

Robotik

WS 2019/2020

Prof. Dr.-Ing. Jean Meyer

Session 3 - Sensoren

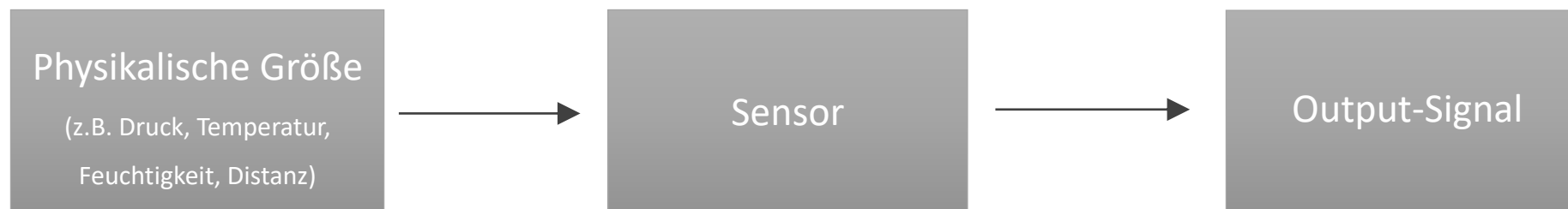
Vorlesungsinhalte

- Sensor-Grundlagen
- Interne und externe Sensoren
- Aktive und passive Sensoren
- Anforderungen an Sensoren
- Funktionsprinzipien relevanter Sensoren
- Praxisbeispiele

Grundlagen

Sensoren – Grundlagen:

- Sensoren wandeln physikalische Größen und Zustände in elektrische Signale



- das “Rohsignal” muss zur Verwertung i.d.R. transformiert bzw. aufbereitet werden, z.B. durch Digitalisierung, Verstärkung, Linearisierung



- die transformierten Signale werden der Robotersteuerung zugeführt, wo sie verarbeitet oder gespeichert werden

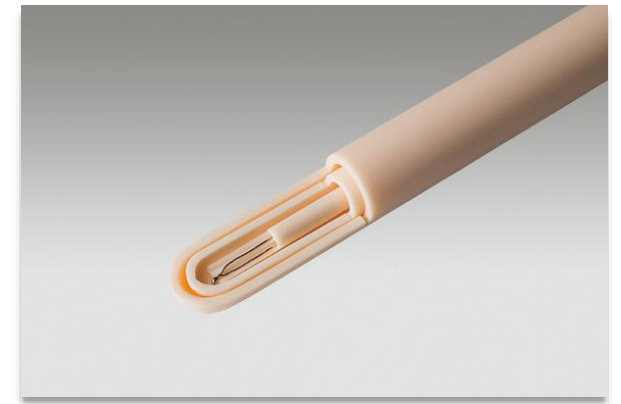
Sensoren - Grundlagen:

- zur Erfassung physikalischer Größen nutzen Sensoren unterschiedliche physikalische Effekte
- i.d.R. stehen zur Erfassung einer Größe mehrere physikalische Effekte zur Verfügung, z.B. Abstandsmessung mit Ultraschall oder Laser
- bei der Auswahl eines geeigneten Sensors sind mehrere Randbedingungen zu berücksichtigen, z.B.:
 - Genauigkeit
 - Kosten
 - Sensitivität und Querempfindlichkeit

Grundlagen

Sensoren – Grundlagen:

- manche Sensorsignale werden dauerhaft/kontinuierlich aufgenommen, andere hingegen nur temporär an bestimmten Schritten des Roboterprogramms, e.g.:
 - Achsposition → kontinuierlich
 - Anstand zwischen TCP und Werkstück → temporär, z.B. bei Annäherung
- die Bezeichnung eines Sensors ist häufig dem Anwendungszweck angelehnt, zum Beispiel:
 - Druck → Druck-Sensor
 - Temperatur → Temperatur-Sensor
 - Geschwindigkeit → Geschwindigkeits-Sensor
- in einigen Fällen spiegelt die Bezeichnung das physikalische Prinzip des Sensors wider, z.B. Hall-Effekt → Hall-Sensor



Thermoelement

Quelle: www.friatec.com, 24.08.2016

Interne und externe Sensoren:

Interne Sensoren

- intern (im Roboter) befindliche Sensoren
- gehören zur Grundausstattung des Roboters
- zur internen Regelung
- Informationen über Roboterstatus

Beispiele:

- Drehgeber
- Drehmoment-Sensor
- Thermometer (als Überhitzungsschutz)

Externe Sensoren

- extern angebrachte Sensoren
- nicht in der Grundausstattung enthalten
- Sensoren für prozessspezifische Anwendungen
- Informationen über Roboterumgebung (z.B. Sensoren am Endeffektor)

Beispiele:

- Druck-Taster (z.B. am Greifer)
- Druck-Sensor
- Näherungsschalter

Grundlagen

Aktive vs. passive Sensoren:

Abhängig von der Stromversorgung können Sensoren in aktive und passive Sensoren unterteilt werden

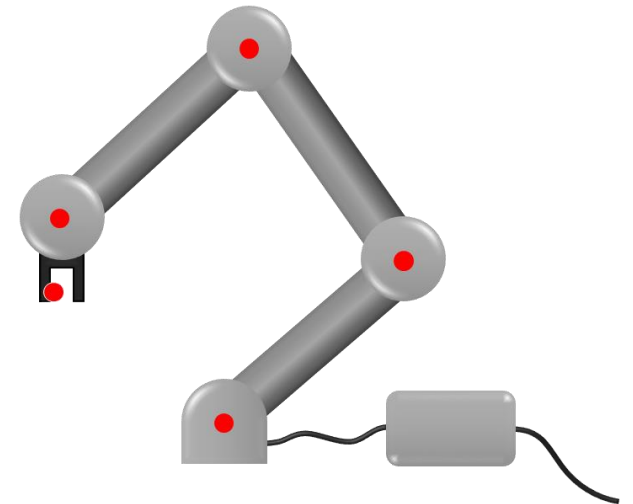
- aktive Sensoren: Sensoren, die eine externe (aktive) Stromversorgung brauchen
- passive Sensoren: Sensoren, die ohne externe Stromversorgung auskommen

Aktive Sensoren:

- gewöhnlich basierend auf elektrischem Widerstand, Kapazität oder Induktivität
- Beispiele: Dehnungsmessstreifen, Widerstandsthermometer

Passive Sensoren:

- physikalischer Effekt generiert elektrischen Strom
- Beispiele: Piezoelement, Photodiode, Thermoelement



Grundlagen

Anforderungen:

Abhängig von der Aufgabe gibt es verschiedene Anforderungen an Sensoren gestellt:

- **Linearität:** Linearer Zusammenhang zwischen Messgröße und Signal
- **Messbereich:** Bereich zwischen dem minimal und maximal abbildbaren Messerwert
- **Auflösung:** Abstufung/Abstand zwischen zwei unterscheidbaren Messwerten
- **Genauigkeit:** Übereinstimmung des Messwerts mit der Messgröße
- **Wiederholungsgenauigkeit:** Abweichung der Messwerte bei wiederholter Messung ohne Veränderung der physikalischen Größe
- **Ansprechzeit (Dynamik):** Zeitdauer, die der Sensor benötigt, um die Messgröße nach einer Änderung abzubilden → vgl. Einschwingverhalten

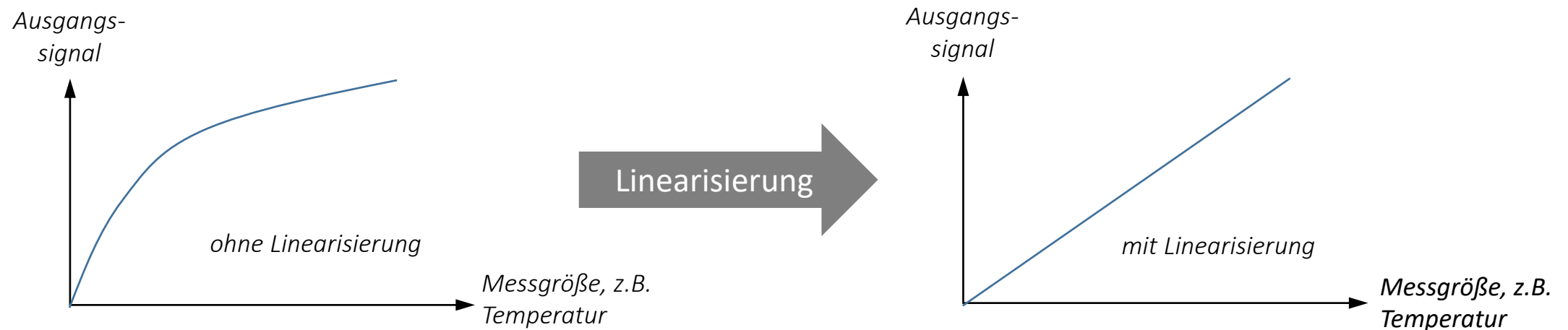
Source: [21]

Anforderungen – Linearität:

Um die Verarbeitung der Sensordaten zu vereinfachen, wird ein linearer Zusammenhang zwischen dem Ausgangssignal und der Messgröße angestrebt. Eine Linearisierung ist immer dann erforderlich, wenn die Messgröße nicht linear durch den physikalischen Effekt bzw. das Messprinzip abgebildet wird. Beispiel: Thermoelemente

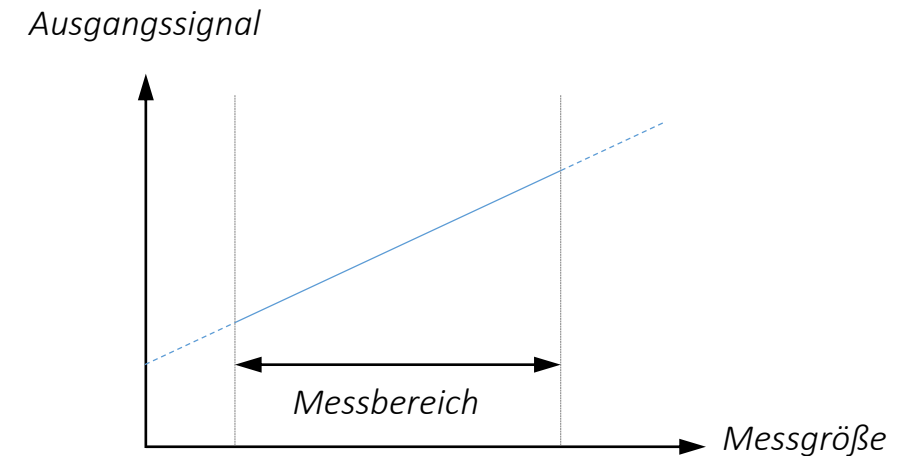
Die Linearisierung wird realisiert durch

- a) Look-up tables und Interpolation zwischen Datenpunkten
- b) Analytical Umwandlung mit Hilfe von Gleichungen



Anforderungen – Messbereich

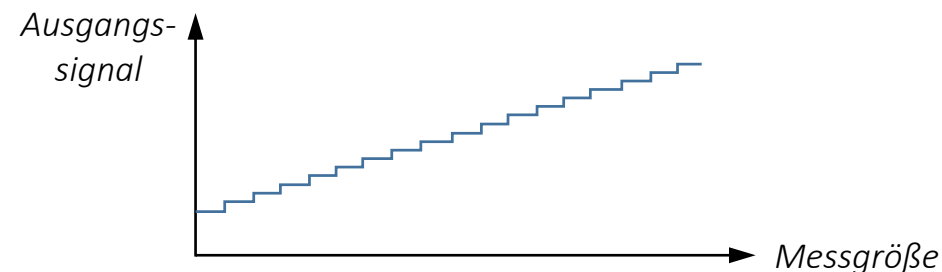
- der Messbereich eines Sensors ist beschränkt
- es wird ein breiter Messbereich angestrebt; wenn man den Bereich nicht durch einen Sensor abdecken kann, besteht die Möglichkeit mehrere Sensoren mit unterschiedlichen Messbereichen zu nutzen
- ein breiter Messbereiches geht häufig mit einer schlechten Auflösung und/oder Genauigkeit einher
- es gibt Sensoren, die auch außerhalb des spezifizierten Messbereiches arbeiten, jedoch ohne Garantie der spezifizierten Genauigkeit



Anforderungen - Auflösung

- die Auflösung bezeichnet die Abstufung bzw. den minimalen Abstand zwischen zwei unterscheidbaren Werten
- gewünscht ist eine hohe Auflösung
- die Auflösung wird durch die Analog-Digitalwandlung bestimmt
- eine hohe Auflösung erfordert Analog-Digitalwandler, die eine große Anzahl an Zuständen unterscheiden können (z.B. eine große Anzahl an Spannungsniveaus bei der Temperaturmessung mit einem Thermoelement)
- die Auflösung wird gewöhnlich in “Bit” angegeben; die absolute Auflösung kann aus dem Quotienten des Messbereichs und der Bit-fachen Potenz des Faktors 2 ermittelt werden

$$\text{Auflösung} = \frac{\text{Messbereich}}{2^{\text{bit}}}$$



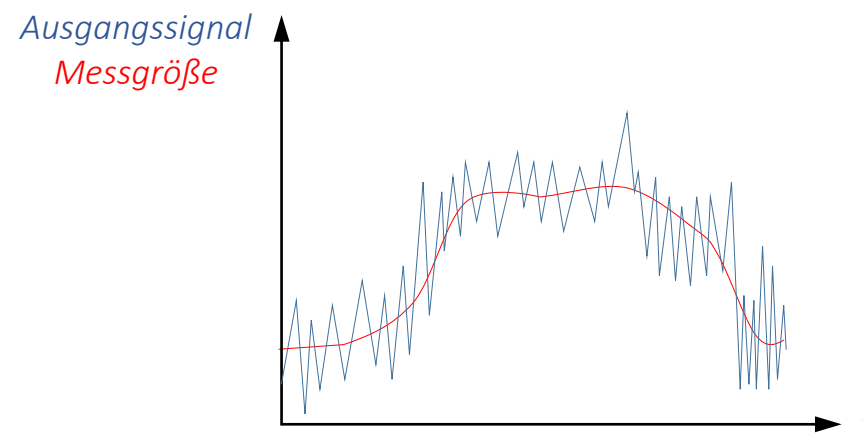
Grundlagen

Anforderungen - Genauigkeit

- die Genauigkeit definiert die Übereinstimmung des Messwerts mit der Messgröße
- die Genauigkeit hängt von der Auflösung ab, dem Signal-Rauschverhältnis (SNR) sowie weiteren Faktoren
- eine Änderung der Messgröße kann nur wahrgenommen werden, wenn sie über dem Rausch-Niveau liegt
- Rauschen = zufällige (Signal-)Schwankungen
- das Signal-Rausch-Verhältnis kann durch Mittelung (Überlagerung) wiederholter Messungen verbessert werden

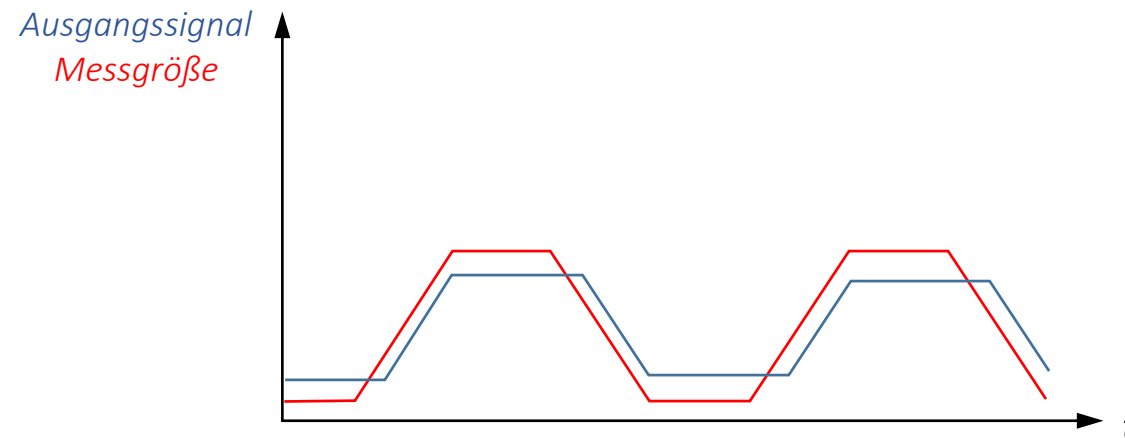
$$SNR = \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2$$

