

Messen: Ausführen von geplanter Tätigkeit zum quantitativen Vergleich der Messgröße mit einer Masseinheit
 ↳ braucht Messeinrichtung
 ↳ grundsätzlich stochastischer Prozess

Messwert: Messgröße = Massezahl x Masseinheit

Kalibrieren: liefert die Abweichung von Normal (nur Messung, ohne staatliche Reglementierung)

Validieren: hat das Ziel die Abweichung zu verkleinern

Eichen: Feststellen des Zusammenhangs zwischen Messwert (von Messgerät ermittelt) und dem richtigen Wert der Messgröße unter staatlicher Hoheit.

Messsignale:

- * analog
- Δ kontinuierlich
- diskont.
- o diskret
- SA Zeit
- AA Amplitude

Quantisierungsschritt:

Analog: o Werte im Wertebereich

- ⊕ proportionale Abbildung zwischen Messsignal und Informationsparameter
- ⊖ einfach zu stören (Rauschen, Temp. Drift)

Diskret: endlich viele Werte im Wertebereich

- ⊕ Störinflüsse erst nach Grenzwert
- ⊖ Informationsverlust gegenüber analog

Kontinuierlich: Informationsparameter kann immer Wert ändern

- ⊕ zeitlicher Verlauf von Messwerten verfolgb.
- ⊖ Störungen können immer wirken, Informationsmenge oft unnötig groß

Diskontinuierlich: Info kann nur zu diskreten Zeitpunkten Wert ändern.

- ⊕ Störungen zwischen Zeitpunkten Auswirkung
- ⊖ Infos nur zu diskreten Zeitpunkten verfügbar

Determiniert: Determiniertheit des Informationspar.

- ⊕ Information mit 1-mal Messen gewinnbar
- ⊖ Info durch Störung unbrauchbar

Stochastisch: Info. para. repräsentiert stochastische Größe.

- ⊕ Störungen nur stark reduziert bemerkbar
- ⊖ Info nur durch mehrfach messen

Analog/Digital Wandler (ADW) engl. ADC

LSB = Least Significant Bit / Auflösung

16 Bit mehr abtast. raten als 8 Bit

LSB = $U_{ref} / (2^n - 1)$ n = Bit

z.B. 8 Bit = 255

Quantisierung: der o Wertevorrat der analogen Größe wird auf einen endlichen Wert. vorteilbasierten abschätz

Nyquist-Shannon Abtasttheorem

fs > 2f | Sin innerhalb Periode 2x abtasten

↳ sonst Aliasing Effekt

Hierarchie der Normale.

Def. über Normale → Primärnormal Normal 1. Ordnung → Sekundärnormale Normal 2. Ordnung → Regionales Eichlabor

Jedes Land besitzt eine

Arbeits- bzw. Referenznormal Normal 2. Ordnung → Betriebliches Kalibrierlabor

Modulation

- Transport von Info auf einem Trägersignal
- höhere Bandbreiten ausnutzung
- Erhöhung der Signalbandbreite

Zeittlicher Verlauf des Messsignals x(t)

unmoduliert **Träger** **Amplituden-Modulation** **Frequenz-Modulation**

Pulsfolge **unmoduliert** **Pulsmodulation** **Pulsamplituden-Modulation** **Pulsfrequenz-Modulation**

Pulsbreite **Pulsdauer** **Pulsamplitude** **Pulsfrequenz** **Pulsphase**

Pulsbreite Verhältnis 25% 50% 125%

Pulscode Modulation

Messobjekt → Messvorrichtung → Messsignal → Messdaten → Informationen

Impuls: (Einzelimpuls)

