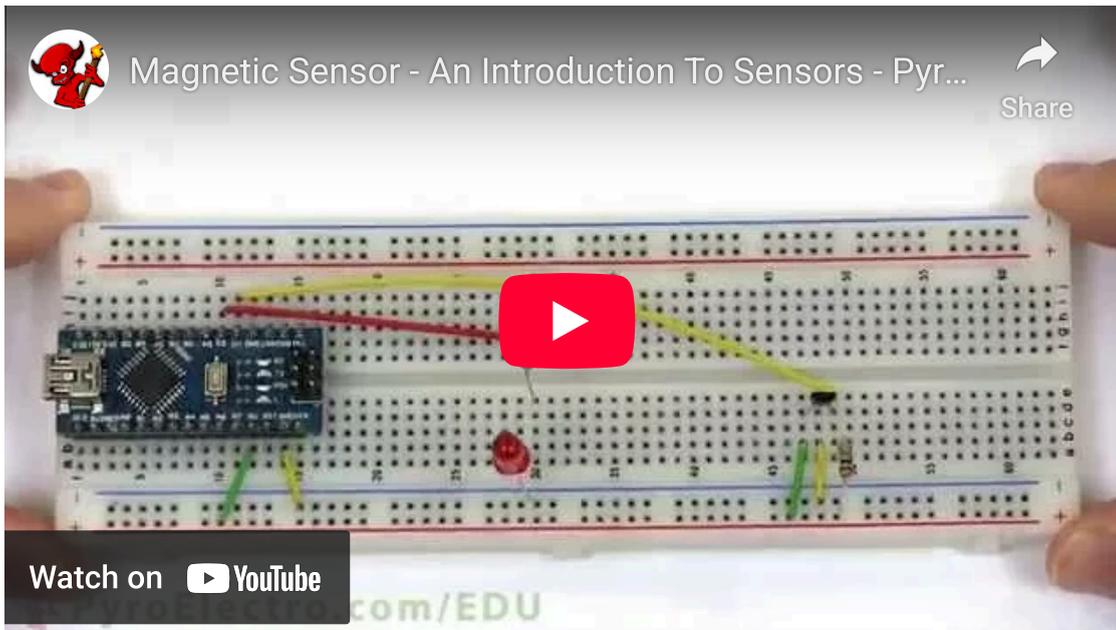
Der elektrische Widerstand hängt von der Ausrichtung  $\alpha$  einer ferromagnetischen Dünnschichtlegierung innerhalb eines äußeren Magnetfeldes ab. In der Regel kommen dafür gemischte Legierungen zum Einsatz, beispielsweise Eisen und Nickel. Die Sensoren sind ausgesprochen klein.

### Magneto-resistiver Sensor



Interne Struktur eines KMZ52 Sensors\* [Honeywell Electronics 1996](#) ]

### Hall Sensor



Achtung: Insbesondere bei Innenraumanwendungen unterliegen Kompassse starken Störungen.

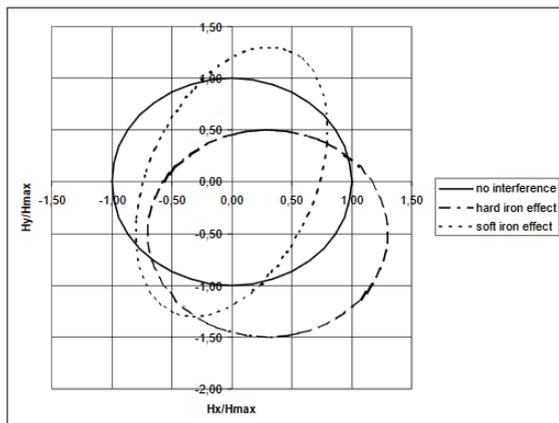
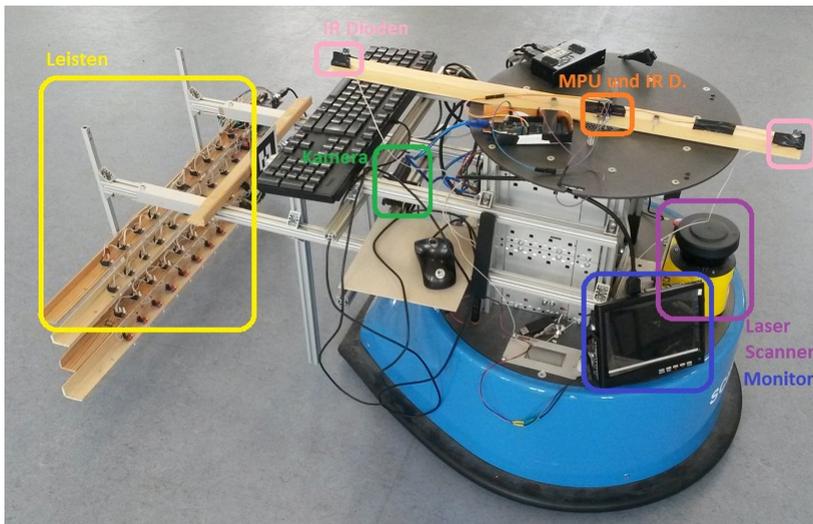
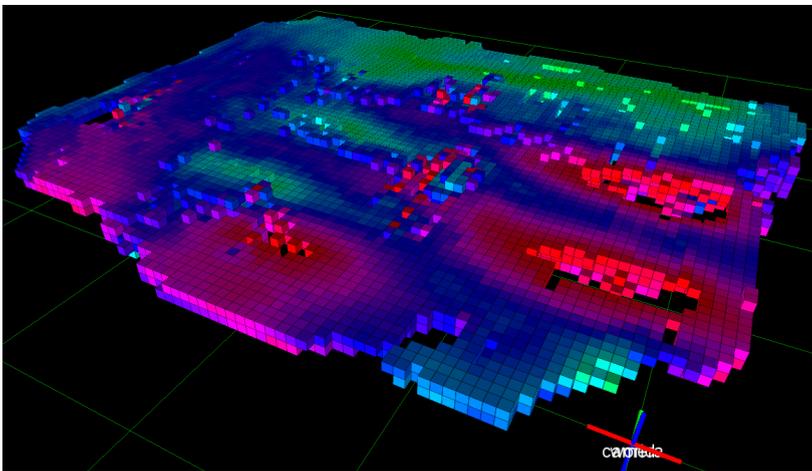


Figure 20 Typical test diagrams showing hard iron and soft iron effects

Klassen von Störungen für Kompassensoren [Philips Electronic Compass Designing KMZ51 and KMZ52](#)



Robotersystem mit einem Array von Magnetfeldsensoren zur Datenerfassung [Dissertation Filip Filipow]

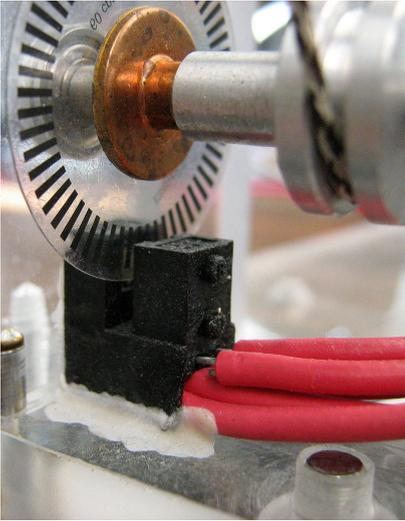


Flächige Aufnahme der Richtungsinformationen des Magnetfeldes [Dissertation Filip Filipow]

## Odometrie

Wie erfassen wir die Position eines rotierenden Elements, zum Beispiel eines Motors, um davon auf die Bewegung zu schließen?