Signalamplitude
Rauschamplitude



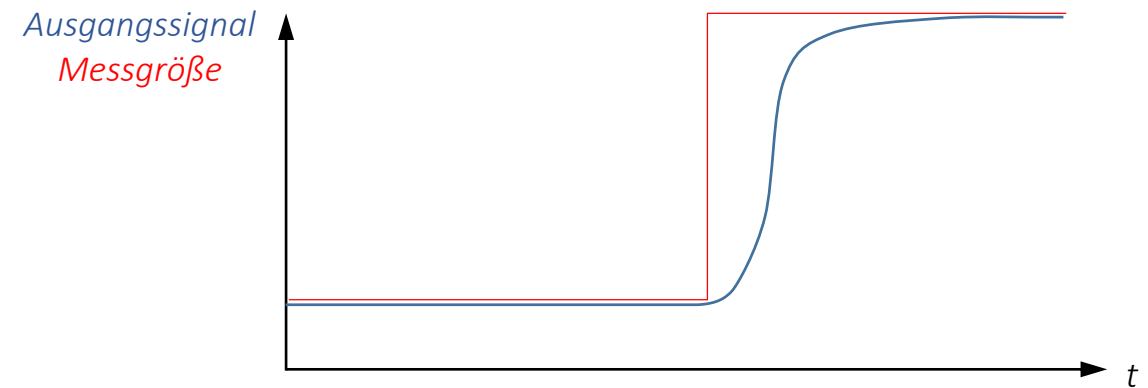
Anforderungen - Wiederholgenauigkeit

- bei aufeinander folgenden Zyklen unterscheidet sich das Ausgangssignal trotz unveränderter Messgröße
- Englisch „repetitive accuracy“ oder „repeatability“
- die Wiederholgenauigkeit ist vorwiegend für mechanische Systeme relevant; die Wiederholgenauigkeit wird hier nicht allein durch den Sensor bestimmt, sondern den Messaufbau (z.B. Messung von Achspositionen
→ Abweichung verursacht durch Spiel in Gelenken)



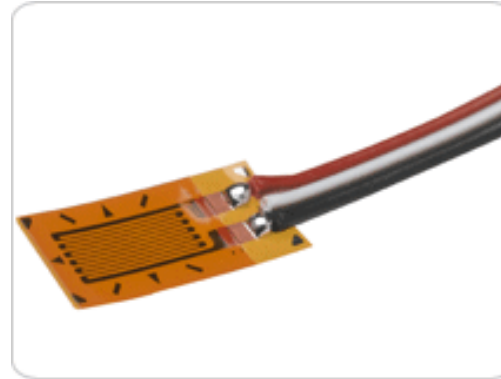
Anforderungen – Ansprechzeit

- das Messsignal eilt der Messgröße hinterher; es dauert eine gewisse Zeit, bis Änderungen der Messgröße sich im Messsignal widerspiegeln (→ **Einschwingverhalten, Trägheit des Systems**)
- der zeitliche Verzug wird i.d.R. nicht durch das physikalische Messprinzip, sondern den Sensoraufbau bestimmt
- **Beispiel:** Zeitlicher Verzug bei einer Temperaturmessung durch begrenzte Wärmeleitfähigkeit des Sensorgehäuses
- die Ansprechzeit spiegelt die „**Messdynamik**“ wider
 - hohe Ansprechzeit: geringe Dynamik
 - geringe Ansprechzeit: hohe Dynamik



Beispiele für Messgrößen im Industrierobotik-Bereich:

- lineare Positions- und Abstandsmessung
- Winkelposition
- Geschwindigkeit und Beschleunigung
- Berührung / Kontakt
- Kraft
- Temperatur
- Objektgeometrie und Objektgestalt



Dehnmessstreifen (DMS)

Quelle: www.Germany.ni.com, 26.08.2016



Magnetischer Linearencoder

Quelle: www.renishaw.com, 26.08.2016



Drehencoder

Quelle: www.indiamart.com, 26.08.2016



Induktiver Näherungsschalter

Source: www.srielectronics.in, 26.08.2016

Näherungsschalter

Näherungsschalter

- Näherungsschalter dienen dazu, die Präsenz von Objekten in (definierter) „Nähe“ anzuzeigen
- kontaktfreie Messung
- da sie in der Regel nur binäre Schaltzustände abbilden (Objekt in der Nähe / kein Objekt in der Nähe) werden sie oft als „**Näherungsschalter**“ bezeichnet, selten als „**Näherungssensor**“
- Funktionsprinzip z.T. identisch zu kontaktfreien Sensoren zur Abstandsmessung
- zahlreiche Messprinzipien für Näherungsschalter verfügbar

Messprinzip	Einschränkungen
induktiv	Nur leitfähige (metallische) Objekte
Kapazitiv	nahezu alle Medien (auch flüssig)
magnetisch	nur ferromagnetische Objekte
Optisch	Nur Objekte mit moderatem Reflexionsvermögen
Ultraschall	Nur Objekte mit moderatem akustischem Reflexionsvermögen

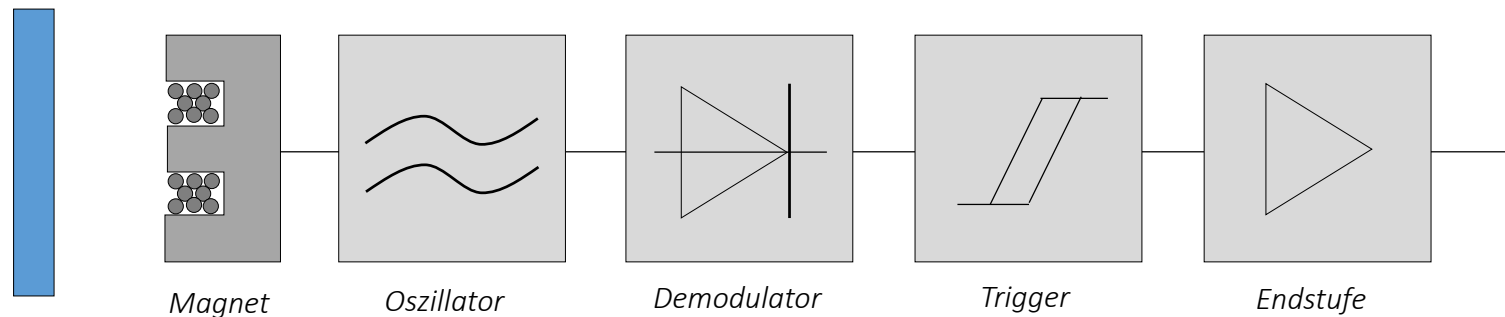
Quelle: [21]

Näherungsschalter

Näherungsschalter – Induktive Näherungsschalter

Prinzip: Eine Spule erzeugt durch oszillierende Anregung ein magnetisches Wechselfeld. Das Wechselfeld induziert in nahen Objekten elektrische Ströme (Wirbelströme). Dadurch sinkt die Amplitude des Oszillators. Unterschreitet die Amplitude eines definiertes Niveau, löst der Näherungsschalter aus.

- funktioniert nur bei leitfähigen Objekten
- Abstand, bei dem der Schalter auslöst, hängt vom Material des Näherungsobjekts ab
→ Schaltgrenze muss an Objekt angepasst werden



Induktiver Näherungsschalter

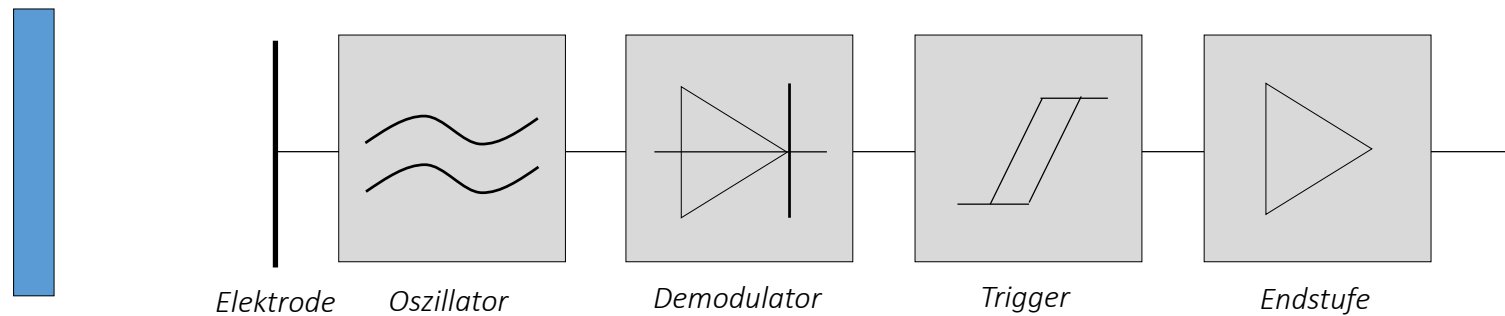
Quelle: www.asi-ez.com, 26.08.2016

Näherungsschalter

Näherungsschalter – Kapazitive Näherungsschalter

Prinzip: Über eine Elektrode (oder ein Elektrodenpaar) wird ein elektrisches Wechselfeld generiert. Wenn sich ein Objekt der Elektrode nähert, steigt die Kapazität des Felds, was eine Veränderung der Oszillator-Amplitude herbeiführt. Erreicht die Oszillator-Amplitude einen Grenzwert, schaltet der Sensor.

- kann bei leit- und nicht-leitfähigen Materialien verwendet werden
- Distanz, bei der der Schalter auslöst, hängt vom Material ab
- bei Ausführung mit einer Elektrode fungiert das Objekt als GND-Elektrode



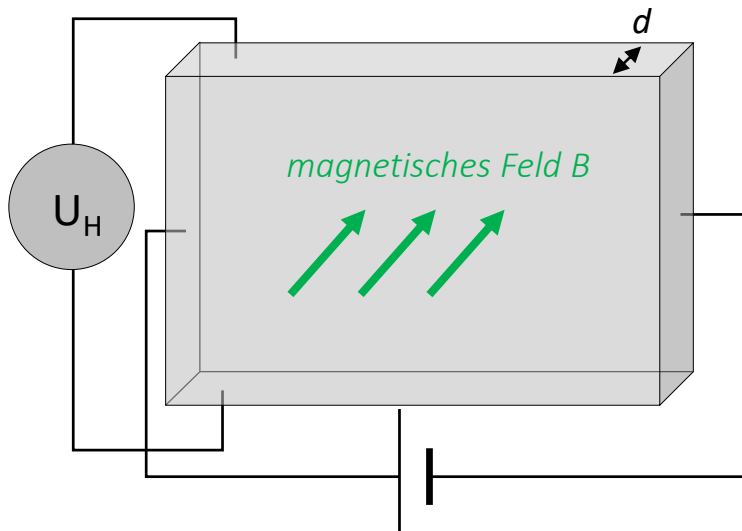
Kapazitiver Näherungsschalter

Quelle: www.rs-online.com, 26.08.2016

Näherungsschalter

Näherungsschalter – Magnetischer Näherungsschalter – Hall Sensor

Prinzip: Ein Hallsensor kann als ein ebener Halbleiter betrachtet werden. Ohne ein äußerliches magnetisches Feld durchwandern die Elektronen den Leiter auf direktem Weg. In Gegenwart eines elektrischen Felds werden die Elektronen hingegen abgelenkt, was sich in einer Potentialdifferenz (Spannung) zwischen den Seiten des Sensors äußert. Die Ursache der Ablenkung ist die „**Lorentz Kraft**“. Die Potentialdifferenz wird als „**Hall Spannung**“ U_H bezeichnet.



$$U_H = \frac{I \cdot B}{d} \cdot A_H$$



Hall Sensor

Quelle: www.ishop.vems.hu, 26.08.2016



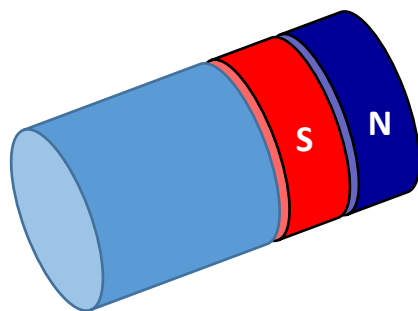
Hall Sensor

Quelle: www.infineon.com, 26.08.2016

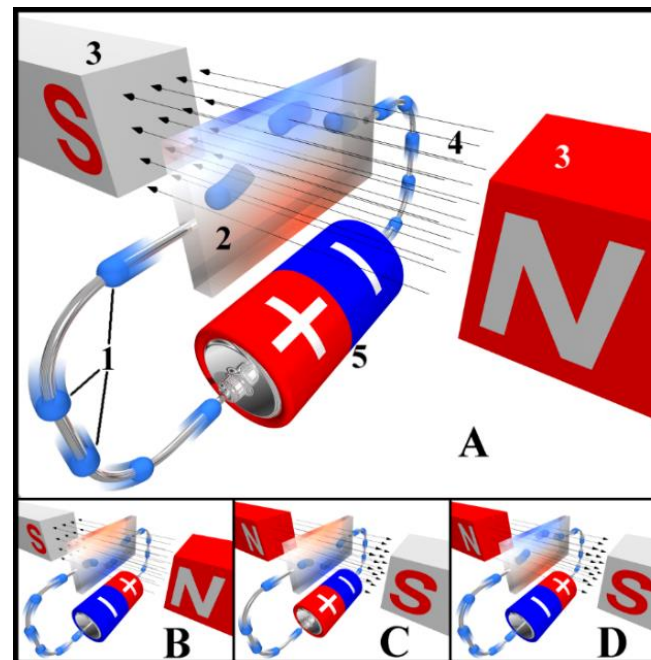
Näherungsschalter

Näherungsschalter – Magnetischer Näherungsschalter – Hall Sensor

Um als Näherungsschalter zu dienen, wird der Hall Sensor mit einem **Permanentmagneten** kombiniert. Wenn sich der Verbund aus Hall Sensor und Magnet einem ferromagnetischen Objekt nähert, ändert sich das magnetische Feld und damit die Hall Spannung U_H .



Hall Effekt basierter Näherungsschalter



Hall Effekt

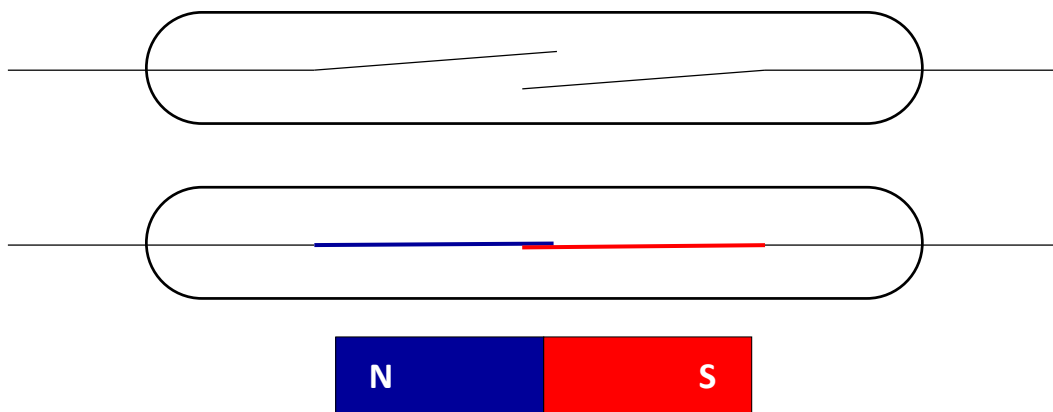
Quelle: www.Wikipedia.org, 26.08.2016

Näherungsschalter

Näherungsschalter – Magnetische Näherungsschalter – Reed Schalter

Prinzip: Ein Reed Schalter besteht aus zwei ferromagnetischen, (sehr) dünnen Blechstreifen (engl. “reeds”), die überlappend in einer Glaskapsel eingeschlossen sind. Ohne äußeres magnetisches Feld sind die Blechstreifen durch einen schmalen Spalt getrennt. Wenn der Reed Schalter in ein magnetisches Feld gebracht wird, ziehen sich die Reedkontakte an und schließen den Schalter.