$f = \frac{1}{T}$

$t_i = \text{Impulsdauer}$

$t_r = \text{Anstiegszeit (raus)}$

$t_f = \text{Abfallzeit (fall)}$

$A_{max} = \text{Amplitude}$

Mittelwert

Linear: zwingend über eine Periode

$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$

Quadratisches: wichtige Kenngröße für Leistungsberechnung bei AC, aufwändig

$\bar{x}^2$

Effektivwert: gehört zur Wirkleistung in Wechselstromschaltungen

$U^2(t)$ oder $i^2(t)$ im Integral

Wirkleistung (AL) = Leistung bei DC

Wirkleistung = Scheinleistung - Blindleistung

EW = Wurzel aus quadratischem MW

Scheitelfaktor (Crestfaktor) = Spitzenwert / Effektivwert

$\xi = \frac{x}{\bar{x}} \geq 1$, hohe SF unerwünscht → Verzerrung

Anwendung in Netzteilen, USV's

Formfaktor: $F = \frac{XE}{\bar{x}}$ = Effektivwert

$1 \leq F \leq \infty$

$\bar{x}$ Gleichrichtwert

einfache Messgeräte erfassen nur $|\bar{x}|$

Gleichrichtwert:

Einweg **Zweiweg**

Nutzen: Energieübertragung: Gleich auf Wechselstrom (Solar) HGU (Energie transport), Wechsel auf Gleichstrom (Leiter)

In Messtechnik → Verwendung einfacher Messgeräte möglich (Gleichstrom)

absoluter Leistungspegel: $10 \lg \left(\frac{P_x}{0.001W} \right) \text{ dB (mW)}$ Studiotechnik

absoluter Spannungspegel: $20 \lg \left(\frac{U_x}{0.775V} \right) \text{ dB}$ Dämpfungsmessung in der Kommunikationstechnik

Feldstärkepegel: $20 \lg \left(\frac{E_x}{1 \mu V/m} \right) \text{ dB (}\mu V/m)$ Funktechnik

Leistungs dichtepegel: $10 \lg \left(\frac{P_x}{1W} \right) \text{ dB (W/m}^2)$ Funktechnik

Möglichkeiten zur Linearisierung (Kompensation)

Analoge Kompensatorschaltung

Rechnerische Kompensation (Digital rechner)

Übertragungsverhalten

System wandelt ein Eingangssignal in ein Ausgangssignal um, diese sind im Normalfall nicht gleich

Lineare Systeme:

Ausgangssig. mit gleicher Frequenz wie Eingangssig.

Ausgangssig. mit Amplitude und Phasenverschiebung

"Aus" mit anderen Amplitude und Phasenverschiebung

Jede Messeinrichtung ist ein Übertragungssystem (idealerweise linear und 1. Ordnung)

Dualcode

1010

offset-fehler

Skalierfehler

1 Realer Wandler mit Offset

2 Nichtlinearität

3 Idealer Wandler (absolute Genauigkeit)

4 Realer Wandler mit Skalierfehler

Ersatzmodell des Übertragungssystems

- ⊕ weitgehend unabhängig von ihrem konkreten System
- ⊕ kostengünstiger ⊕ kann damit rechnen, simulieren

Testsignale

Impuls (Dirac-Funktion) "Schalter An/Aus"

1-100 ns Hochspannungstechnik

10-100 ps Hochfrequenztechnik

10-100 fs Puls Lasertechnik

Sprung (Heaviside-Funktion) "Schalter AN"

gebräuchlichste Testsignal

signalgenerator

Spannungstechnik R-TRIG

Rampe

Anfahrprozesse "fader gleichmäßig hochfahren"

rotierende Maschine bei realen Systemen muss Rampe enden

Dynamische Kennlinie: zeitabhängig

Technisches System mit Übertragungsverhalten

Testsignal am Eingang

Dynamische Kennlinie erscheint am Ausgang

Darstellung Dyn Fehler durch Messsystem

Die Eignung einer Messeinrichtung für Messung wird mit dyn & stat. Kennlinie überprüft.