- Schleifdrähte (unterschiedliche Leitfähigkeit)
- magnetische Sensoren (Nord-Südpol-Wechsel)
- photoelektrische Abtastung
- induktive System mit entsprechenden Triggern (zum Beispiel größeres Zahnrad)



Encoder mit Gabellichtschranke [Wikipedia Commons, Autor Tycho](#)

Die Zahl der Zustands-/Flankenwechsel pro Zeiteinheit ist direkt proportional zur Rotationsgeschwindigkeit.

**Inkrementelle Kodierung:** zur Bestimmung der relativen Lage/Drehgeschwindigkeit anhand einer Impulsfolge, Abwägung der Impulszahl pro Drehung von der

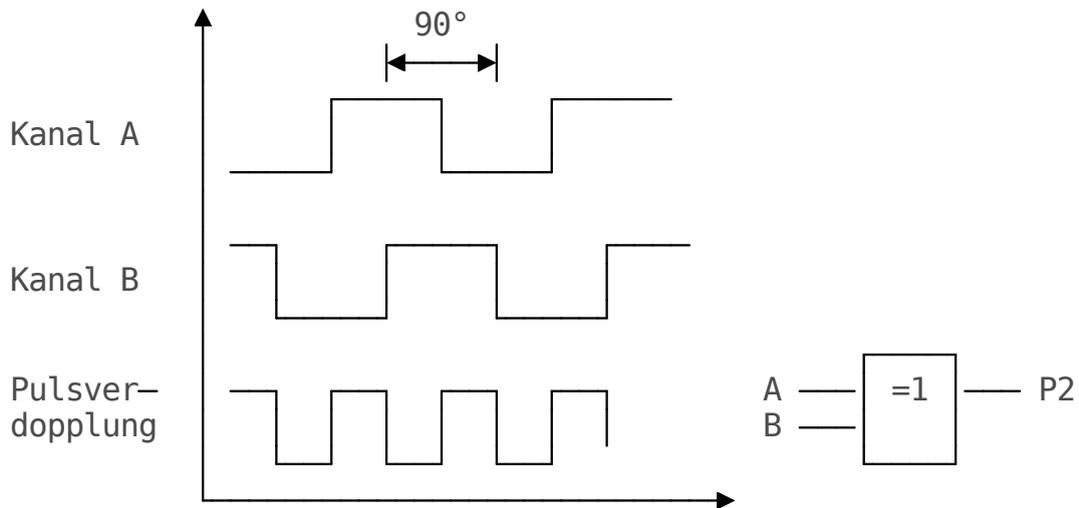
- Leistungsfähigkeit der Auswertehardware
- Drehzahlen
- Störgrößen

**Absolute Kodierung:** Lageermittlung gegenüber einem Fixpunkt, aufwendige Drehimpulsgeber bis hunderttausenden Impulsen pro Umdrehung, häufigste Codierung: Gray-Code (nur auf einem Ausgangssignal findet eine Signaländerung)

Ein inkrementeller Encoder kann durch eine externe Beschaltung als absolute Kodierung genutzt werden. Über einen Nullschalter, wird ein Zähler resetet, der dann im Treiber die aktuelle Position durch Dekrementierung oder Inkrementierung bestimmt.

Das Konzept eines einfachen Einkanal-Drehimpulsgeber (nur 1 Bit (Hell - Dunkel Übergang)) wird in der Praxis in zwei Richtungen erweitert:

1. Die Integration einer weiteren Spur, des Nullindex erweitert die Fehlertoleranz. Er ist auf dem Umlauf nur einmal aktiv. Der Nullindex kann zur Definition eines Schaltpunktes, zur Zählung der Umdrehungen oder zur Synchronisation eines nachgeschalteten elektronischen Zählers eingesetzt werden.
2. Zweikanal-Drehimpulsgeber erweitern das Konzept mit einem weiteren optischen Schrankensysteme, das um 90 Grad phasenverschoben ist. Damit kann sowohl die Drehrichtung, als auch eine Vervielfachung der Impulse realisiert werden.



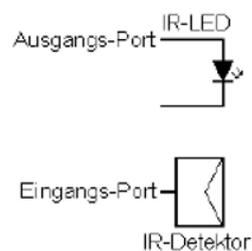
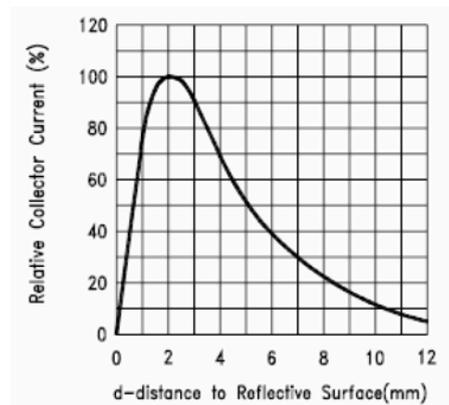
## Entfernungsmessung

Entfernungen lassen sich unabhängig von der Modalität mit vier grundlegenden Verfahren erfassen.

- Amplitudenbasiert
- Laufzeitbasiert
- Phasenbasiert oder
- Trigonometisch

## Amplitudenmessung

Die Größe eines Messsignals wird als Indikator für die Entfernung zum Objekt genutzt.



Infrarot Distanzsensor auf Reflexionsbasis <sup>[AVAGO]</sup>

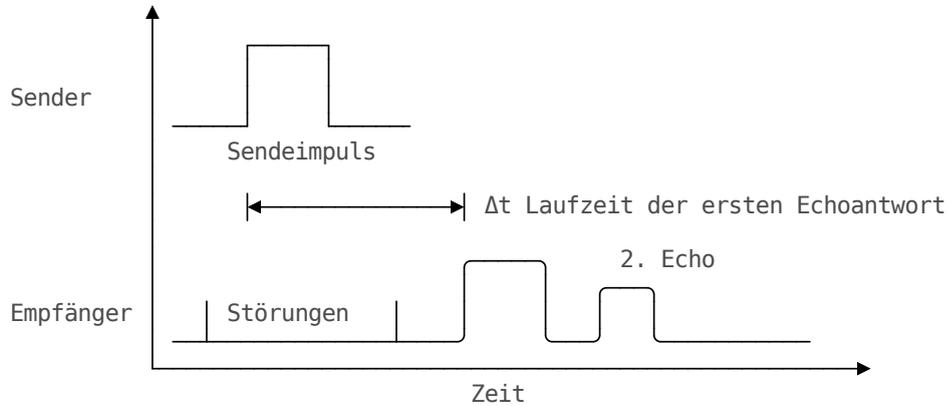
Analoge Konzepte finden sich auch für berührungslose Schalter auf kapazitiver Basis.