In Verbindung mit einem Elektromagnet dient der Reed Schalter als Relay (→ “Reed Relay”)



Reed Schalter

Quelle: www.littlefuse.com, 26.08.2016



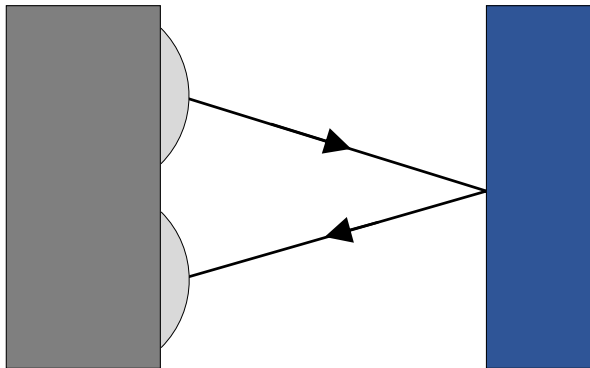
Reed Schalter

Quelle: www.littlefuse.com, 26.08.2016

Näherungsschalter

Näherungsschalter – Photoelektrischer Näherungsschalter

- nahes Objekt wird anhand von reflektiertem Licht erkannt
- Sensor besteht i.d.R. aus Licht emittierendem Element (z.B. LED oder Laserdiode) und Licht sensitivem Element (Photodiode oder Phototransistor)
- Sensoren, die im Infrarotbereich arbeiten ($\lambda = 780nm \dots 1mm$) erkennen auch dunkle Objekte



Optischer Näherungsschalter

Quelle: www.rs-online.com, 26.08.2016



Optischer Infrarot Näherungsschalter

Quelle: www.rs-online.com, 26.08.2016

Näherungsschalter

Näherungsschalter– Photoelektrische Näherungsschalter

- **Nachteile:**
 - empfindlich gegen Staub und Nebel
 - Wechselwirkung mit starken Lichtquellen (Sonne, Lichtbögen beim Schweißen, etc.) → kann durch Modulation beherrscht werden
 - Funktion hängt von Reflexionsvermögen des Objekts ab
- **Vorteile:**
 - großer Arbeits- / Messbereich
- Verwendung als Lichtschranke durch gegenüberliegende Anordnung oder unter Zuhilfenahme eines starken Reflektors



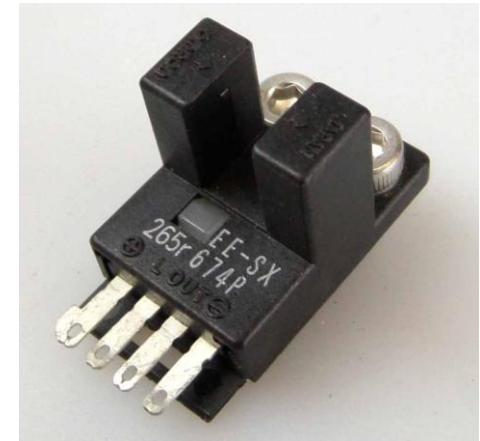
Lichtschranke

Quelle: www.rs-online.com, 26.08.2016



Infrarot Näherungsschalter

Quelle: www.aliexpress.com, 26.08.2016



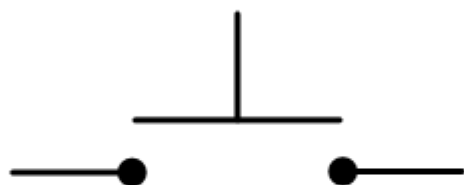
Mikro-Lichtschranke

Quelle: www.spares4less.com, 26.08.2016

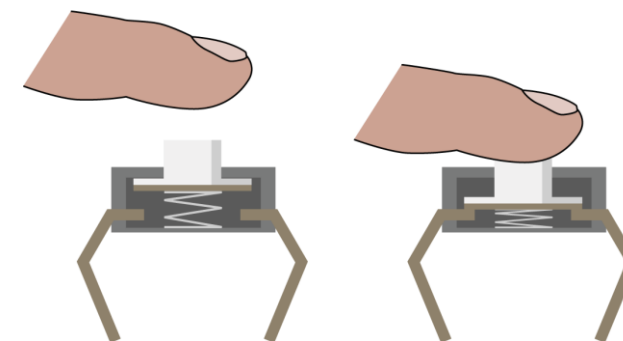
Berührungsschalter

Berührungsschalter (engl. touch switch)

- Berührung → Kontakt zwischen Taster und Objekt
- oft mit zwei Stromkreisen ausgestattet, von denen einer bei Berührung geschlossen und der andere geöffnet wird
- auch als “Taster” bezeichnet
- sehr einfacher Aufbau
- keine Umwandlung oder Verstärkung nötig
- sehr günstig (Preise starten bei wenigen Cent)



Schaltsymbol



Funktion eines Berührungsschalters

Quelle: www.starhardware.org, 26.08.2016



Mikroschalter

Quelle: www.roboteshop.com, 26.08.2016



Mikroschalter

Quelle: www.directindustry.com, 26.08.2016

Linear- und Winkelsensoren

Linear- und Winkelsensoren – Positions- und Drehsensoren

- **inkrementelle Sensoren:** Bestimmung der **relative Position**, d.h. dem Abstand zwischen Start- und Endpunkt
- **absolute Sensoren:** Bestimmung der **absoluten Position** in Bezug auf ein Koordinatensystem
- Bestimmung der absoluten Position ist (deutlich) aufwendiger und teurer
- unterschiedliche physikalische Effekte nutzbar
- Industrieroboter sind mit inkrementellen und absoluten Sensoren ausgestattet:
 - inkrementelle Sensoren → Regelung dynamischer Bewegungen
 - absolute Sensoren → Referenzierung nach Neustart oder Kollision



Absoluter linearer Positionssensor

Quelle: www.rls.si, 26.08.2016



Inkrementeller Drehencoder Absoluter Drehencoder

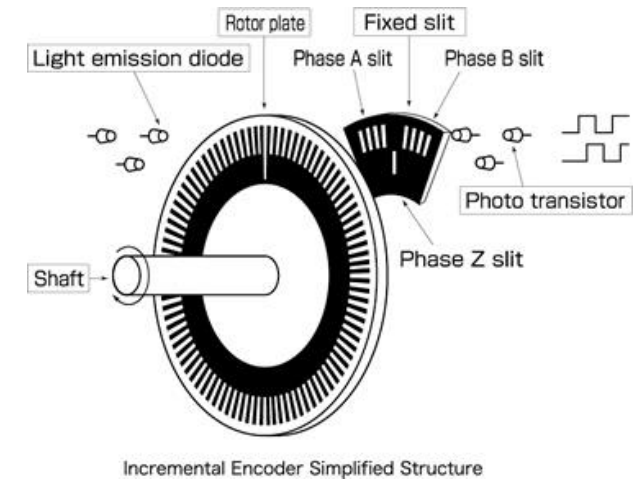
Quelle: www.directindustry.com,
26.08.2016

Quelle: www.robotshop.com,
26.08.2016

Linear- und Winkelsensoren

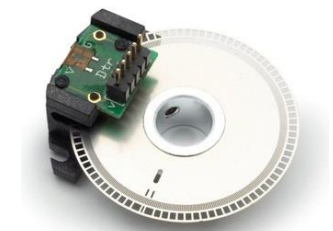
Inkrementelle Sensoren / Verschiebungssensoren:

- Bestimmung der Position oder des Winkels durch Aufintegrieren der einzelnen Schritte ausgehend von Startpunkt (Koppelnavigation, engl. “dead-reckoning”)
- inkrementelle Sensoren können auch zur Bestimmung der Geschwindigkeit und Beschleunigung dienen:
 - Geschwindigkeit \sim Anzahl der Inkremente pro Zeiteinheit (\rightarrow Frequenz)
 - Beschleunigung \sim Änderungsrate der Anzahl an Inkrementen pro Zeiteinheit
- Auflösung ist abhängig von der Schrittweite
- Grundaufbau:
 - geschlitzte Rotorscheibe
 - geschlitztes oder magnetisiertes Band



Aufbau eines inkrementellen Drehgebers

Quelle: www.tamagawa-seiki.com, 26.08.2016



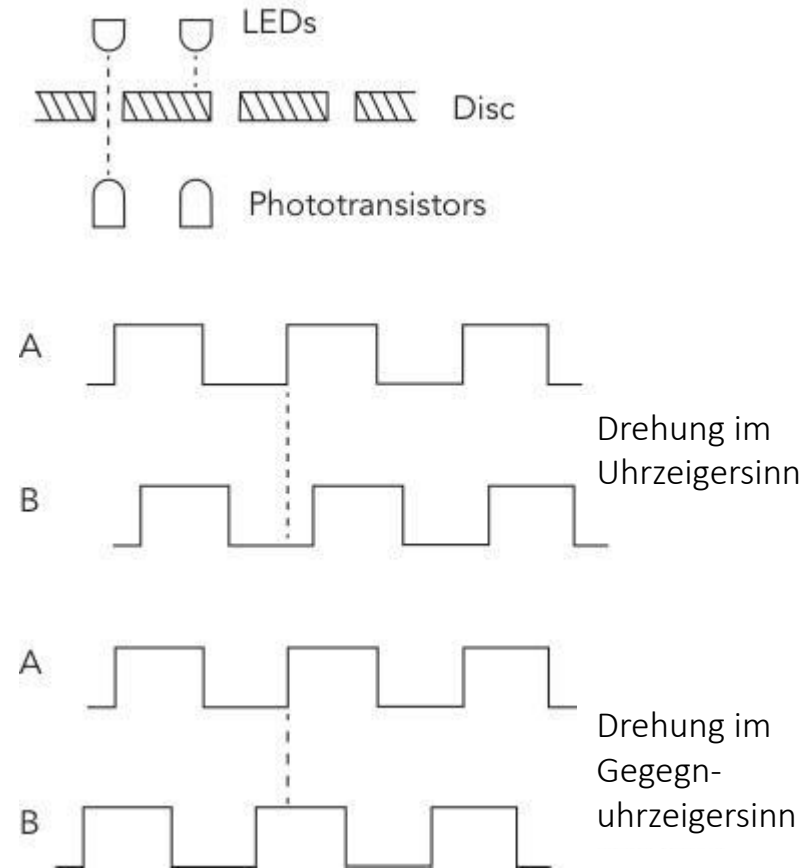
Inkrementeller Drehgeber

Quelle: www.codeforfree.weebly.com, 26.08.2016

Linear- und Winkelsensoren

Inkrementelle Encoder:

- der Grundaufbau eines optischen Encoders umfasst einen geschlitzten Rotor, eine LED und eine Photodiode → **Einkanal- (single channel) Encoder**
- **Zweikanal- (dual channel) Encoder** umfassen einen geschlitzten Rotor sowie zwei LEDs und zwei Photodioden
- im Unterschied zu Einkanal-Encodern können Zweikanal Encoder die **Drehrichtung** ermitteln (im **Uhrzeiger-** oder **Gegenuhrzeigersinn**)
- die zwei LED-Photodioden Paare sind bei Zweikanal-Encodern so angebracht, dass die beiden Ausgangssignale eine Phasenverschiebung von 90° aufweisen
- die **Phasenverschiebung** dient zur Bestimmung der Drehrichtung



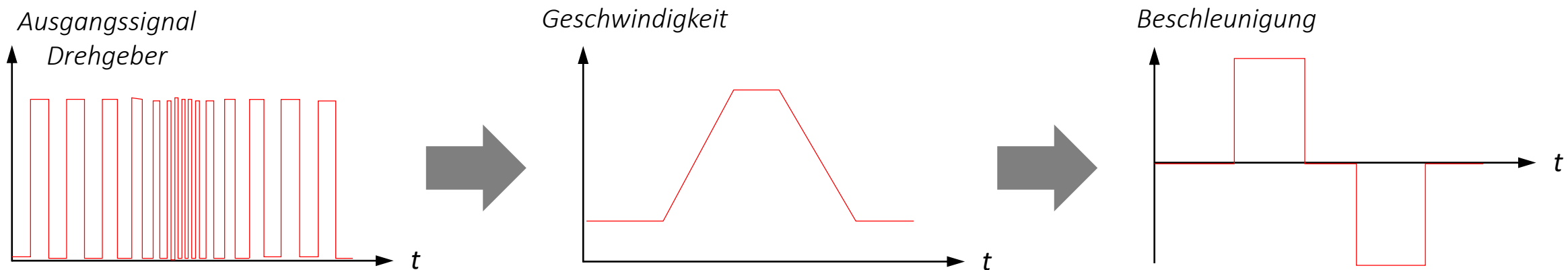
Funktionsprinzip eines Zweikanal-Encoders

Quelle: www.deusm.com, 26.08.2016

Linear- und Winkelsensoren

Inkrementelle Encoder:

- inkrementelle Encoder können auch als günstige Geschwindigkeits- und Beschleunigungssensoren dienen (sowohl für lineare als auch rotatorische Bewegungen):
 - Geschwindigkeit \sim Frequenz des Ausgangssignals
 - Beschleunigung \sim Änderung der Frequenz
- wenn nur der Betrag der Geschwindigkeit oder Beschleunigung von Interesse ist, reicht ein Einkanal-Encoder; zur Berücksichtigung der Dreh- oder Bewegungsrichtung wird ein Zweikanal-Encoder benötigt



Linear- und Winkelsensoren

Beispiel – Inkrementelle Encoder:

Die Scheibe eines inkrementellen Drehgebers ist mit Schlitze mit einer Breite von $1,0^\circ$ versehen. Das Ausgangssignal hat eine Frequenz von 100 Hz. Wie groß ist die Winkelgeschwindigkeit und die Drehzahl?