Struktur des Messsystems

Messobjekt → Messgröße → Messsystem (Messgröße auf Messwert) → Messwert → Messwertangabe

Einfluss → Vergeß → Störgröße

Hilfsenergie

Klirrfaktor: "alle Oberschwingungen zu Gesamtschwingung"

Mass für nichtlinearität im Übertragungsweg

$K = \sqrt{\frac{U_{f0}^2 + U_{f1}^2 + U_{f2}^2 + \dots}{U_{f0}^2}} \cdot 100\%$

Bsp. $U_A = 10V \cdot \sin(t)$

U_{f0} : größte

Klirrkoeffizient: "Eine Oberschwingung zu Gesamtschwingung"

$k = \frac{U_{f1}}{\sqrt{U_{f0}^2 + U_{f1}^2 + U_{f2}^2 + \dots}} \cdot 100\%$

Logarithmische Übertragungsverhältnisse

- ⊕ Übersichtlichkeit von Diagrammen

Anwendung:

- Akustik (Schalldruckpegel)
- Optik (Dämpfung optische Strede)
- Schwingungslehre (Bode-Diagramm)

$X_1 = \text{Eingang}$

$X_2 = \text{Ausgang}$

Umrechnung dB zu lin: $x_{dB} = 20 \cdot \lg \left(\frac{x_2}{x_1} \right)$

$x_{dB} = 10 \cdot \lg \left(\frac{x_2}{x_1} \right)$

$dBV = 20 \cdot \lg \left(\frac{x_2}{x_1} \right)$

Messmethoden

Erst Abbe: Länge → erfassende Merkmal, Messwerkörper → fluchtend angeordnet

Ausschlagmethode:

- ⊕ keine Hilfsenergie nötig
- ⊖ entzieht dem Objekt Energie (Rückwirkung)

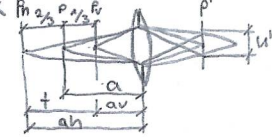
Differenzmethode:

- ⊕ keine Rückwirkung auf Messobjekt
- ⊖ normalisierte Hilfsenergie erforderlich
- ⊖ Messverhältnisse müssen unterschiedlich
- ↳ unterschiedliche Wirkung v. Störinflüssen

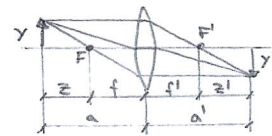
Kompensationsmethode

- ⊕ keine Rückwirkung auf Messobjekt
- ⊕ hohe Empf. um Indikator möglichst genau
- ⊕ Störung werden kompensiert, da Mess und Vergleichsgröße gleich
- ⊖ hoher Aufwand

Scharfenermittlung
 $av = \frac{a}{1+K}$ Abstand vorne $av + \frac{1}{2}t = a$
 $ah = \frac{a}{1-K}$ Abstand hinten $ah - \frac{1}{2}t = a$
 $t = ah - av$ Schärfentiefe K : Hilfsvariable
 $K = \frac{k(a-f) \cdot u'}{f^2}$ k : Blendenzahl (z.B. 2.8)
 $u' = \frac{ah - av}{ah + av} \cdot \frac{f^2}{k \cdot (a-f)}$ a : fokussierte Distanz
 $b = \frac{f^2}{u' \cdot k}$ f : Brennweite [mm]
 u' : Unschärfekreis aus Linsenparameter
 b : Hyperfokale Distanz (ab b alles scharf)

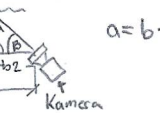


Prinzip: möglichst dünne Linie auf Obj. projizieren
 • Linie an Oberfläche verformt
 • Kamera erfasst Reflexion
 • Intensitätswerte werden in 3D Messpunkte umgerechnet



$z \cdot z' = -f^2$
 $\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} = -\frac{z}{f} = 1:m \quad \left| \frac{1}{a'} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f} \right|$

Lichtschnittverfahren:
 • Linie an Oberfläche verformt
 • Kamera erfasst Reflexion
 • Intensitätswerte werden in 3D Messpunkte umgerechnet