Nachteile:

- Starke Abhängigkeit des Ausgabewertes vom Objekt und der Umgebungssituation
- Totbereich

# Laufzeitmessung

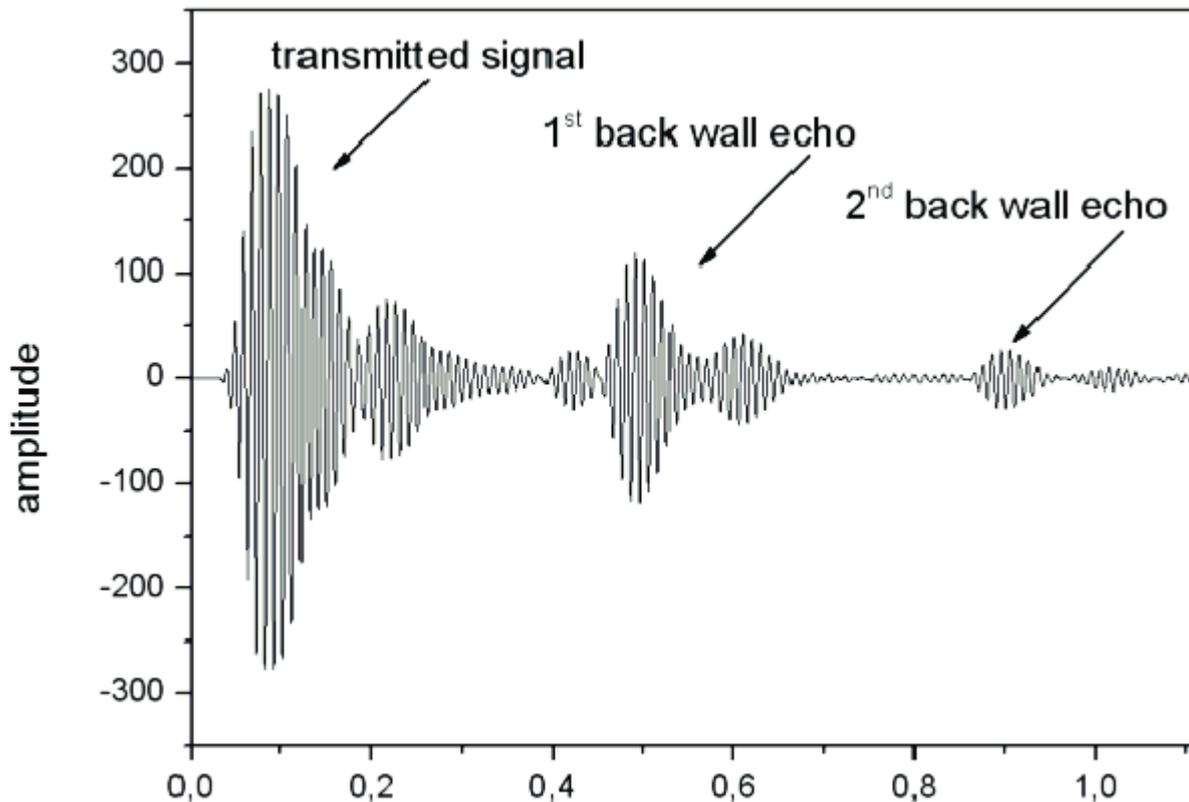
Das Laufzeitverfahren basiert auf der Messung des Zeitversatzes zwischen dem Aussenden eines Impulses und dem Empfang von dessen Reflexion.



Prominentestes Beispiel für Laufzeitsensoren sind ultraschallbasierte Systeme.

Aussenden eines Schallimpulses und Messung der Laufzeit des Echos Entfernung (in m)  $d = 1/2 c t$  aus Laufzeit  $t$  (in s) des Übliche Frequenzen: 40kHz bis 200kHz

## Herausforderung 1: Identifikation des Impulses

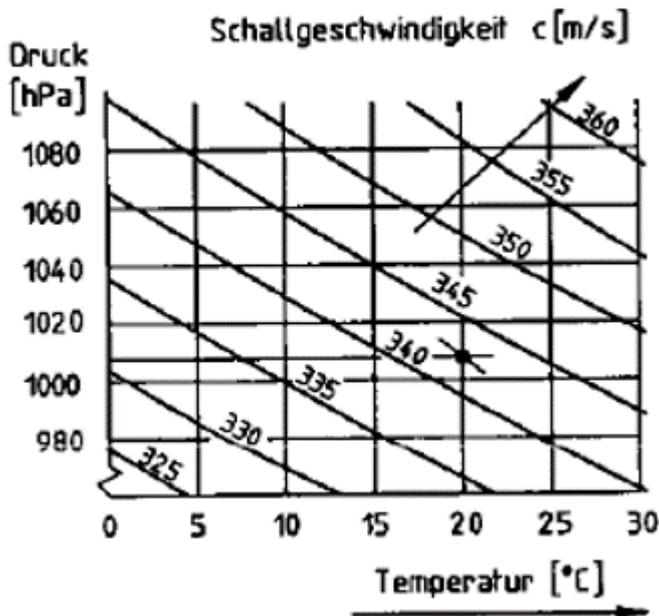


[3]

## Herausforderung 2: Querabhängigkeiten

Neben den Reflexionsmechanismen sind auch die Ausbreitungsparameter des Schallimpulses von der Umgebung abhängig. Die Schallgeschwindigkeit ist abhängig von

- Temperatur
- Luftdruck
- Luftzusammensetzung (Anteil von CO<sub>2</sub>, Luftfeuchte)



Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Luftdruck

Welchen Einfluss haben diese Größen? Für zwei Konfigurationen, die zwei unterschiedliche Wetterlagen repräsentieren ergibt sich bereits ein Fehler von 8%.

$$v_1(980hPa, 0^\circ) = 325 \frac{m}{s}$$

$$v_2(1040hPa, 30^\circ) = 355 \frac{m}{s}$$

Das Konzept lässt sich aber auch auf höherfrequente Signale (Licht, Radar) übertragen. Mit der höheren Frequenz sinkt die Dämpfung in der Luft. Damit lassen sich dann größere Reichweiten umsetzen.