Lösung:

Eine einfache Periode umfasst eine abgeschottete Phase, in der der Strahlengang von der Scheibe unterbrochen wird und eine unabgeschottete Phase, ohne Unterbrechung des Strahlengangs. In Summe entspricht eine Periode also einem Winkel von 2° . Bei einer Frequenz von 100 Hz, d.h. 100 Perioden pro Sekunde, beträgt die Winkeländerung also 200° .

$$\text{Winkelgeschwindigkeit} = \omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{200^\circ}{1\text{ s}} = 200^\circ \cdot \text{s}^{-1} = 3.49 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

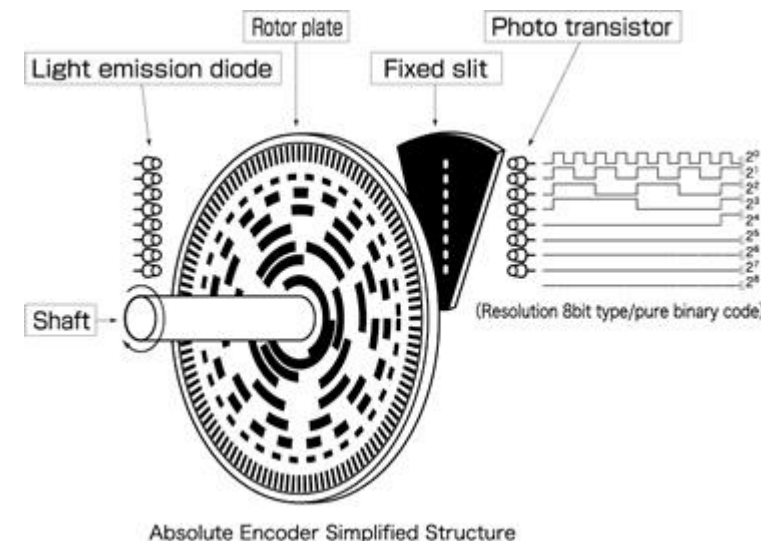
$$\text{Drehzahl} = n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{3.49 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}}{2\pi} = 0.55 \text{ s}^{-1}$$

$$180^\circ = \pi$$

Linear- und Winkelsensoren

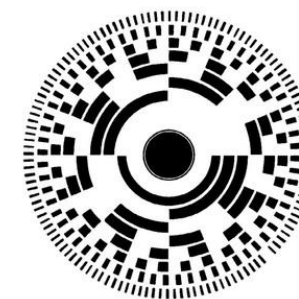
Absolute Encoder:

- absolute Encoder können die Position ohne Kenntnis eines Referenzpunkts ermitteln
- mit dem Einsatz von absoluten Encodern entfällt die Referenzierungsfahrt nach Neustart oder Kollision
- absolute Encoder sind mit einer Scheibe oder einem Band mit eindeutigem Muster ausgerüstet
- das Kernstück eines absolute Drehgebers ist eine Scheibe, in der Schlitze auf konzentrischen Kreisen eingefügt sind; in radialer Richtung betrachtet verkörpern die Schlitze einen binären „Positionscode“
- abhängig von der Anzahl an Kreisbahnen werden mehrere LED-Photodioden-Paare benötigt



Grundaufbau eines absoluten Drehgebers

Quelle: www.tamagawa-seiki.com, 26.08.2016



Drehscheibe eines absoluten Drehgebers

Quelle: www.codeforfree.weebly.com, 26.08.2016

Binarisierung

Prinzip der Binarisierung:

- Darstellung einer Zahl als Summe von Zweierpotenzen

$$Z = \sum_{i=0}^m z_i \cdot 2^i \quad (z_i \in \{0,1\})$$

i	7	6	5	4	3	2	1	0
2^i	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
	128	64	32	16	8	4	2	1

- digitale Systeme sind hinsichtlich der Anzahl an abbildbaren Binärstellen begrenzt (Auflösung)
Beispiel: Ein 8-Bit System kann Binärzahlen mit einer Länge mit 8 Ziffern (0 und 1) verarbeiten ($2^8 = 256$ Zustände)

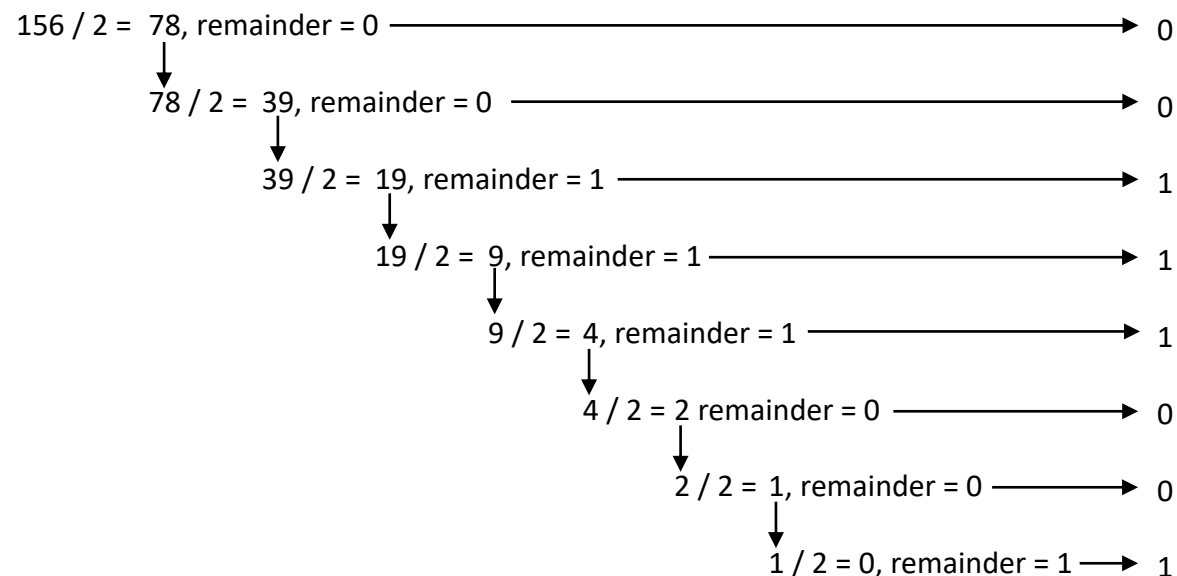
Binarisierung

Umwandlung vom Dezimalsystem ins Binärsystem:

Um eine Dezimalzahl in eine Binärzahl umzuwandeln, wird die Dezimalzahl wiederholt durch zwei geteilt. Das Ergebnis der Division ist ein „Ganzzahlquotient“ und einen „Teilerrest“ („Modulo“). Wenn die geteilte Zahl gerade ist, ist der Teilerrest = 0, wenn sie ungerade ist, ist der Teilerrest = 1. Der Prozess endet, wenn der Ganzzahlquotient = 0 ist.

Die Binärzahl entspricht den aneinandergereihten Teilerresten, wobei mit dem „Least significant bit“ begonnen wird.

Beispiel: Umwandlung der Dezimalzahl 156 ins Binärformat.



$$\Rightarrow [156]_{10} = [10011100]_2$$

↗ Most significant bit (MSB) ↘ Least significant bit (LSB)

Binarisierung

Übung:

- Bestimmen Sie den 8-Bit Binärwert der Dezimalzahl 74!
- Bestimmen Sie den 8-Bit Binärwert der Dezimalzahl 134!

Binarisierung

Binärsystem:

- Die Anzahl an Zuständen r , die im Binärsystem unterschieden werden können, entspricht

$$r = 2^m$$

wobei m die Auflösung bzw. die Anzahl der Binärstellen widerspiegelt

- da die Zahl „0“ auch einen Zustand verkörpert, ist der maximale Integerwert, die mit einem Binärsystem abgebildet werden kann, begrenzt auf

$$\text{Maximalwert} = 2^m - 1$$

- Beispiel:** Ein 8-Bit System kann $r = 2^8 = 256$ Zustände unterscheiden bzw. Integerwerte im Bereich von 0 bis 255.

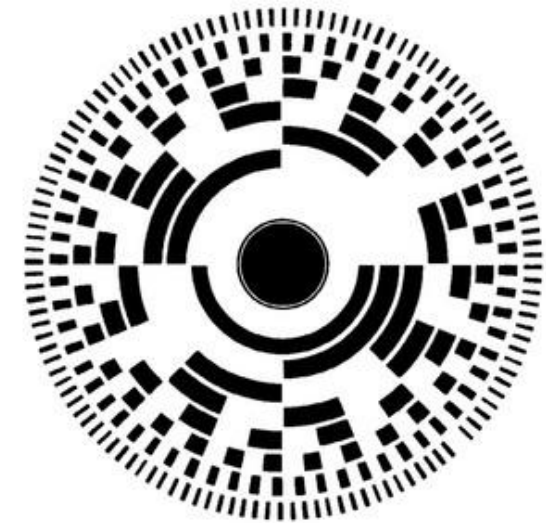
m	$r = 2^m$
6	64
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096

Absolute Encoder

Übung – Absolute Encoder:

Das Bild auf der rechten Seite zeigt das Schlitzmuster eines absoluten Drehencoders.

- a) Bestimmen Sie die Auflösung des Encoders als „Bit-Wert“.
- b) Bestimmen Sie die Winkelauflösung, d.h. die kleinste Winkeldifferenz, die mit dem Encoder aufgelöst werden kann.
- c) Bestimmen Sie die Winkelauflösung eines 10-Bit Drehencoders (Arbeitsbereich 0° - 360°)
- d) Angenommen die Winkelinkremente des rechts abgebildeten Drehgebers würden durch Integerzahlen repräsentiert werden (beginnend von Null), welcher Integerwert würde dann ein Winkel von 100° entsprechen?



Schlitzmuster eines absoluten Drehencoders

Quelle: www.codeforfree.weebly.com, 26.08.2016

Absolute Encoder

Auflösung von absoluten Encodern:

- Die **Auflösung** eines System ist nicht gleichzusetzen mit dessen **Genauigkeit**. Jedoch ist die Auflösung ein begrenzender Faktor der Genauigkeit.
- **Beispiel A:** Die Auflösung eines Systems zur Spannungsmessung ist (theoretisch) in der Lage, Spannungsdifferenzen von 0,01 V abzubilden. Das Rohsignal des Sensors wird jedoch von rauschbedingten Störungen mit einer Amplitude von 0,1 V überlagert. Das hat zur Folge, dass die Genauigkeit des Systems um ca. eine Größenordnung schlechter ist, als seine Auflösung.
- **Beispiel B:** Durch einige Anpassungen kann die Rauschamplitude des im Beispiel A diskutierten Systems auf unter 0,01 V reduziert werden. Somit wird die Auflösung zum begrenzenden Faktor der Genauigkeit.

Absolute Encoder

Absolute Encoder:

- neben optischen Encodern gibt es auch magnetische Encoder, die auf demselben Codierungsprinzip aufbauen
- der Binärcode muss nicht zwingend auf parallelen Codepfaden eingeprägt sein; es ist ebenso möglich, den Code in einem einzigen Pfad in Form einer sogenannten „Pseudorandom Sequence“ (Pseudo-zufällige Reihe) aufzubringen
- pseudorandom: Ein Ausschnitt der Zahlenfolge ist nur ein einziges Mal in der Zahlenfolge enthalten und kann so als Positionsmarke dienen

<u>0011101</u>	<u>0011101</u>	<u>0011101</u>	<u>0011101</u>
001	011	111	110



Absoluter Drehencoder

Quelle: www.directindustry.com, 26.08.2016



Absoluter Linearencoder

Quelle: www.amo-gmbh.com, 26.08.2016

Absolute Encoder

Absolute Encoder – Pseudorandom code

- Die Anzahl der Ziffern N in einer **Pseudorandom Binary Sequence** (PRBS) beträgt

$$N = 2^k - 1$$

wobei k die Länge eines einzelnen Ausschnitts (bzw. eines “Worts”) bezeichnet

- die Zahl N ist äquivalent zur **Anzahl an unterscheidbaren Zuständen**, sofern eine geschlossene Sequenz gebildet wird (z.B. bei rotatorischen Encodern)
- bei einer offenen Sequenz (z.B. bei Linearencodern) beträgt die Anzahl der unterscheidbaren Zustände:

$$N = 2^k - 1 - (k - 1) = 2^k - k$$

*Pseudorandom binary
sequence und “Wörter”*

Quelle: www.Wikipedia.org, 28.08.2016

<u>1011100</u>	→	101
<u>1011100</u>	→	011
<u>1011100</u>	→	111
<u>1011100</u>	→	110
<u>1011100</u>	→	100
<u>1011100</u>	→	001 (wrapped)
<u>1011100</u>	→	010 (wrapped)

*Absoluter
Linearencoder*

Quelle: www.rls.si, 26.08.2016



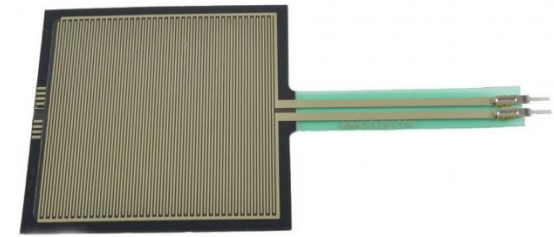
k	$2^k - k$
2	2
3	5
4	12
5	27
6	58
7	121
8	248
9	503
10	1014

*Anzahl unterscheidbarer
Zustände ohne “Wrap”*

Kraftsensoren

Kraftsensoren:

- es gibt mehrere Messprinzipien zur Kraftmessung
- die größte Bedeutung haben
 - Kraftsensitive Widerstände (FSR)
 - Piezosensoren
- große Unterschiede hinsichtlich Genauigkeit und Kosten
- Kraftsensoren im Speziellen für taktile oder kraftgeregelte Anwendungen interessant
- “Force Feedback Control” zum Aufbringen definierter Kräfte: Fortlaufende Messung und Anpassung der Kraft → hilfreich bei empfindlichen Objekten



Kraftsensitiver Widerstand

Quelle: www.robotshop.com, 29.08.2016



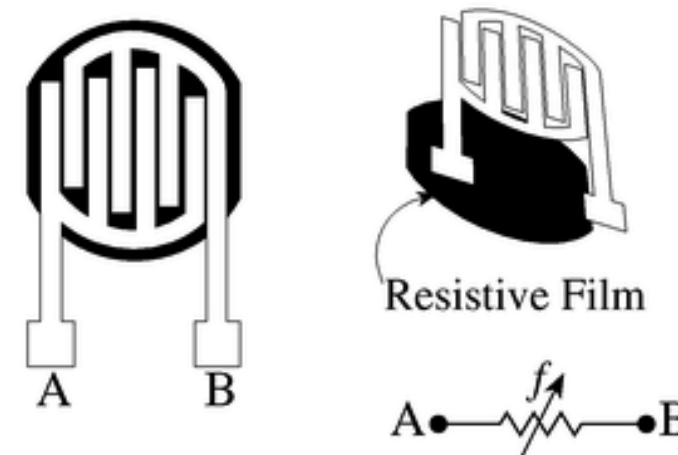
Wägezelle

Quelle: www.robotshop.com, 29.08.2016

Kraftsensoren

Kraftsensitive Widerstände (Force Sensitive Resistor - FSR):

- Aufbau: Kraftsensitive Sensoren bestehen aus zwei Komponenten
 - 1. dünner Film mit zwei ineinander verschränkten Leiterbahnen
 - 2. leitfähigen Polymerfilm
- der Polymerfilm ist mit leitfähigem Material bestückt
- Funktionsprinzip: Wenn eine Kraft auf den Sensor ausgeübt wird, wird der Stromfluss zwischen den Leiterbahnen über den Polymerfilm verbessert; der Widerstand sinkt
- **stetiger Abfall des Widerstands mit zunehmendem Druck**
- sehr günstig



Kraftsensitiver Sensor

Quelle: www.ccrma.stanford.edu, 29.08.2016



Kraftsensitiver Sensor

Quelle: www.elprocus.com, 29.08.2016



Kraftsensitiver Sensor

Quelle: www.tekscan.com, 29.08.2016

Kraftsensoren

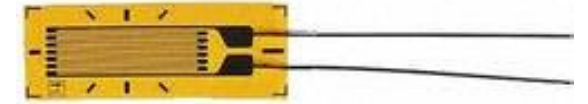
Kraftmesszelle:

- Kraftmesszelle i.d.R. auf Basis von Dehnmessstreifen (DMS)
- Prinzip: Eine äußerlich angreifende Kraft führt zur (elastischen) Verformung der Zelle. Die damit einhergehende Dehnung des DMS führt zu einer Änderung seines Widerstands.
- Zusammenhang zwischen Dehnung und Kraft → Hookesches Gesetz
- sehr präzise und vergleichsweise günstig



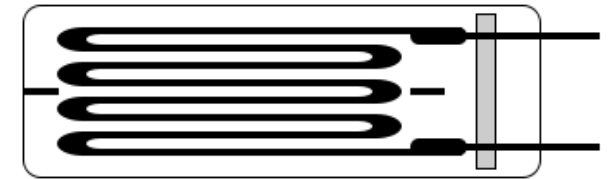
Kraftmesszelle

Quelle: www.valiantinstrument.com, 29.08.2016



Dehnmessstreifen

Quelle: www.3.imimg.com, 29.08.2016



*Schematische Darstellung
eines DMS*

Quelle: www.Wikipedia.org, 29.08.2016



Kraftmessdose

Quelle: www.sensy.com, 29.08.2016

Kraftsensoren

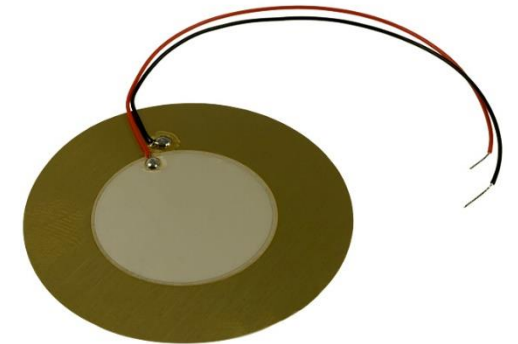
Piezoelektrische Sensoren:

- physikalische Grundlage: Piezoelektrischer Effekt
- Piezoelektrischer Effekt: Bei Verformung eines piezoelektrischen Kristalls bildet sich eine Spannung zwischen seinen Flächen aus → vgl. Piezo-Feuerzeug
- Piezoelektrischer Effekt ist umkehrbar: Wenn eine Spannung zwischen den Flächen des Kristalls aufgebaut wird, verformt er sich → Anwendung z.B. bei Lautsprechern und Ultraschall-Prüfköpfen
- sehr günstig
- für dynamische Anwendungen mit häufigen Lastwechseln geeignet



Piezoelektrischer Kraftsensor

Quelle: www.kistler.com, 29.08.2016



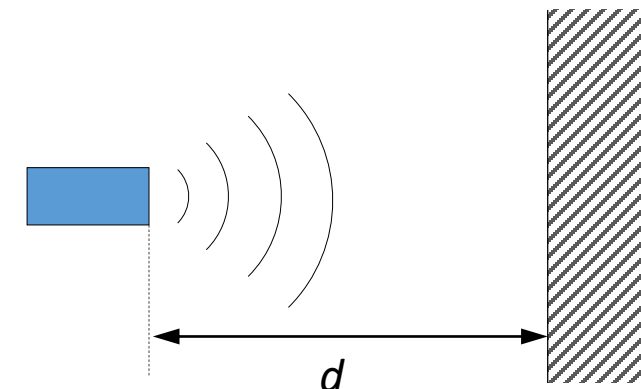
Piezoelektrischer Kraftsensor

Quelle: wwwi.stack.imgur.com, 29.08.2016

Abstandssensoren / Distanzsensoren

Abstandssensoren:

- Ziel: Kontaktfreie Bestimmung des Abstands zu einem Objekt
- abhängig vom Abstand und der geforderten Genauigkeit gibt es unterschiedliche geeignete Messverfahren
- zu den verbreitetsten Sensortypen zählen:
 - Ultraschallsensoren
 - Optische Sensoren auf Grundlage von **Triangulation**
 - Optische Sensoren auf Grundlage von Time-of-Flight (TOF) Messungen
 - Optische Sensoren auf Grundlage von Phasenverschiebungsmessungen



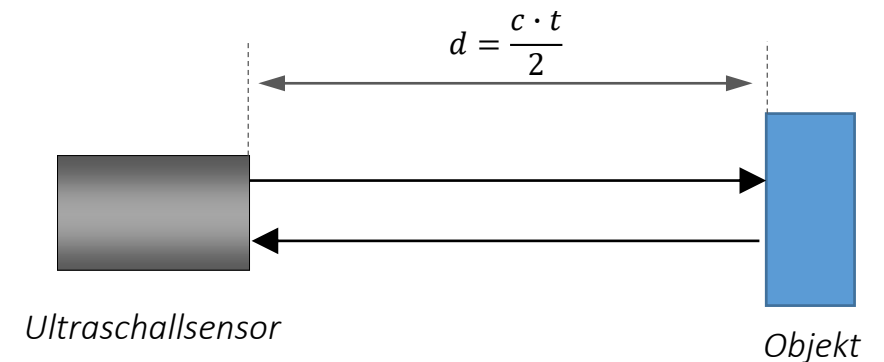
Abstandssensoren / Distanzsensoren

Ultraschall-Sensoren

- Prinzip: Ein hochfrequenter Schwinger sendet Ultraschallwellen aus, die an umliegenden Objekten reflektiert werden und nach einiger Zeit am Empfänger eintreffen. Die Laufzeit (zwischen Senden und Empfangen) steht in proportionalem Verhältnis zum Abstand.
- Ultraschall = Akustische Oszillationen im Bereich von 20 kHz bis 1 GHz
- Frequenzband von Abstandssensoren im Bereich von 40..60 kHz
- Schallgeschwindigkeit $c_{Luft} \approx 340 \text{ m/s}$
- Arbeitsbereich zwischen 1 cm und $\approx 200 \text{ cm}$
- Messung kurzer Distanzen wird durch Pulslänge beschränkt
→ "Totbereich"

Ultraschallsensor

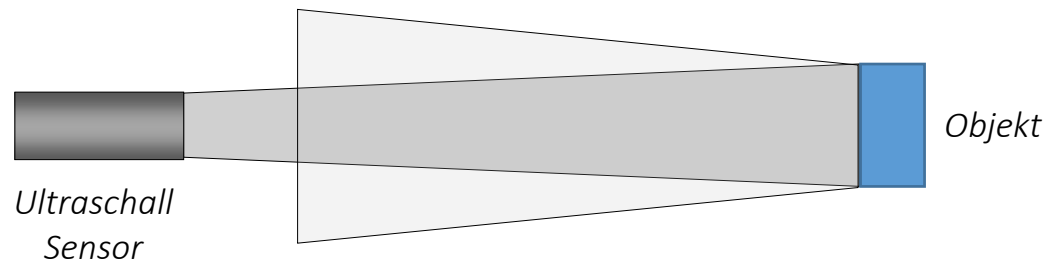
Quelle: www.tutorial-raspberrypi.de,
26.08.2016



Abstandssensoren / Distanzsensoren

Ultraschall-Sensoren

- Laufzeit ist unabhängig vom Material des Objekts → keine objektspezifische Anpassung nötig
- sichere und robuste Funktion bei starren und flachen Objekten
- keine/schlechte Funktion bei schaumähnlichen und zerklüfteten Oberflächen
- großer Öffnungswinkel
 - Erkennung von Objekten die sich nicht auf der Achse des Sensors befinden
 - gut zur Kollisionskontrolle
 - Querempfindlichkeit zu anderen Objekten in Umgebung (z.B. Boden, Arbeitsplatte,...)



Ultraschallsensor

Quelle: www.reichelt.de, 26.08.2016



Ultraschallsensor

Quelle: www.ultraschallsensor.com, 26.08.2016

Abstandssensoren / Distanzsensoren

Ultraschall-Sensoren

- Bewährtes Messprinzip in vielen Anwendungsbereichen z.B.:
 - Einparkhilfe
 - Fledermäuse



Ultraschallbasierte Einparkhilfe

Quelle: www.kfztech.de, 26.08.2016



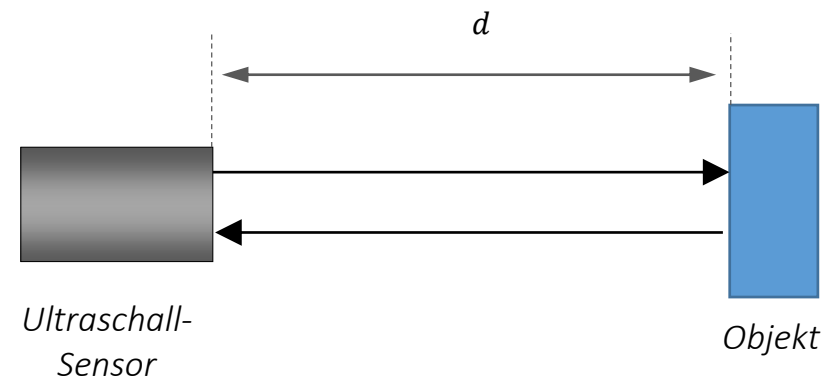
Fledermaus

Quelle: www.Wikipedia.org, 26.08.2016

Abstandssensoren / Distanzsensoren

Beispiel – Ultraschall-Sensoren:

Ein Ultraschall-Sensor wird zur Kollisionsüberwachung eingesetzt. Der Sensor aktiviert einen Schalter, wenn die ermittelte Distanz weniger als 50 cm beträgt. Bestimmen sie die Laufzeit, die die Ultraschallwellen benötigen, um vom Sensor auf das Objekt und zurück zu gelangen.

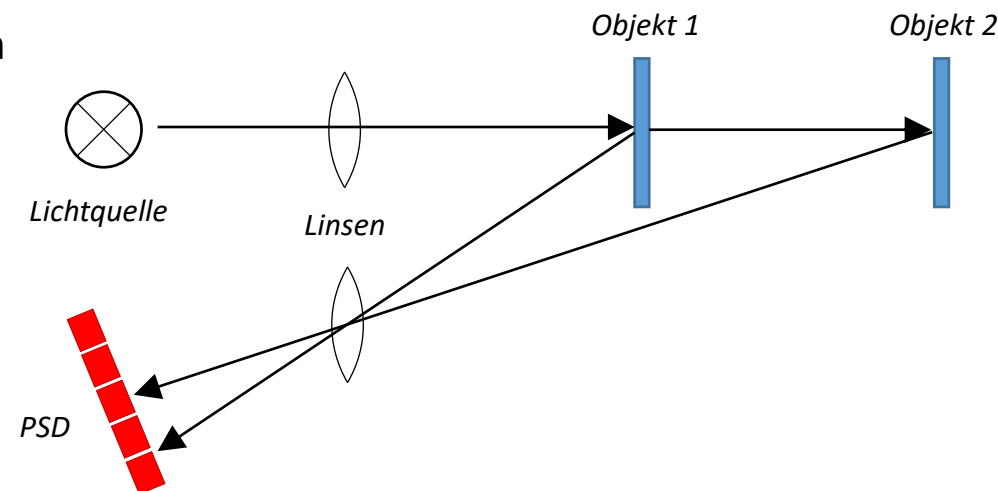


$$d = \frac{c \cdot t}{2} \Rightarrow t = \frac{2d}{c} = \frac{2 \cdot 0,5m}{340 m/s} = 0,00294 s$$

Abstandssensoren / Distanzsensoren

Optische Sensoren auf Grundlage der Triangulation

- Licht wird über eine Linse zu einem parallelen Strahlbündel mit wenigen *mm* Durchmesser zusammengefasst
- alternativ zur Kombination Lichtquelle + Linse ist die Verwendung einer Laserdiode möglich (ohne Linse)
- das reflektierte Licht fällt auf einen lichtempfindlichen Sensor („Position Sensitive Device“ (PSD))
- abhängig vom Abstand variiert der Auftreffpunkt auf dem Sensor (PSD)
- Auflösung $\approx 0.5 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m}$
- Arbeitsbereich: 2 cm .. 1 m



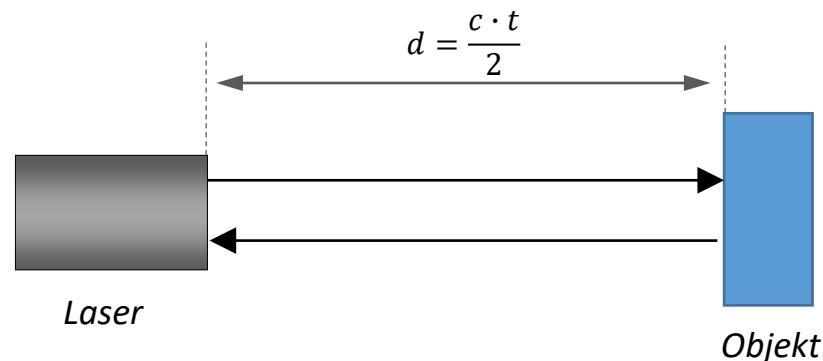
Triangulationsbasierter Distanzsensor

Quelle: www.conrad.de, 26.08.2016

Abstandssensoren / Distanzsensoren

Optische Sensoren auf Grundlage von TOF Messungen

- Prinzip: Eine Laserdiode sendet (sehr kurze) Laserpulse aus. Das Licht wird an Objekten im Strahlengang reflektiert und gelangt zurück zum Sensor. Anhand der Laufzeit und der Lichtgeschwindigkeit wird der Abstand ermittelt.
- Prinzip der Laufzeitmessung analog zu Ultraschall-Sensoren
- anspruchsvolle, teure Technik
- großer Arbeitsbereich (über 10 m) ; Auflösung $< 0,5 \text{ mm}$



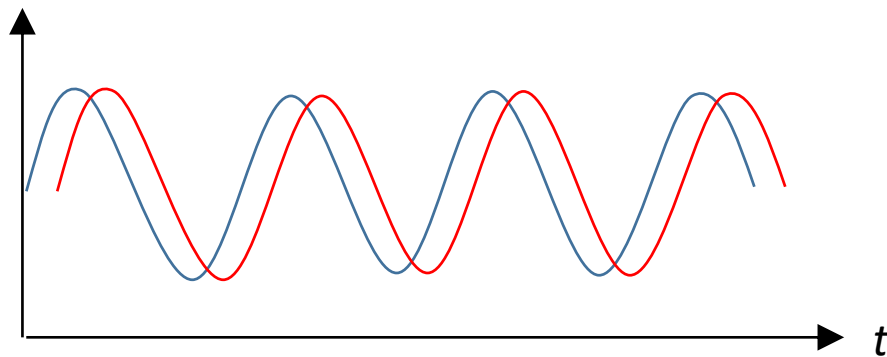
Abstandssensor auf Basis von TOF-Messung

Quelle: www.welotec.com, 26.08.2016

Abstandssensoren / Distanzsensoren

TOF Sensoren - Optische Distanzsensoren auf Basis von Phasenvergleichsmessung

- Prinzip: Eine Laserdiode sendet amplitudenmoduliertes Laserlicht aus. Das Licht wird vom Objekt reflektiert und gelangt zurück zum Sensor. Das ausgesandte Lichtsignal weist gegenüber dem empfangenen Signal eine Phasenverschiebung auf, die je nach Abstand mehr oder minder ausgeprägt ist.
- große Reichweite (5 cm bis 500 m)
- Auflösung $< 0,5 \text{ mm}$
- vergleichsweise teures Messverfahren



*Distanzsensor auf Grundlage von
Phasenvergleichsmessung*

Quelle: www.welotec.com, 26.08.2016

Temperatur-Sensoren

Temperatur-Sensoren:

- verbreitete Sensortechnologien zur Temperaturmessung:
 - Thermistor
 - Thermoelement
 - Pyrometer
- viele Komponenten sind mit Temperatur-Sensoren zum Schutz vor Überhitzung ausgestattet (→ interne Sensoren)
- Temperatur-Sensoren dienen in der Industrierobotik vor allem auch zur Prozessüberwachung (→ externe Sensoren)



Infrarot Temperatur-Sensor

Quelle: www.omega.de, 26.08.2016



Thermistor

Quelle: www.p.globalsources.com, 26.08.2016

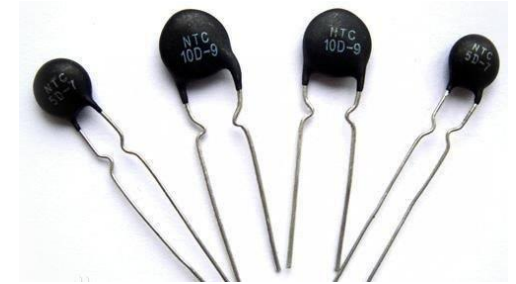
Temperatur-Sensoren

Thermistoren:

- Thermistor = **thermosensitiver Widerstand**
- Prinzip: Metalle (und einige Metalloxide) weisen einen von der Temperatur abhängigen Widerstand auf

$$\Delta R = k \Delta T$$

- elektrischer Widerstand kann mit steigender Temperatur zunehmen oder sinken:
 - PTC Thermistor: Widerstand steigt mit zunehmender Temperatur (z.B. Platin)
 - NTC Thermistor: Widerstand sinkt mit zunehmender Temperatur
- vergleichsweise günstig
- Platin hat eine Empfindlichkeit von ca. 0,4%/K
- NTC Thermistoren erreichen eine Empfindlichkeit von bis zu 30%/K