$a = b \cdot \frac{\tan(\alpha) \cdot \tan(\beta)}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)}$

Weit verbreitet zur 3D Formfassung, aktives Verfahren
 Messobjekt oder Laserlinie muss bewegt werden
 Fast ausschliesslich Linienlaser mit fokussierender Optik
 optimal: matte, nicht raue Oberfläche (körnige Struktur)

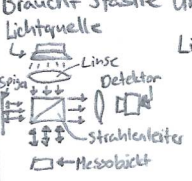
Grenzen:
 Materialeigenschaften der Oberflächen $\rightarrow$ Einfluss auf Genauigkeit & Durchführbarkeit
 Bild mit körniger Struktur bei rauen Oberflächen:
 Helles Speckle $\Rightarrow$ konstruktive Interferenz
 Dunkler Speckle $\Rightarrow$ negative Interferenz
 Resultiert in inhomogener Linie auf Sensor
 Resultat $\rightarrow$ Punktewolke $\rightarrow$ Nachbearbeitung
 wird meist mit Dreiecksnetz berechnet
 Nachbearbeitung:
 Schliessen von Lücken
 Störende Fragmente entfernen
 Änderung der Dichte der Punktemenge
 Glätten der Punktewolke

Anwendungen:
 Schweißnahtkontrolle, Reverse Engineering, Totale Automatische Inspektion, Nietverbindungen, Fertigungs-kontrolle

Bildkorrelation
 Genaue Oberflächenkonstruktion
 System aufbau: mind. 2 Kamera, 1 Auswertungseinheit, Beleuchtungssystem
Spannungsmessung:
 Prinzip: In mind. 2 Kamerabildern werden identische Bilder gefunden
 beide Kamerasysteme erfassen Messobjekte
 Punkte gemessen die in beiden Bildern zu sehen sind
 Messprinzip wird Vorwärtsschnitt genannt
 $\rightarrow$ grosse zuverlässige Datenerfassung möglich
 $\rightarrow$ geht auch mit Slow-Motion

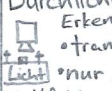
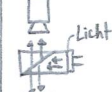
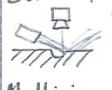
Wind gemessen:
 Verformungen (Distanz P-P' ändert)
 Dehnungen (unmittelbare Umgebung P-P' ändert)

Fazit 3D-Messverfahren:
 Es können statische & dynamische Größen gemessen werden
 Es existieren aktive & passive Messverfahren
 3D Messwerte $\rightarrow$ Qualitätssicherung, Werkzeugentwicklung

Weisslichtinterferometer
 Braucht stabile Unterlage $\rightarrow$ anfällig auf Vibration
 Lichtquelle

 Lichtquelle (die Licht mit Kohärenz-länge von wenigen μm emittiert)
 Prinzip: parallel geführter Lichtstrahl durch Strahlenleiter $\rightarrow$ in 2 Wege aufgeteilt, 1 Strahl beleuchtet Oberfläche, 2. Strahl wird zum Referenzspiegel abgelenkt
 (+) schnelle flächige Topographiemessung (hervorragende Höhenauflösung im sub-Nanometer-Bereich)

Industrielle Messtechnik / Fertigungsmesstechnik:
 Gegenüberstellung der Soll-Kord (CAD & Zeichnung) und Ist-Koordinaten
 3D Messsystem:
 • Theodolit (Ding auf Strasse)
 • Laser Tracker
 • Strukturiertes Licht
 • Koordinatenmessmaschine
 2D & 1D Messsystem
 • Weggeber
 • Extensometer (Ding bei Zugprüfung)
 • Kameras
 Schritt von 3D zu 2D immer möglich $\rightarrow$ umgekehrt nicht