TOF-Kameras (englisch: time of flight) verwendeten PMD (Photonic Mixing Device)-Sensor, die Szenen mittels eines Lichtpulses ausleuchten. Die Kamera misst für jeden Bildpunkt die Zeit, die das Licht bis zum Objekt und wieder zurück braucht. Die benötigte Zeit ist direkt proportional zur Distanz. Für 2.5 Meter bedeutet dies eine Zeitdauer von:

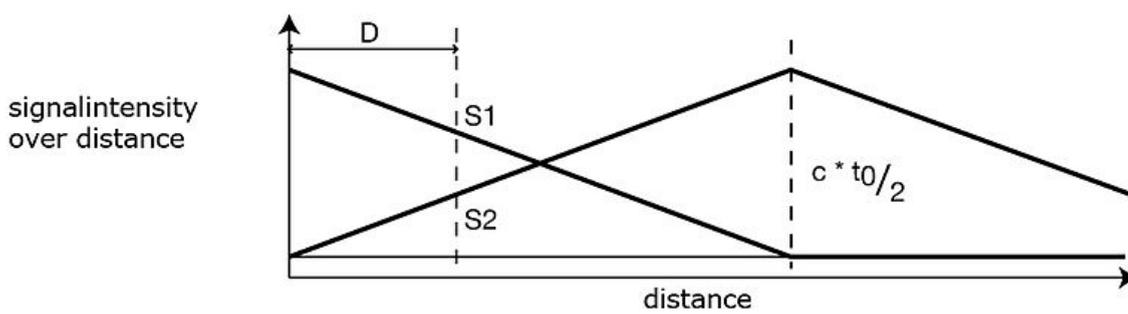
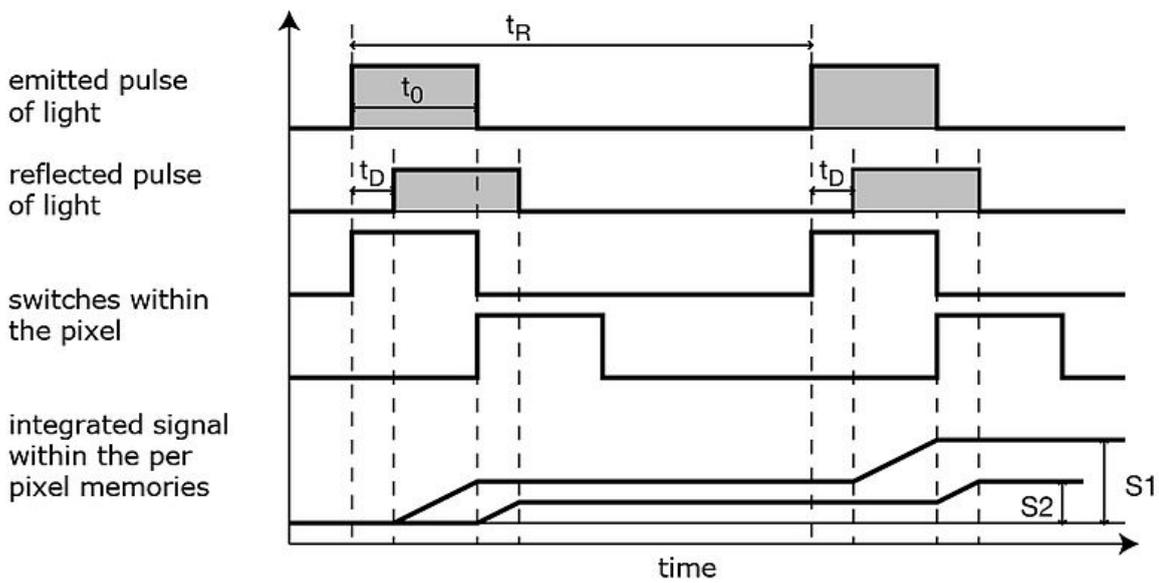
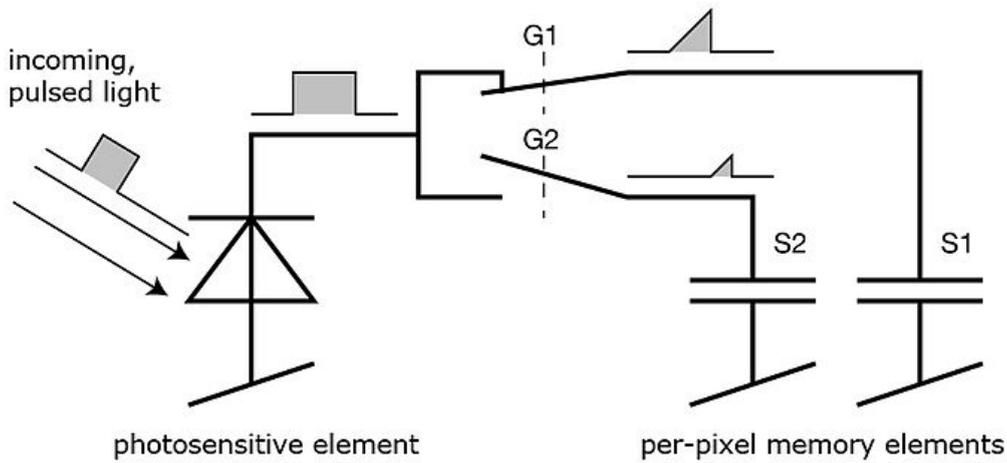
$$t_D = 2 \cdot \frac{D}{c} = \frac{2.5m}{300.000.000m/s} = 16.66ns(!)$$

Für einen 50ns breiten Impuls bedeutet dies, dass die maximale Distanz

$$D_{max} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t_0 = 7.5m$$

Allerdings sind die Systeme in starkem Maße von der Hintergrundbeleuchtung abhängig. Trotz Filtern stören irreguläre Beleuchtungsanteile die Messung. Eine Lösungsmöglichkeit ist die redundante Messung über zwei phasenverschobene Elemente. Im Bild werden zwei Speicherelemente S1 und S2 durch zwei Schalter G1 und G2 aktiviert. S1 integriert die Spannung über dem photosensitiven Element auf, bis die Aussendung abgeschlossen ist. Danach wird G2 aktiviert und S2 zeichnet den verbleibenden Impulsanteil auf. Der Distanzwert ergibt sich zu:

$$D = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t_0 \cdot \frac{S2}{S1 + S2}$$



Schematische Darstellung der Funktionalität eines TOF Pixels <sup>[4]</sup>

Die Kamera liefert somit für jeden Bildpunkt die Entfernung des darauf abgebildeten Objektes. Das Prinzip entspricht dem Laserscanning mit dem Vorteil, dass eine ganze Szene auf einmal aufgenommen wird und nicht abgetastet werden muss.