Thermistoren

Quelle: www.media.licdn.com, 26.08.2016



Thermistoren

Quelle: www.p.globalsources.com, 26.08.2016

Temperatur-Sensoren

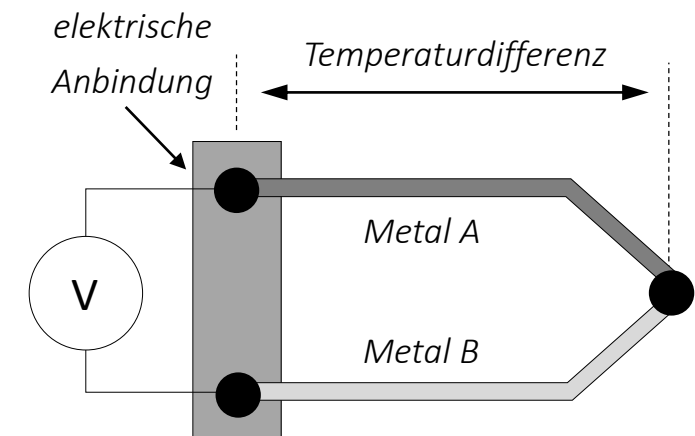
Thermoelemente:

- Thermoelemente nutzen den thermoelektrischen Effekt, auch “**Seebeck-Effekt**” genannt
- **thermoelektrischer Effekt:** In einem Stromkreis aus unterschiedlichen Materialien stellt sich bei einer Temperaturdifferenz eine Spannung zwischen den Kontaktstellen ein (Umgekehrter Effekt: “**Peltier Effekt**”)
- Thermoelement: Zwei verschweißte Drähte aus unterschiedlichem Material
- Thermospannung liegt im Bereich von wenigen $\mu\text{V/K}$
- Thermoelemente sind passive Sensoren



Thermoelement

Quelle: www.friatec.com, 24.08.2016



Aufbau eines Thermoelements

Temperatur-Sensoren

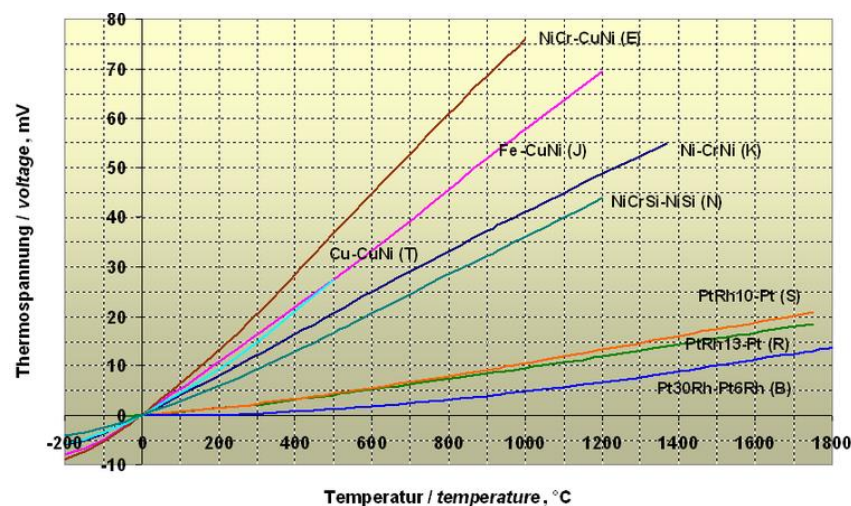
Thermoelemente:

- Thermoelemente sind als einzelne Elemente (zwei Drähte im Glaskörper) oder als konfektionierte Drähte auf Spulen erhältlich
- es gibt eine Vielzahl an Draht-Paarungen mit annähernd linearer Temperatur-Spannungs-Charakteristik

Typ	Draht-Materialien
K	NiCr-Ni
J	Fe-CuNi
N	NiCrSi-NiSi
E	NiCr-CuNi
T	Cu-CuNi
...	...

Thermoelement-Typen

Quelle: www.wikipedia.org, 27.08.2016



Thermospannungen unterschiedlicher Drahtpaarungen

Quelle: www.ikipedia.org, 27.08.2016



Thermoelement-Draht

Quelle: www.thermotrade.eu, 27.08.2016



Thermoelement

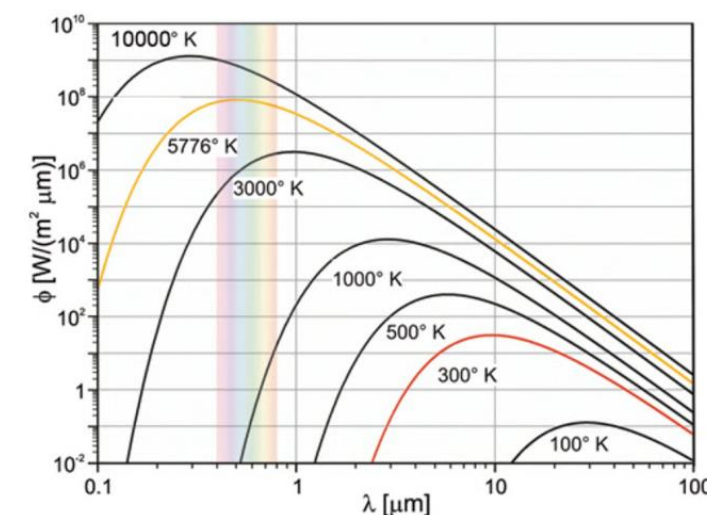
Quelle: www.tcdirect.de, 27.08.2016

Temperatur-Sensoren

Pyrometer:

- auch **Strahlungsthermometer** oder **Infrarot-Thermometer** genannt
- Prinzip: Jeder Körper gibt **Wärmestrahlung** ab. Die Intensität der Strahlung und die Wellenlänge des Emissionsmaximums hängen von der Temperatur ab und können messtechnisch erfasst werden.
- für (übliche) Temperaturen hat **Infrarotstrahlung** größte Bedeutung
- Messung der Strahlungsintensität mit einfachen (günstigen) Sensoren möglich
- Strahlungsleistung:

$$P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$



Plancksche Strahlungsspektren

Quelle: STIEGLITZ, Robert; HEINZEL, Volker. Thermische Solarenergie: Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Springer-Verlag, 2013.

Temperatur-Sensoren

- Vorteile:
 - kontaktfreie Messung; Messung aus sicherer Distanz
 - funktioniert auch auf rauen Oberflächen und Flüssigkeiten
 - dynamische, schnelle Messung ($t = 1 \mu\text{s} \dots 1 \text{s}$)
 - sehr großer Messbereich (bis 3500°C)
- der **Emissionsgrad ϵ** hängt vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit ab und muss angepasst werden, um genaue Messungen zu ermöglichen
- Optik ermöglicht Fokussierung entfernter Objekte / Objektteile



Infrarot Temperatur-Sensor

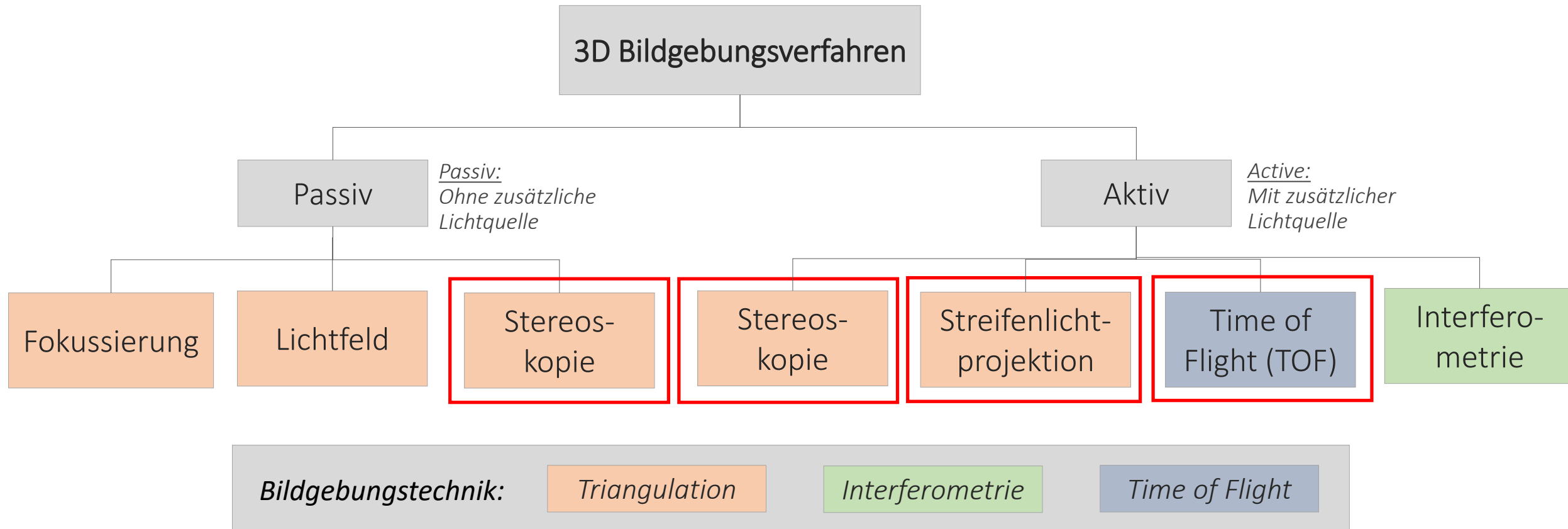
Quelle: www.te.com, 27.08.2016



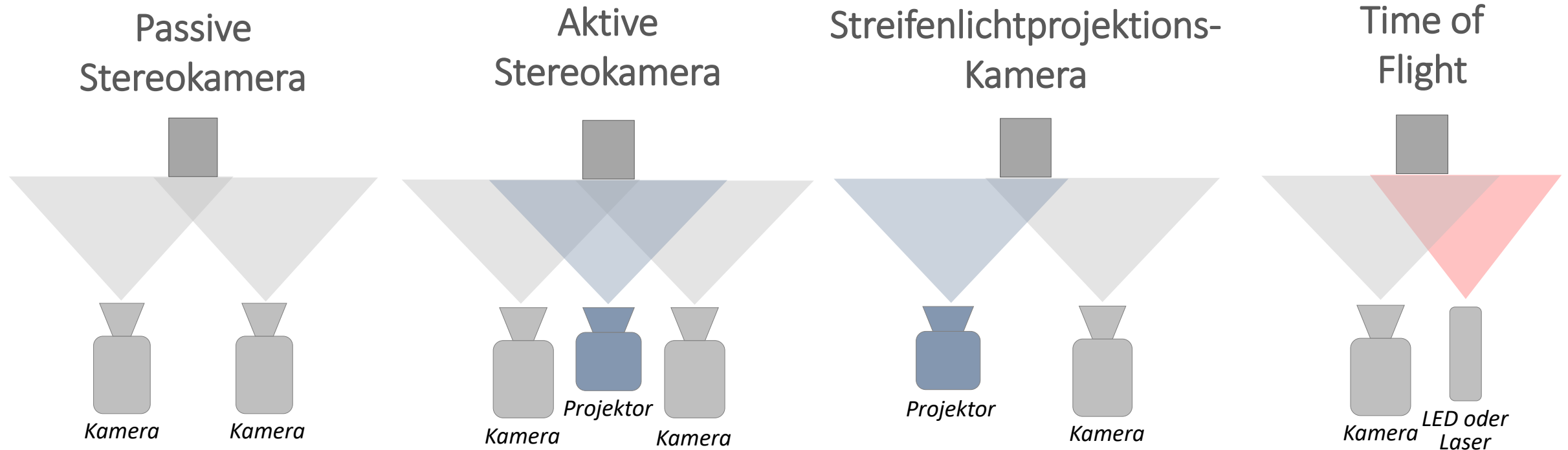
Infrarot Temperatur-Sensor

Quelle: www.omega.de, 26.08.2016

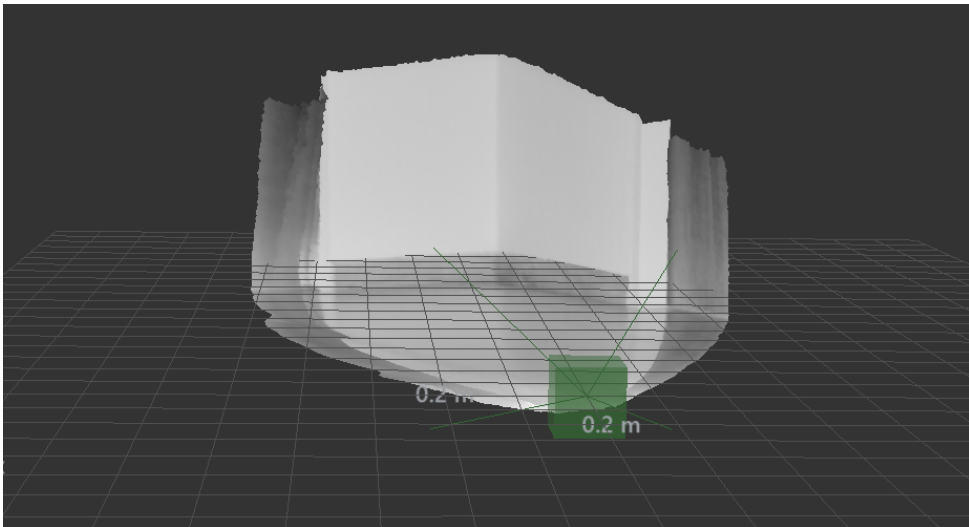
Einteilung von 3D-Bildgebungsverfahren



3D Bildgebungsverfahren für Robotik-Applikationen



- 3D Bild = “Tiefenbild”
→ 3D-Kamera = Tiefenkamera
- **Tiefenbild** = Graustufen visualisieren Abstand zum Objekt



3D-Kamerabild (TOF camera)



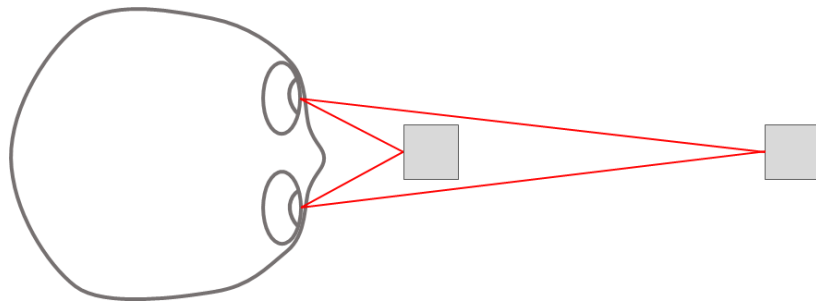
2D-Kamerabild



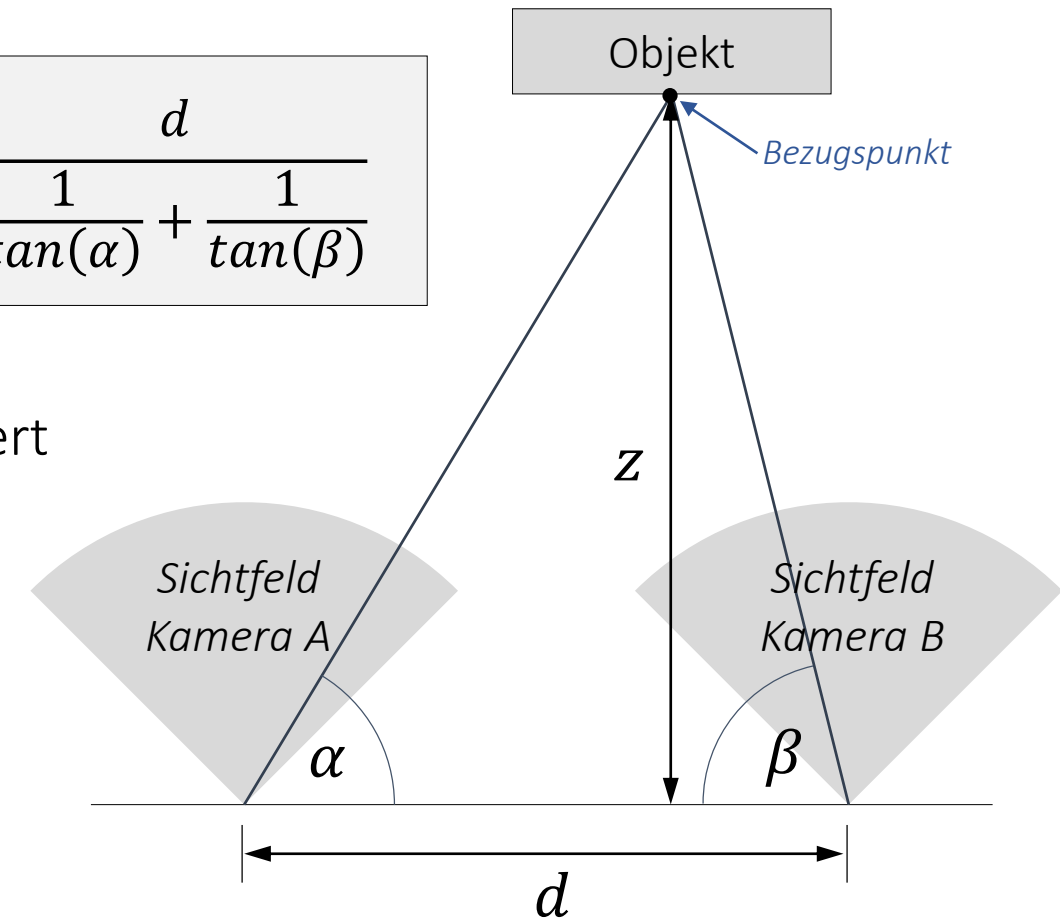
2D-Kamerabild

Stereoskopie

- Äquivalent zum menschlichen Stereo-Sehen
- Basierend auf Triangulation
- Prinzip:
 - Ein Bezugspunkt wird aus zwei Perspektiven fokussiert
 - Sichtlinien bilden Dreieck
 - Höhe des Dreiecks entspricht Distanz