Messköpfe:
 • Taktill: Schallend, messend
 Taktile Messung mit einem mechanischen Messkopf
 Notwendige Kraft um eine Messung auszulösen Pd oder Pe
 • Optisch: Passiv, Aktiv
 Messbereich: variiert von wenigen Mikrometern zu 50-60m
 Kraftverlauf:
 • Die Kraft hat direkte Auswirkung auf die Messung
 • Bei Passiven Systemen ist die Kraft die Messgrösse
 • Bei aktiven ist die Messkraft fast konstant
 Durchbiegung der Taster kaum zu vermeiden
 $\rightarrow$ "Verkleinerung" der Tastkugel $\rightarrow$ wirksamer Tastkugelradius

Optische Sensoren Beleuchtung:
Durchlicht:

 Erkennung Umrisse des Objektes
 • transparente Objekte auch Inhalt
 • nur in unmittelbarer Nähe der Leuchte
Hellfeldauflicht:

 • Gravur erscheint sehr dunkel
 • Licht Form kann sehr effizient mittels Bild-Verarbeitung ermittelt werden
 • Die Vermessung erfolgt in der Ebene
Dunkelfeldauflicht:

 • glatte, stark reflektierte Flächen erscheinen dunkel und Oberflächen Defekte erscheinen hell
Multiring "Shape from Silhouettes"

 • Vom Schatten zum 3D Modell
 • Fokus als Tiefenmessung

Punktmuster (Streifenmuster)
 • Homogene und leistungsstarke Lichtquelle
 • Laser Geometrie bekannt
 • sehr schnell und genau (0,1mm auf 20m)
Laserprojektoren:
 • Teilweise inhomogene geometrische Form
 • Teilweise starke Reflexion an den Rändern
 • "deutliche Absorption der Materialien (Glas, Plastik)
 • nicht geeignet für spiegelnde Oberfläche
Regenbogenmuster:
 3D Ergebnis, verschiedene Muster projizieren
Theodolit:
 0,5" Winkelgenauigkeit, 1,50
 0,5mm Streckengenauigkeit
 Messmethode: Räumlicher Vorwärtsschnitt
 • Aufwändig und teuer
 • Höchstgenau

Wegsensoren
Laser Wegmesssensor:
 + grösster Messbereich - geringe Umgebungsbeständigkeit
 + kleiner Lichtpunkt
 + hohe Präzision
 + extrem kurze Ansprechzeit
 + misst alles
2D-Laser-Wegmesssensor:
 + misst sogar unregelmässige Oberflächen & Formen
 + hohe Stabilität
 - geringe Umgebungsbeständigkeit
Induktiver Wegmesssensor:
 + hohe Präzision
 + extrem kurze Ansprechzeit
 - Misst nur Metalle - kleiner Messbereich

Kontaktwegmesssensor:
 - Misst keine weichen Objekte
 - Lange Ansprechzeit
 - Objektbeschädigung
Kriterien Sensorwahl: erforderliche Auflösung 90% der Toleranz
 • Auflösung & Genauigkeit
 • Messabstand
 • Messbedingungen (öl, Staub)
 • Messobjekt (Material, Form, Grösse)
 $\rightarrow$ am wichtigsten
 • Messfrequenz

Anwendungen:
 Dickenmessung
 Vibrationsmessung:
 Laser Wegmesssensor; hohe Abtastrate möglich
 Höhenunterschied und Formmessung:
 Laserwegmesssensor, z.B. Reifenprofil
Fehlerquellen:
 Transparente und Semitransparente Oberflächen
 $\rightarrow$ vom inneren reflektiert $\rightarrow$ ungenauer Laserschnitt
 Positionierung der Messköpfe

 ✓ Akzeptabel, ✗

Zeitkonstante τ ist entscheidend:
 Ermittlung von τ :
 - Experiment mit Testsignal (dyn. Kennlinie)
 - Rechnerisch mit RL-Ersatzmodell (1. Ordnung)
 für Messsignalfrequenz $\omega > \omega_0$ ist Messverzerrung
 $\omega = \omega_0$ dämpft sie bereits um $\sim 3\text{dB}$ (ca. 30%)
 $G(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_0})^2}} = G(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{f}{f_0})^2}}$
 A: Ausgang
 E: Eingang