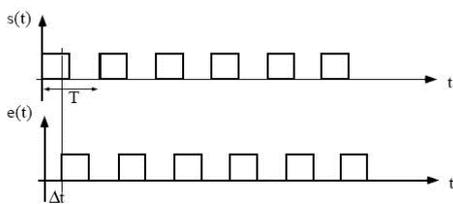
Vorteile	Nachteile
Einfacher Aufbau ohne bewegliche Teile (vgl. konventioneller Laserscanner)	Einfluß von Hintergrundlicht
Synchrones Abbildungsverhalten	Gegenseitige Störung
Musterunabhängigkeit (vgl. Stereokameras)	Mehrfachreflexionen

[3] *Sendeimpuls und Echo eines Ultraschallsensors* aus G. Schober et al., Degree of Dispersion Monitoring by Ultrasonic Transmission Technique and Excitation of the Transducer's Harmonics, [Link](#)

[4] *Schematische Darstellung der Funktionalität eines TOF Pixels* [Wikimedia Commons](#), [Autor Captaindistance](#)

## Phasenverschiebung

Die Phasenverschiebung des reflektierten Laserstrahls oder dessen Modulation gegenüber dem ausgesandten Strahl ist entfernungsabhängig.



[5]

Der zentrale Nachteil des Verfahrens besteht darin, dass die Messung des Phasenunterschieds oberhalb einer Phasendifferenz von mehr als 360 Grad wegen des periodischen Charakters keine eindeutige Aussage zum Abstand mehr zulässt.

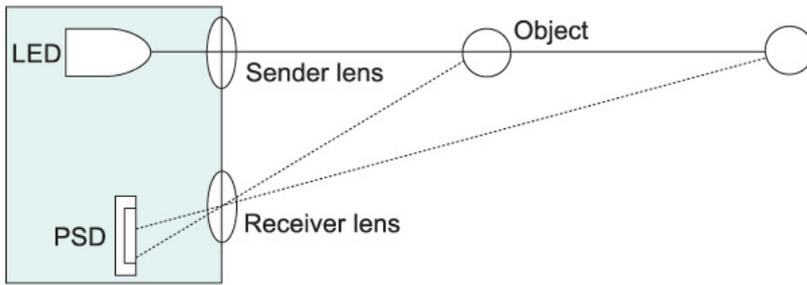
$c = f \cdot \lambda$  für  $f = 5\text{MHz}$  ergibt sich eine Wellenlänge von 60m.

Eine Lösung besteht darin verschiedene Frequenzen unterschiedlicher Wellenlänge durchzuschalten und durch logische Vergleiche der Messwerte eine große Reichweite und zudem eine hohe Genauigkeit erreichen.

[5] *Phasenverschiebung zwischen einem ausgesandten und dem empfangenen Signal* [Wikimedia Commons](#), [Autor Guy Muller](#)

## Triangulation

Triangulationsverfahren setzen auf einem bekannten Abstand zwischen von Empfänger und Sender auf. Die sogenannte *Baseline* ist dann Ausgangspunkt für die Bestimmung des Abstandes. An dieser Stelle seien zwei Beispiele gezeigt:

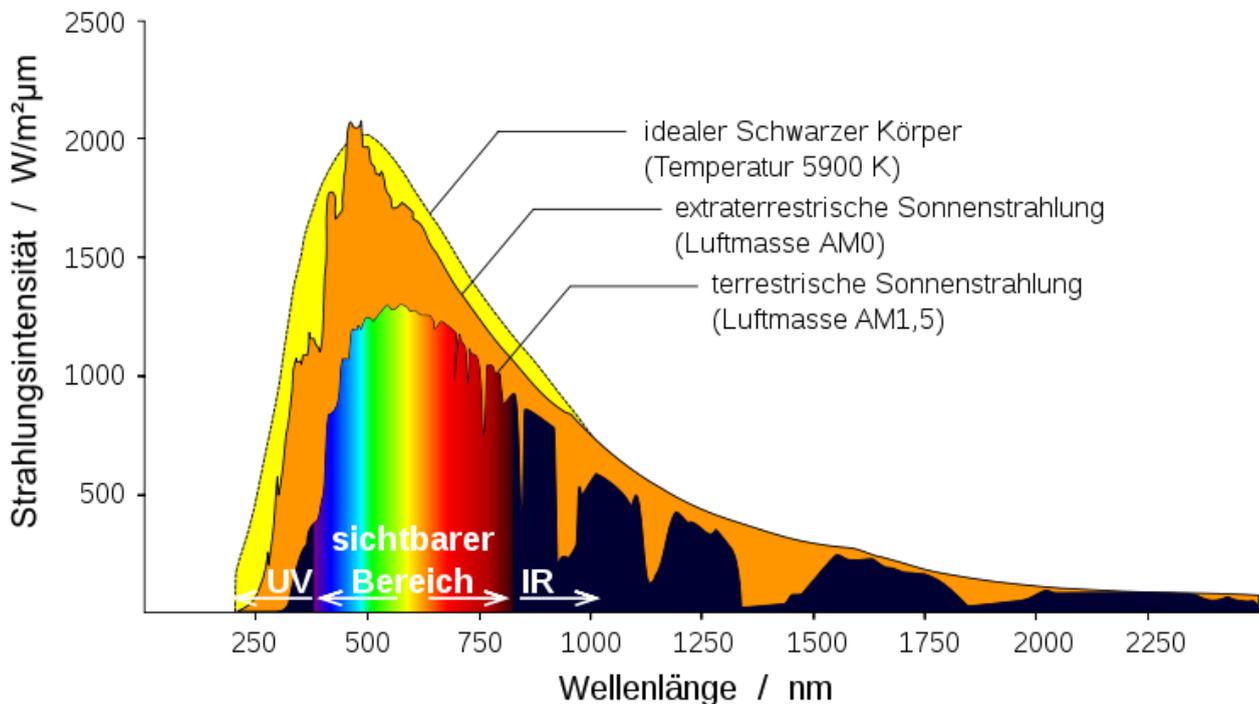


Funktionsweise eines einfachen IR-Distanzsensors nach dem Triangulationsprinzip [Link](#)

Anwendung findet dieses Konzept auch bei RGB-D Kameras, sowohl bei Infrarotbasierten Systemen als auch bei Stereokameras.