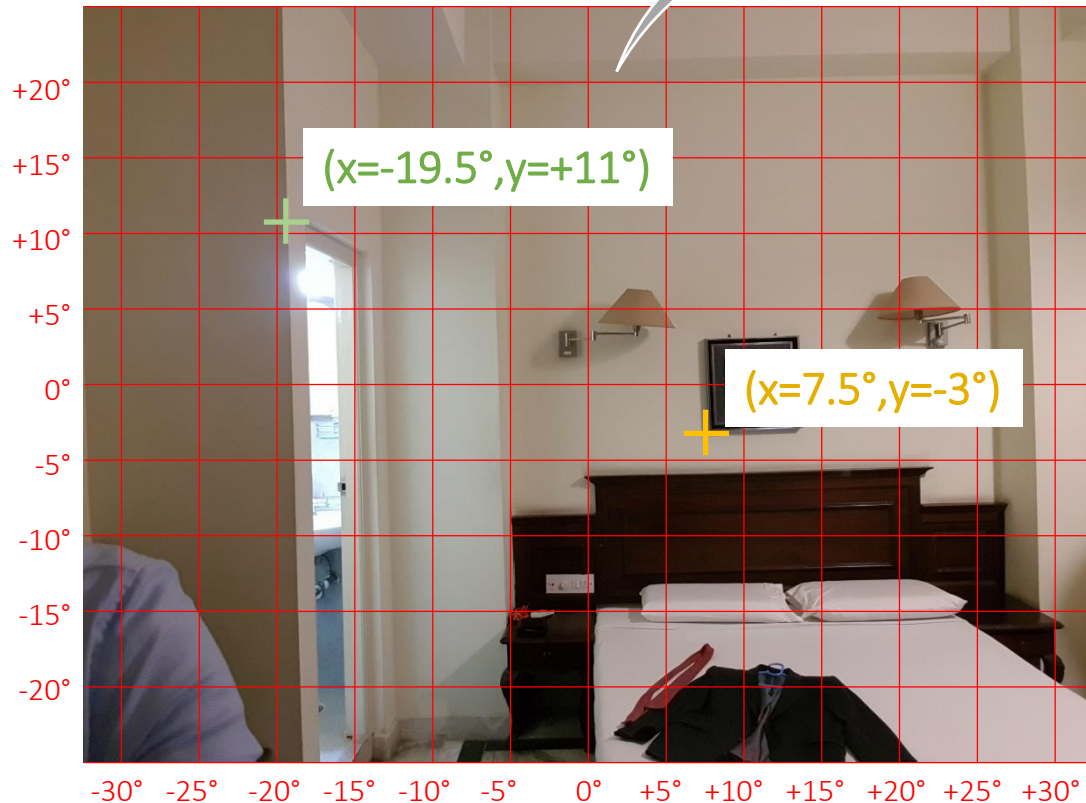
$$z = \frac{d}{\frac{1}{\tan(\alpha)} + \frac{1}{\tan(\beta)}}$$



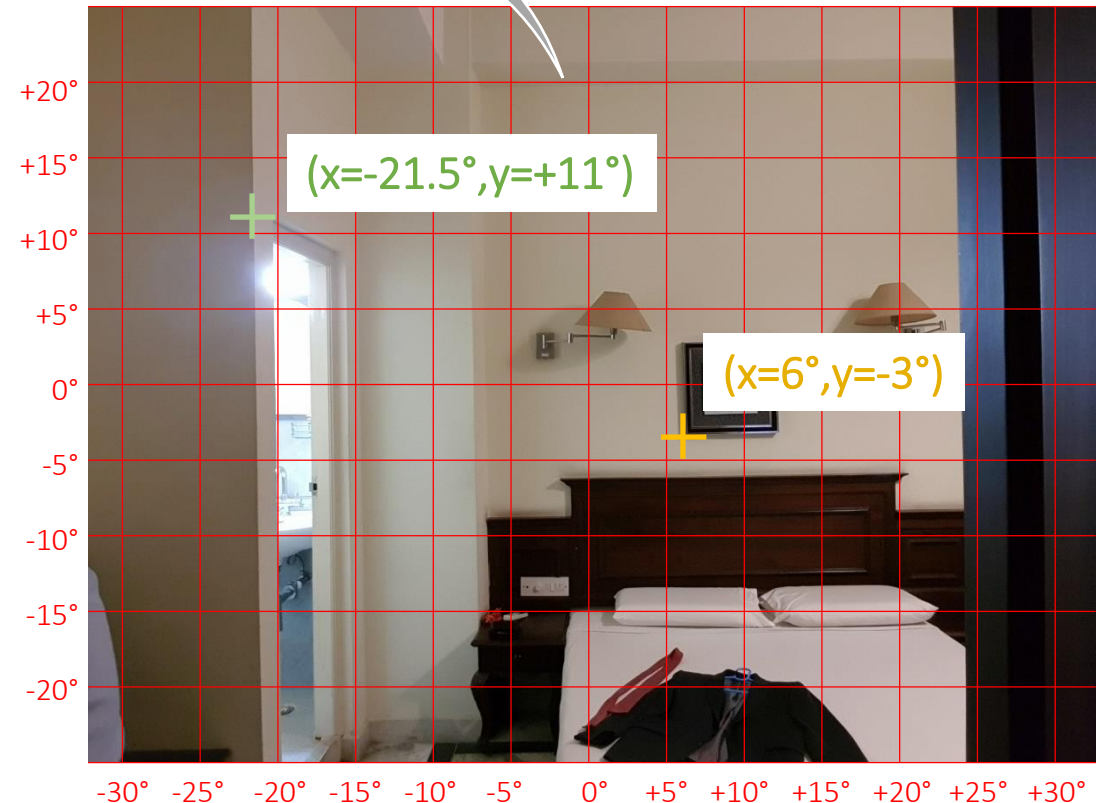
Prinzipdarstellung der Triangulation

Triangulation - Beispiel

Distanz zwischen linker und rechter
Kameraperspektive = 10 cm



Perspektive linkes Auge

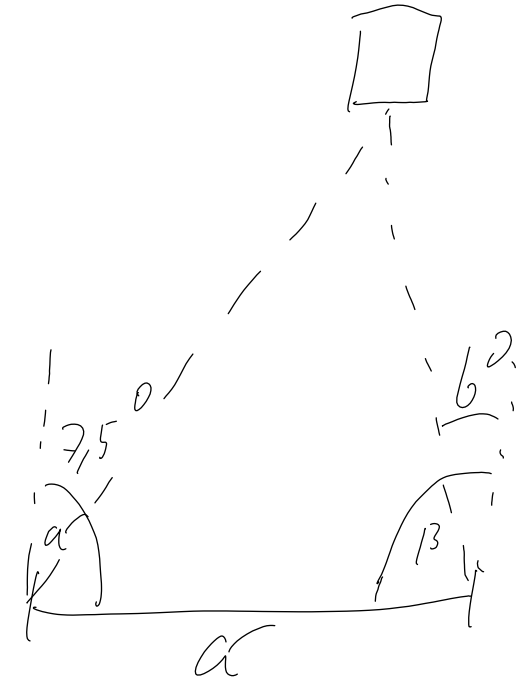


Perspektive rechtes Auge

Beispiel - Berechnung des Abstands z

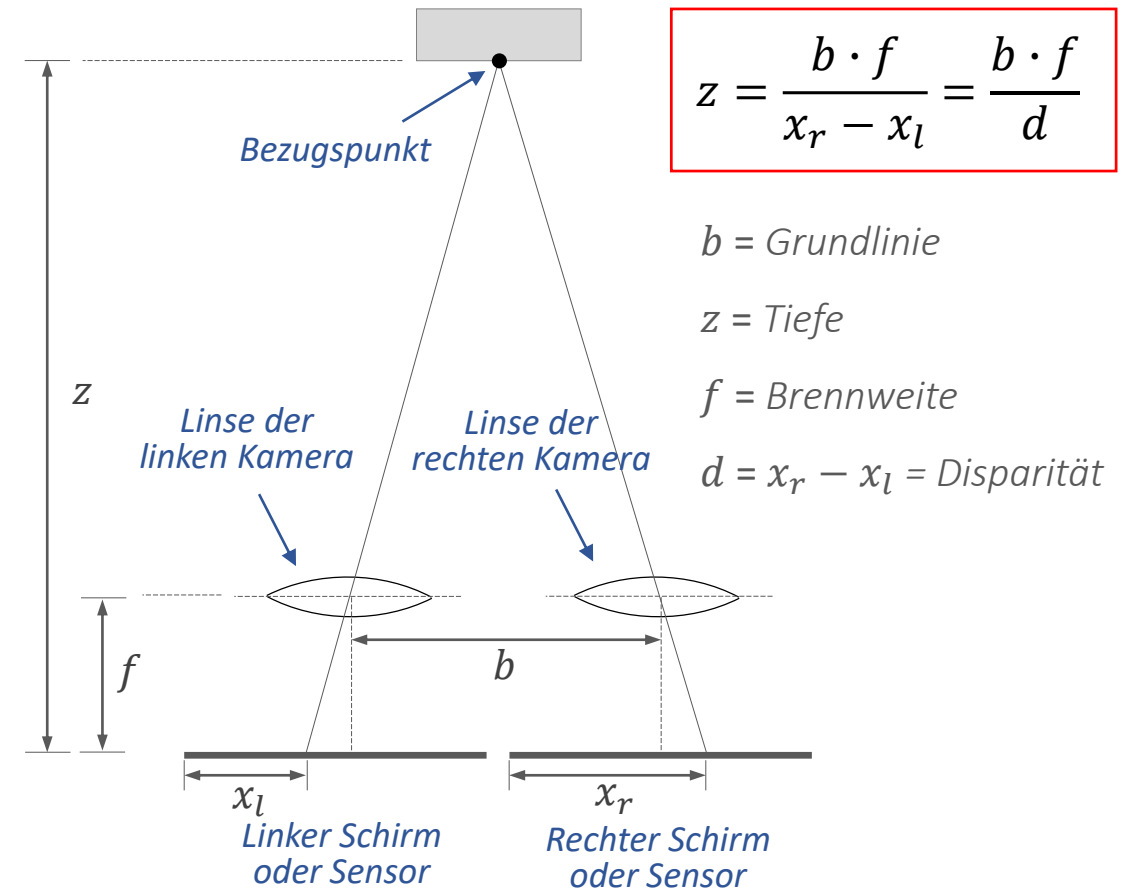
- Abstand zwischen den Augen des Beobachters: $d = 10 \text{ cm}$
- Winkel: $\alpha = 82.5^\circ$, $\beta = 96^\circ$

$$\Rightarrow z = \frac{d}{\frac{1}{\tan(\alpha)} + \frac{1}{\tan(\beta)}} = \frac{10 \text{ cm}}{\frac{1}{\tan(82.5^\circ)} + \frac{1}{\tan(96^\circ)}} = 3.76 \text{ m}$$



- Der tatsächliche Abstand beträgt 3.5 m. → Abweichung aufgrund von Abweichung bei der Winkelbestimmung.

- **“Correspondence” Problem:** Bestimmung des Abstands z (= Tiefe) erfordert Merkmalsabgleich (derselbe Punkt muss aus zwei verschiedenen Perspektiven betrachtet werden)
→ Hoher Rechenaufwand → *warm werden*
- **Visuelle Merkmale:** Z.B. Ecken, Kanten, Textur
- **Merkmalsabgleich** wird i.d.R. auf internem Chip der Stereo-Kamera durchgeführt



Grundaufbau einer passiven Stereo-Kamera

Passive und aktive Stereoskopie

- eingeschränkte Funktion der passiven Stereoskopie bei homogenen und texturlosen Oberflächen
- Verbesserung durch Zufallsmusterprojektion
 - Zufallsmuster dient als künstliche Textur
 - aktive Stereoskopie
- Projektion unterstützt/ermöglicht Tiefenmessung in lichtschwachen, dunklen Bereichen

Aktive Stereoskopie Beispiel

Zufallsmusterprojektion

Quelle: IDS Imaging Development Systems GmbH
<https://en.ids-imaging.com/ensenso-3d-camera-operating.html>

Vorteile

- Hohe Auflösung
- Breites Sichtfeld
- Keine Lichtemission (bei passive Stereoskopie)



SICK – Visionary-B

Quelle: SICK
<https://www.sick.com/de/de/vision/3d-vision/visionary-b/c/g348851>



Intel Real Sense Depth Camera D435i

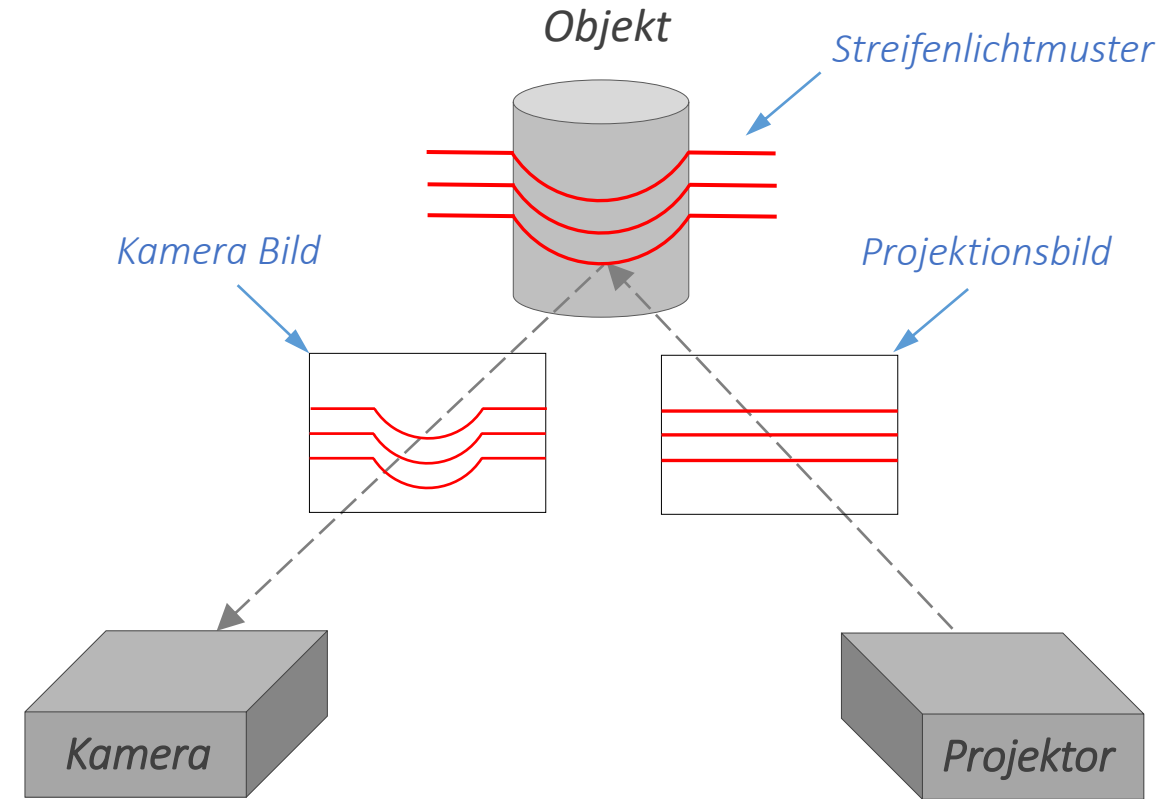
Quelle: Intel Corporation
<https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i/>