Messergebnisse:
 Anzahl Klassen = $\sqrt{n}$ lieber +1 als -1
 Klassenbreite = $x_{\max} / p$
 $M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ Mittelwert
 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
 $z = \frac{x - M}{\sigma}$
 $r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$
 A = Anzahl Punkte
 Absolute Häufigkeit: $H_k = \frac{m_k}{A}$
 Relative Häufigkeit: $h_k = \frac{m_k}{n}$
 Wahrscheinlichkeit für 1 Ergebnis: $P_k = \frac{m_k}{n}$

Verteilungen:
 Rechteckverteilung
 Dreieckverteilung
 Normalverteilung
 zweivariante Normalverteilung
 nur x_1 oder x_2 möglich

Fehlerarten
 indirekte Messung Abweichungen:
 - Systematisch
 - Zufällig
 grobe Fehler ("Mist gebaut")
 Elementarfehler (aussehen)
 Systematische Fehler (z.B. Temp., Luftfeuchtigkeit)
 Zufällige Fehler $\rightarrow$ einseitig, zweiseitig
 Wahre Fehler (existiert nicht)
 Messung + wahrer Fehler = wahrer Wert
 $\rightarrow$ Zufällige Fehler können durch mehrfache Messungen bestimmt werden

Sensoren
 Funktion wird gekennzeichnet durch Funktionsgleichung
 sowie die Empfindlichkeit an einem Arbeitspunkt
 Zusammenhang von Messgröße und Sensor-
 Ausgangssignal y im stat. Zustand.
Aktiv
 sendet Energie in seine Umgebung aus und
 misst zurückkehrende Signale
 Sonar, Infrarot, Laserscanner, Kamera mit Blitze
Passiv
 misst ausschliesslich Signale aus der Umgebung
 Kontaktsensor, Inkrementalgeber, Gyroskop, Kompass
 GPS, Kamera

Durch Sensorik können Messgrößen erfasst, in elektr.
 Signale umgewandelt mit elektr. Geräten
 hergestellt und für div. Aufgaben verwendet werden
 Sensoren nutzen Wandlereffekte für phys. Größen
 geometrische Größen:
 - Piezo-Effekt $\rightarrow$ Widerstand ändert sich bei Längenänderung
 - Poisson-Effekt $\rightarrow$ Material verformt sich orthogonal zu Druck
 - thermische Größen:
 - Coriolis, Doppler, Gauss, Hall $\rightarrow$ Magnetfeld Strom
 - dynamische Größen:
 - Lorentz Law, Piezoelectric $\rightarrow$ elektr. Spannung bei Verformung

Sensor Eigenschaften:
Messbereich: in dem Messanordnung, Messgeräte-
 fehler innerhalb festgelegter Grenzen ist.
Dynamik: Verhältnis von Ober- zu Untergrenze des Mess-
 bereichs
Auflösung: kleinste Messbare Unterschied zweier Messwerte
Linearität: Abhängigkeit des Messwertes von der beobach-
 teten Grösse $\rightarrow$ durch kalibrieren
Messfrequenz / Zyklus- / Ansprechzeit:
 Anzahl Messungen innerhalb eines bestimmten Zeitraums
Empfindlichkeit:
 Änderung des Messwertes bei Änderung des
 gemessenen Parameters

Kraftsensoren:
 direkt: Basieren auf intrinsischen mechanoelektr.
 Effekten (Piezoelektrischer-/Piezoresistiver Sensor)
 indirekt: nutzen "Zwischengrößen" zur Kraft-
 detektion (Kraftmessung über ein Federdiagramm
 auf eine Wegmessung z.B. mit induktiven Wegsensoren zurück)
 $\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \epsilon$ DMS überelastische Dehnungen Widerstand
 Änderungen Δ
 Kraftkompensationsprinzipien:
 Bestimmen zu messende Kraft FM durch Vergleich
 mit bekannter, meist elektromechanisch variierbaren
 Gegenkraft FK.