## Exkurs - Vorteile des Infrarotspektrums

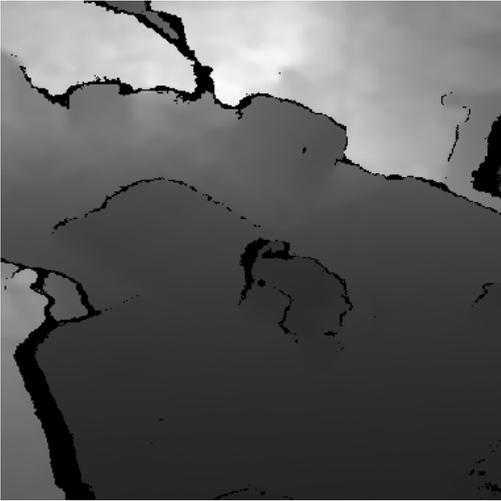
- Fremdlichtunabhängigkeit
- Diodenspezifika
- Nicht sichtbar



Spektrum der Strahlungsintensität [Wikipedia Commons](#)

## Anwendung der Messverfahren in 3D Kameras

Zielstellung: Darstellung der Umgebung in mit einem Sensor in einer mehrdimensionalen Darstellung



Eine Punktwolke *Point Cloud* ist eine Menge von Punkten eines Vektorraums, die eine unorganisierte räumliche Struktur aufweist. Die Kontur eines Objektes wird durch die in der Punktwolke enthaltenen Einzelpunkte beschrieben, die jeweils durch ihre Raumkoordinaten erfasst sind. Zu den Punkten können zusätzlich Attribute, wie z. B. geometrische Normalen, Farbwerte, Aufnahmezeitpunkt oder Messgenauigkeit, erfasst sein.

### Umsetzung

- Time of Flight (TOF)
- Structured Light



- Passiv Stereo (Triangulation)
- Active Stereo

### Nachteile

- *Time of Flight*-Systeme leiden unter Bewegungsartefakten und Mehrwege-Interferenzen.
- *Structured Light* ist anfällig für Umgebungsbeleuchtung und Interferenzen mehrerer Geräte.
- *Passiv-Stereo* kämpft in texturlosen Regionen, wo teure globale Optimierungstechniken erforderlich sind

## Beispielanwendung in ROS1 - Ultraschall

Als Anwendungsbeispiel sollen die grundlegenden Herausforderungen anhand zweier Sensoren verdeutlicht werden:

Sensor	HC-SR04	GP2D12
Modalität	Ultraschall	Infrarotes Licht
Funktionsprinzip	Laufzeit	Trigonometrie
Reichweite	400cm	10-80cm
Schnittstelle	Digital	Analog

Diese spezifischen Sensortypen spielen, obwohl die Reichweiten mit bis zu 400cm für den Ultraschallsensor angegeben werden nur in der unmittelbaren Nahfeldüberwachung eine Rolle. Häufig werden sie aber durch Laserscanner ersetzt.

Die Messdaten beider Sensoren werden über einem Raspberry PI Pico erfasst und mit [microROS](#) über die serielle Schnittstelle kommuniziert. Dies eröffnet die Möglichkeit Publish/Subscribe Methoden auch mit Geräten ohne Ethernetverbindung "nachzubilden".

Entfernungen werden unter ROS als `sensor_msgs/Range.msg` dargestellt.

ROS handhabt die Messdaten für die Länge, Masse, Zeit und den Strom in SI Einheiten. In einigen Fällen weicht man davon ab (Temperaturangaben in Grad Celsius) ! [Link](#)

```
Header header          # timestamp in the header is the time the range
.....                # returned the distance reading

# Radiation type enums
# If you want a value added to this list, send an email to the ros-users list
uint8 ULTRASOUND=0
uint8 INFRARED=1

uint8 radiation_type   # the type of radiation used by the sensor
.....                # (sound TR etc) [enum]
```

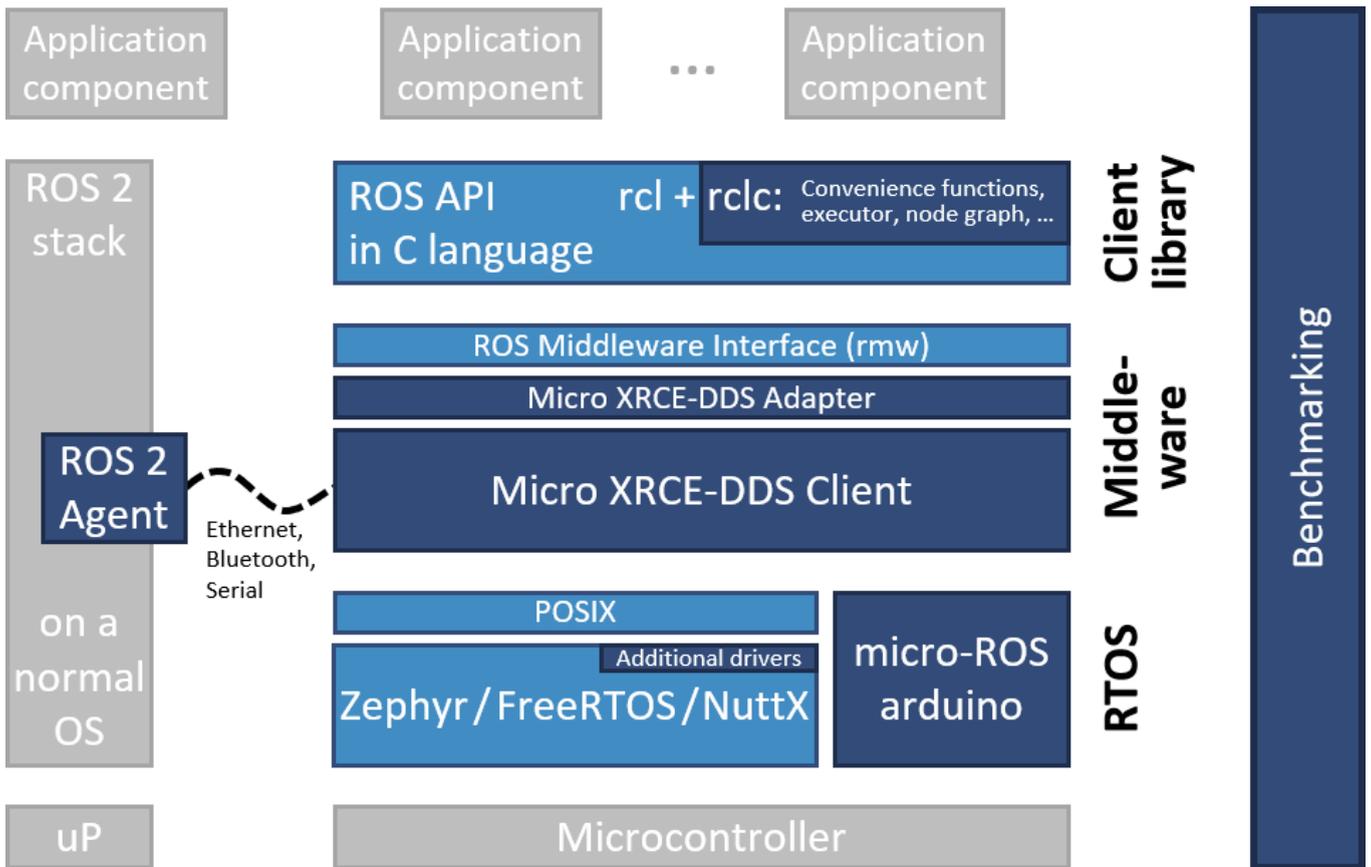
```

float32 field_of_view # the size of the arc that the distance reading is
                      # valid for [rad]
                      # the object causing the range reading may have
                      # been anywhere within -field_of_view/2 and
                      # field_of_view/2 at the measured range.
                      # 0 angle corresponds to the x-axis of the sensor.

float32 min_range     # minimum range value [m]
float32 max_range     # maximum range value [m]
                      # Fixed distance rangars require min_range==max_range

float32 range         # range data [m]
                      # (Note: values < range_min or > range_max
                      # should be discarded)
                      # Fixed distance rangars only output -Inf or +Inf.
                      # -Inf represents a detection within fixed distance
                      # (Detection too close to the sensor to quantify)
                      # +Inf represents no detection within the fixed distance
                      # (Object out of range)