Nachteile

- Passive Stereoskopie erfordert merkmalsreiche Oberflächen
- Lichtemission (bei aktiver Stereoskopie)
- Merkmalsabgleich ist rechenintensiv

Streifenlichtprojektion

- Projektion eines Musters (i.d.R. parallele Streifen) auf ein Objekt
- Erfassung des Linienmusters mit 2D Kamera
- 3D Objekt führt zu visueller Verzerrung des Musters und ermöglicht Bestimmung der Gestalt
- Basierend auf Triangulation
- Ähnlich wie die Stereoskopie erfordert das Streifenlichtverfahren einen Merkmalsabgleich



Schematische Darstellung des Messaufbaus



Streifenlichtscanner

Streifenlichtscanner - NaviScan 3D

Quelle: Breuckmann GmbH, Meersburg

<https://www.youtube.com/watch?v=jmTuL4rK6Mo>

Streifenlichtscanner

*Streifenlichtscanner -
Beispiel*

*Quelle: Solomon Vision Robotics
<https://www.solomon-3D.com>*

Streifenlichtscanner - Beispiele



COMET L3D

Quelle: ZEISS Optotechnik - Carl Zeiss Optotechnik GmbH (Neubeuern)
<https://optotechnik.zeiss.com/produkte/3d-digitalisierung/comet/technische-daten>



AICON StereoScan neo

Quelle: AICON 3D Systems GmbH (Braunschweig)
<https://www.hexagonmi.com/de-DE/products/white-light-scanner-systems/aicon-stereoscan-neo>

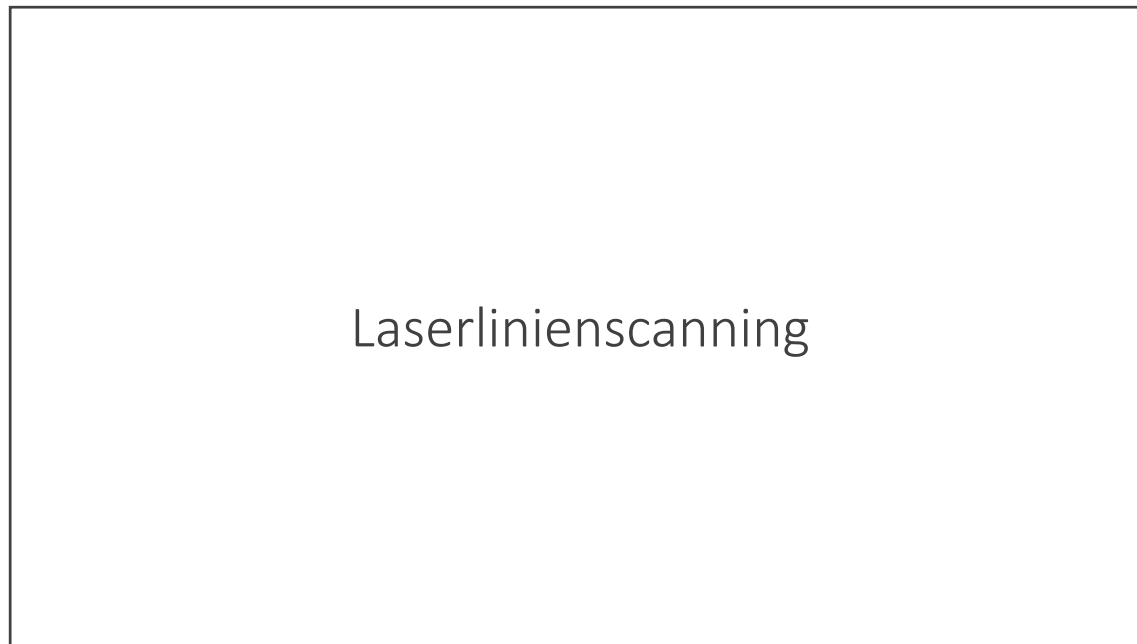


ATOS Compact Scan

Quelle: GOM GmbH (Braunschweig)
<https://www.gom.com/de/messsysteme/atos/atos-compact-scan.html>

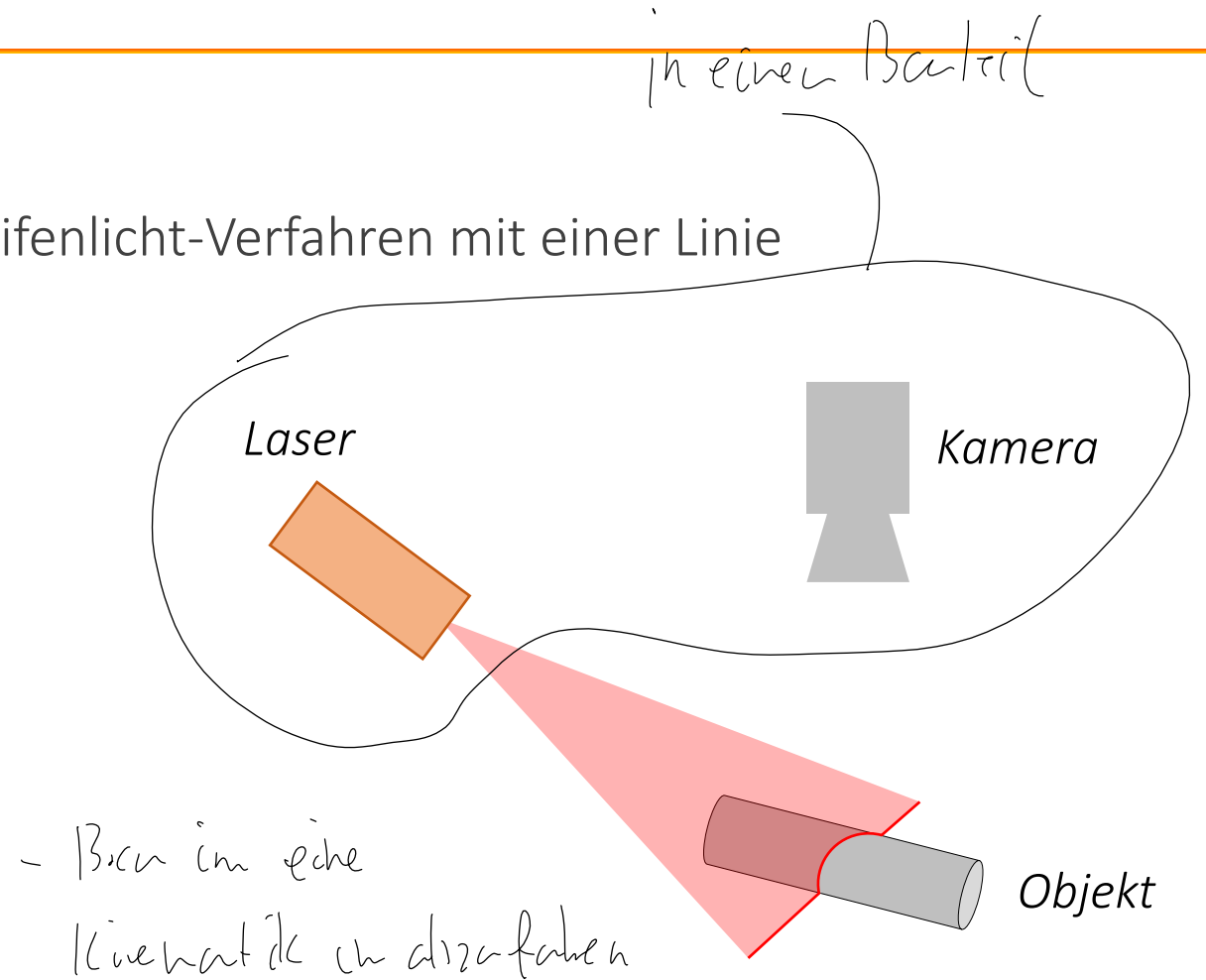
Laser-Linien-Scanning

- Basiert auf Triangulation, vergleichbar mit Streifenlicht-Verfahren mit einer Linie



Bin Picking mit Laserlinienscanner

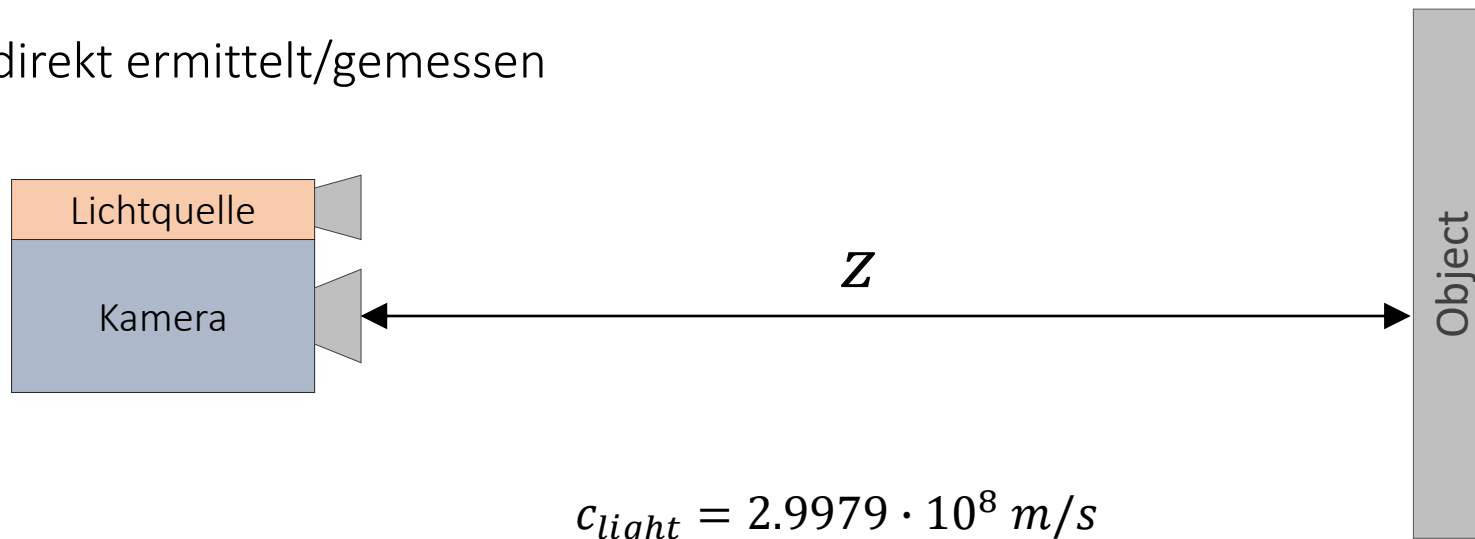
Quelle: <https://youtu.be/KA18cdYKhDI>



Schematische Darstellung des Laserlinienscannings

Time of Flight Sensor

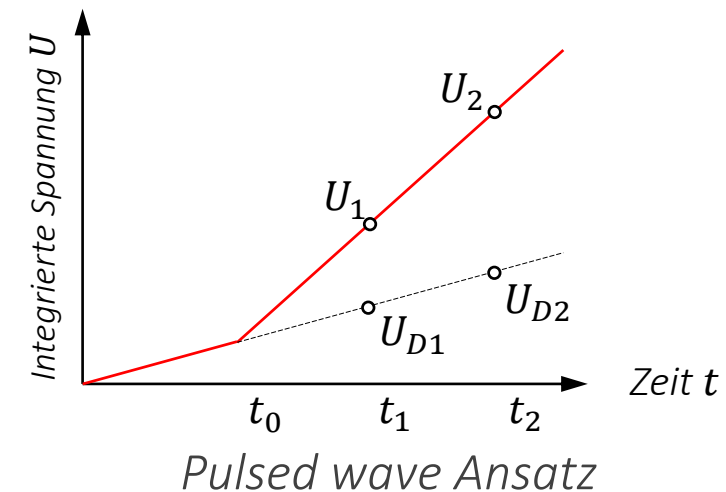
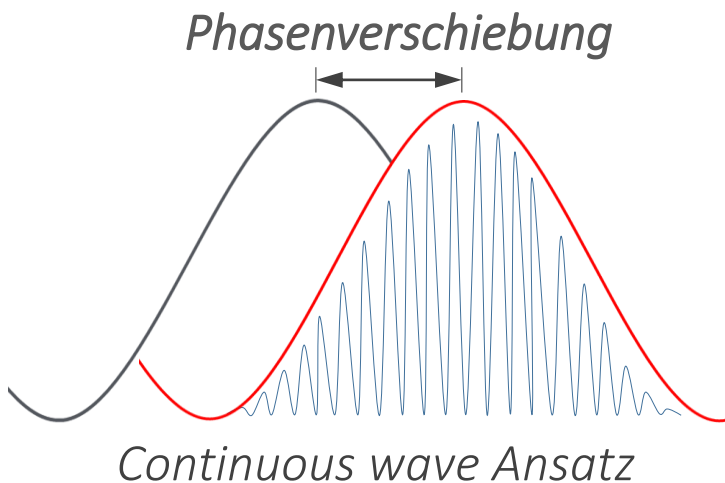
- Time of flight (TOF) = Laufzeit = Zeit, die ein Lichtstrahl auf Weg zum Objekt und zurück benötigt
- Licht wird durch LED oder Laser generiert (im visuellen Bereich oder Infrarotbereich)
- TOF beträgt in Roboterapplikationen einige Nanosekunden
- TOF wird indirekt ermittelt/gemessen



TOF Messverfahren

Es gibt zwei gängige Verfahren zur TOF Messung (in 3D Kameras)

- **Continuous wave:** Basiert auf einer Messung der Phasenverschiebung
- **Pulsed wave:** Basiert auf Integration der Lichtintensität



Vorteile von ToF Kameras

- (Nur) linearer Anstieg des Tiefenfehlers mit der Distanz
- Kompaktes Design (kleines Gehäuse)
- Unabhängig von der Oberflächentextur



IFM O3D311

Quelle: IFM GbmH
<https://www.ifm.com/nl/en/product/O3D311>



SICK Visionary-T

Quelle: SICK
<https://www.sick.com/de/de/vision/3d-vision/visionary-t/c/g358152>

Nachteile von ToF Kameras

- Hohe Lichtleistung erforderlich
→ Hohe Wärmeentwicklung
- (Vergleichsweise) kleine Auflösung
- Interferenz mit anderen TOF Kameras
- Störung durch Multi-Echos
- Störung durch Sonnenlicht

Vergleich von 3D Bildgebungstechniken

	Stereoskopie		Streifenlichtprojektion	TOF
Messbereich	Mittel		Mittel	Hoch
Z-Auflösung	Mittel		Hoch	Gering
Update Rate	Mittel		Langsam	Schnell
Rechenaufwand	Hoch		Mittel	Gering
Kosten	Mittel		Hoch	Gering
Kompaktheit	Mittel		Gering	Hoch
Sonnenlicht-Toleranz	PS – gut	AS - schlecht	Schlecht	Mittel
Einschränkungen	Schlecht auf homogenen, ebenen Oberflächen (mit PS)		Schlecht für Außenanwendungen (→ Starkes Umgebungslicht)	Vergleichsweise kleines Sichtfeld