```



ROS2 Architektur



```
...

// The GPIO pins to which the sonar is wired
#define GPIO_ECHO 6
#define GPIO_TRIGGER 7

/**
 * @brief Get the range value in meter.
 */
float read_range() {

    // Send an impulse trigger of 10us
    gpio_put(GPIO_TRIGGER, 1);
    sleep_us(10);
    gpio_put(GPIO_TRIGGER, 0);

    // Read how long is the echo
    uint32_t signaloff, signalon;
    do {
        signaloff = time_us_32();
    } while (gpio_get(GPIO_ECHO) == 0);

    do {
        signalon = time_us_32();
    } while (gpio_get(GPIO_ECHO) == 1);

    // Actual echo duration in us
    const float dt = signalon - signaloff;

    // distance in meter:
    // echo duration (us) x speed of sound (m/us) / 2 (round trip)
    return dt * 0.000343 / 2.0;
}

...

/**
 * @brief Read the range from the sensor,
 * fill up the ROS message and publish it.
 */
void timer_callback(rcl_timer_t *timer, int64_t /*last_call_time*/) {
    if (timer) {
        range_msg.range = read_range();
        fill_msg_stamp(range_msg.header.stamp);
        rcl_publish(&publisher, &range_msg, NULL);
    } else {
        printf("Failed to publish range. Continuing.\n");
    }
}
```

```
}  
  
...
```

## Beispielanwendung - Intel Realsense

Im Beispiel wird eine Intel Realsense 435 verwendet. Dieser Sensor implementiert das Active Stereo Verfahren [Link](#).

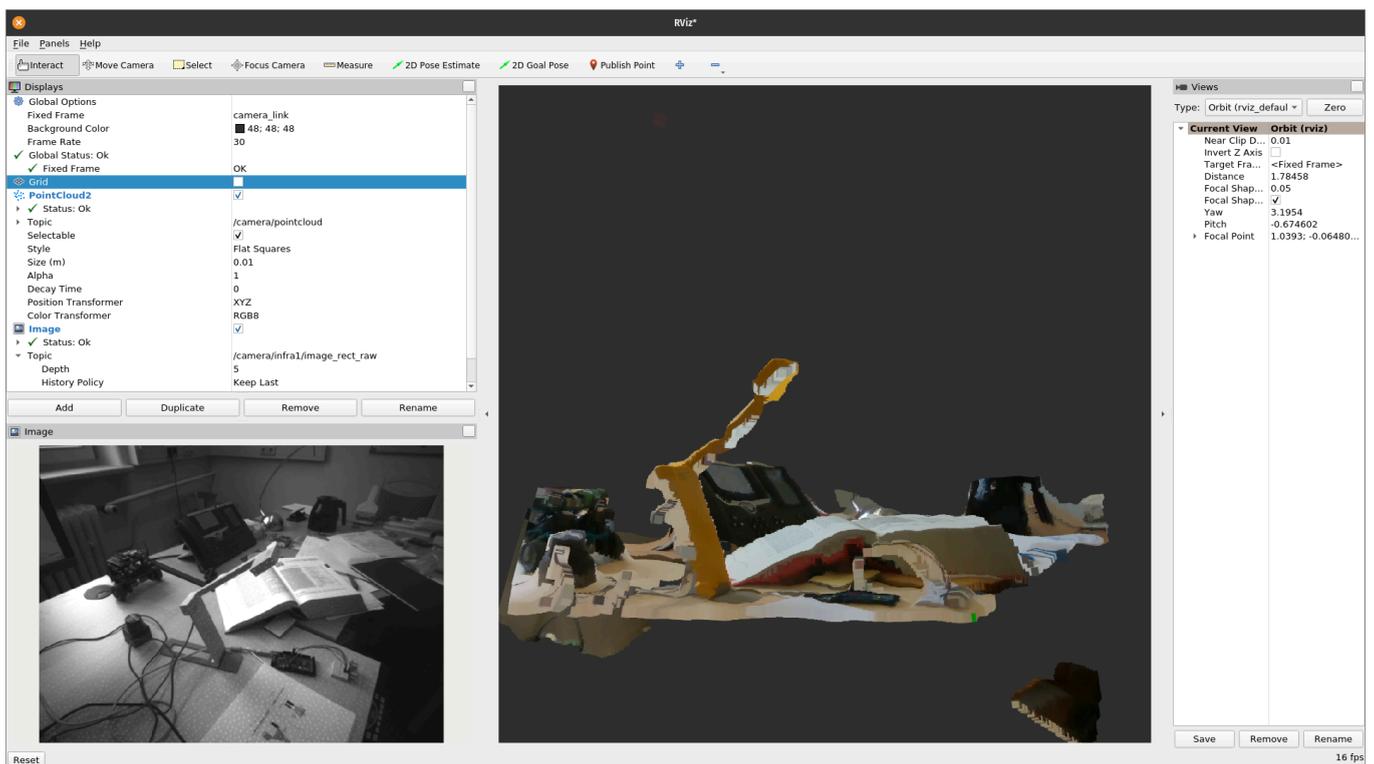
Die Installation der Treiber ist unter

[https://index.ros.org/r/ros2\\_intel\\_realsense/](https://index.ros.org/r/ros2_intel_realsense/)

beschrieben.

```
ros2 run realsense2_camera realsense2_camera_node --ros-args -p filters  
:=pointcloud
```

Der Point-Cloud Datentyp ist unter [Link](#) beschrieben.



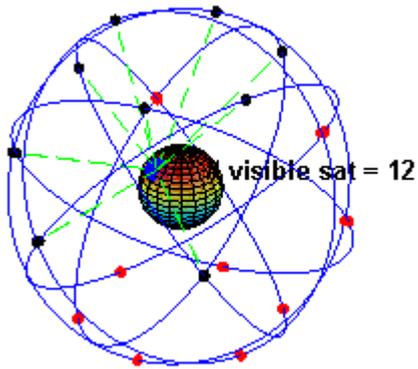
## Positionsbestimmung mittels GNSS

Globales Navigationssysteme dienen der Positionsbestimmung und Navigation auf der Erde und in der Luft durch den Empfang der Signale von Navigationssatelliten und Pseudoliten.

Die Systeme bestehen aus:

- Weltraumsegment (mind. 24 Satelliten auf 6 Umlaufbahnen) - 4 bis 8 Satelliten sind immer sichtbar
- Kontrollsegment (Kontrollstationen)
- Benutzersegment (passive Empfänger)

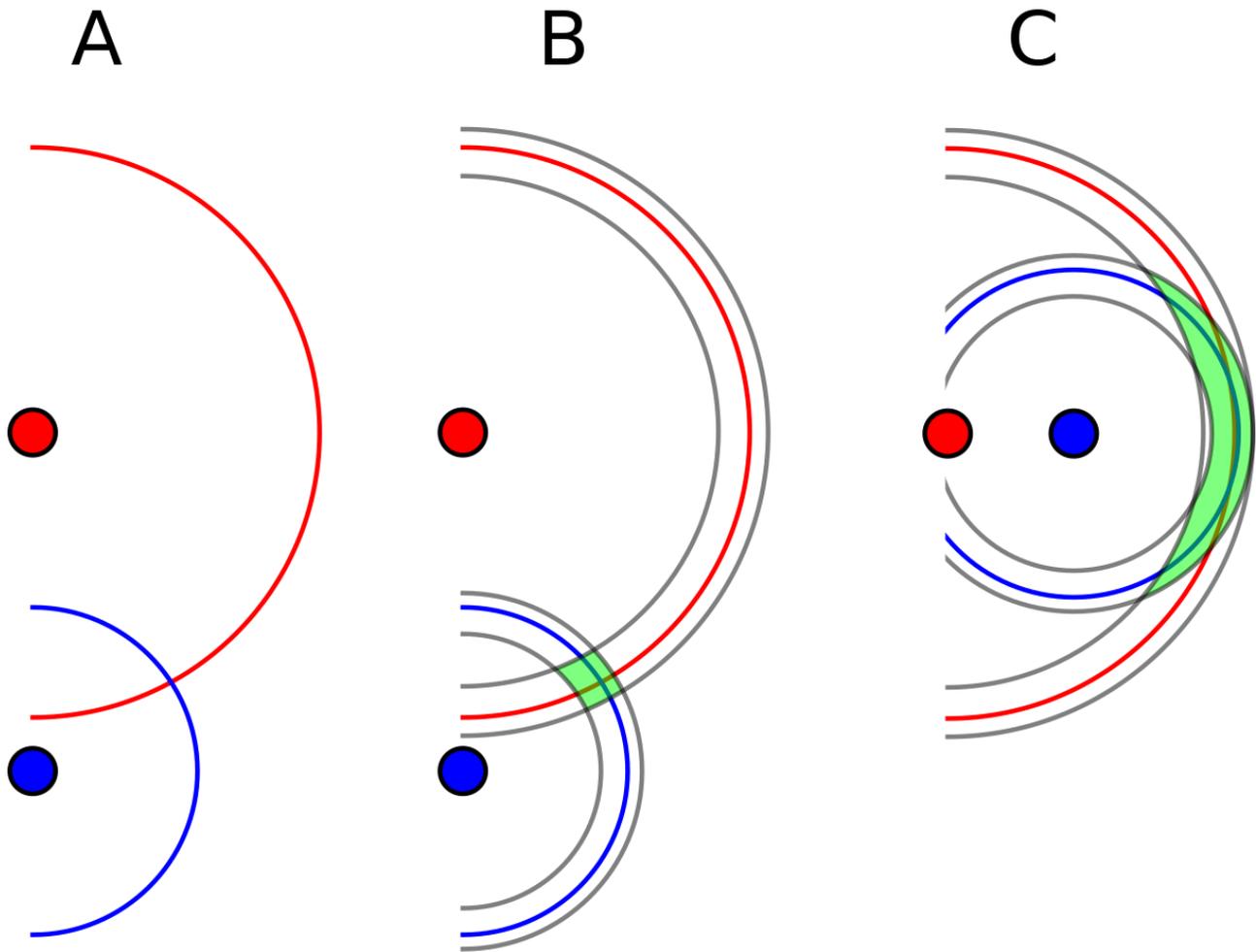
Etablierte Systeme: GPS, Galileo (Europa), GLONASS (Russland), BeiDou (China),



Bewegung der GPS Satelliten um die Erde [\[WikimediaGPS\]](#)

Ausgehend vom Zeitstempel der Satellitennachrichten werden die Distanzen zu den bekannten Satellitenpositionen bestimmt. Anhand der Signale von 3 Satelliten kann eine Kugelschnitt bestimmt werden.

Die Satellitenanordnung beeinflusst Lokalisierungsgüte (schleifender Schnitt)



Qualität der Positionsbestimmung in Abhängigkeit von der Konfiguration der Satellitenpositionen [\[WikimediaDoP\]](#)

### Fehlerquellen

- "selective availability" (SA) bis 2. Mai 2000 - künstliche Verfälschung der vom Satelliten übermittelten Uhrzeit im L1 Signal. Schwankungen um ca. 50 m in schmalen Zeitfenstern
- Abblocken der Signale durch Hindernisse
- Mehrwegeeffekte wegen Reflexionen an Umgebungsobjekten
- Atmosphärische Effekte (Brechung, Geschwindigkeitsreduktion, unterschiedliche Strecken in verschiedenen Schichten)

Satellitengestützte Zusatzsysteme (Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS)), sind das europäische EGNOS, das US-amerikanische WAAS, die die Korrektursignale über geostationäre Satelliten abstrahlen, um letztgenannten Fehlertyp zu kompensieren.

Durch stationäre Empfangsstationen kann die Positionsgenauigkeit verbessert werden. Sie übermitteln Korrektursignale (DGPS) an den eigentlichen Nutzer: + von den Landesvermessungsämtern wird das deutsche SAPOS-System betrieben. SAPOS stellt drei verschiedene Signaldienste zur Verfügung, die eine

Genauigkeit von bis zu unter 1 cm erreichen. + eigene eingemessene Basisstationen im Kommunikationsbereich der mobilen Station.

### Vorhersage von Signalqualitäten



[WikimediaDoP] Wikipedia, Autor Xoneca, Example of Geometric Dilution Of Precision (GDOP) for simple Triangulation. Three different situations are shown: A) Triangulation. B) Triangulation with error. C) Triangulation with error and poor GDOP. [Link](#)

[WikimediaGPS] Wikipedia, Autor El pak, [Link](#)

## Aufgabe der Woche

- Die Messdaten der Distanzsensoren wurden in einem Bag-File aufgezeichnet, das sich im Projektordner unter Examples findet. Starten Sie den Importer für ROS1 Bag-Files und visualisieren Sie den Signalverlauf. Schreiben Sie einen Knoten, der die eingehenden Messwerte anhand eines Schwellwertes prüft und ggf. einen Signalton erzeugt, wenn dieser unterschritten wurde.