Dehnungsmessstreifen DMS:
 $R = p \cdot \frac{l}{A} = p \cdot \frac{4 \cdot l}{D^2 \pi}$
 p: spez. R R: Widerstand
 l: Drahtlänge
 A: Fläche Draht
 D: Durchmesser
 E: relative Längenänderung
 $\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l} = k \cdot \epsilon$
 $k = \frac{\Delta p}{p \cdot \epsilon} + 1 + 2 \cdot \mu$
 k: k-Faktor
 μ : Querdehnungszahl

Vorgehen Beschleunigungssensor:
 - Kalibration des Sensoren (Kraft, Entfernung, IMU)
 - statisch
 - dynamisch
 - Durchführung des Exp. nach Aufgabenstellung
 - Auswerten der Daten
Beschleunigungssensor: Kapazitive Messmethode
 erzeugen relative Werte im Bezug auf Schwerkraft
 driftet $\rightarrow$ verändern Werte über die Zeit

Optischer Sensor vs. Ultraschall
 + Reaktionszeit
 + Messobjekt Grösse
 + Erkennung unebener
 Oberflächen
 + kein Stör. a. Temp.,
 Wind-Schwank
 - starke Beeinträchtigung
 durch Partikel in Luft
 - ungeeignet für Licht-
 absorbierende Materialien
 + unempf. gegen Farben,
 glanz, Durchsichtigkeit
 - dünnwandige Mesobj.
 $< 0.01\text{mm}$
 - heisse Objekte
 - Winkelversatz
 - Oberflächenbeschaff-
 einheit entscheidend

Bildentstehung:
 Strahlung einer Lichtquelle wird von einer
 Oberfläche reflektiert, von einem fotosensitiven
 Medium (Filme, CCD/CMOS-Sensor, Photodiode)
 erfasst und gespeichert.
Kamerasystem (Kameragehäuse + Objektiv)
Objektiv: erfasst Strahlung, Oberfläche Objektiv hat
 Einfluss auf Qualität und Abbildung, Abblende, mechan. Linsen
Ideale Kamera: kein Objektiv sehr kleine Blende / Loch
Kamerakonstante: Abstand Bildebene zu Blende
Z-Koordinate: "Blende zu Objektiv
Lochkamera / Camera Obscura:
 Kamerasysteme für Messungen auf $\rightarrow$ reduziert
Bilder als Datenquelle:

Zentralprojektion: Entfernung lässt Objekte größer
 kleiner erscheinen, parallele Linien in Realität
 $\rightarrow$ im Bild schneiden sie sich (Fluchtpunkt)
Bildmassstab: wenn bekannt $\rightarrow$ Masse im Bld messbar
 Skalierung: Objekt verändert Grösse abhängig von
 Tiefe oder Bildauflösung
Rotation: Längenverhältnisse bleiben erhalten
Translation: Objekte verändern Position unabhängig
 von Kamera position.

Messbilder:
 Aufnahme perspektive / Zeitpunkt für Bildauswertung
 entscheidend
 Grundsätzlich nur Vermessung ebener Objekte,
 da Tiefeninfo. verloren geht.
 Isometrische Transformation: $x' = \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x$
 Homographie: $x' = \begin{pmatrix} A & t \\ v & 1 \end{pmatrix} x$
Bild und Kamerakordinatensystem
 Voraussetzung fürs Messen im Bild
 - meist kartesisch
 - Ursprung bei Digital immer in linken
 oberen Ecke.

Ähnlichkeitstransformation:
 $\square \rightarrow \square$ gleiche Winkel, bleiben erhalten
 $x' = \begin{pmatrix} sR & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x$
Affintransformation
 $\square \rightarrow \square$ andere Winkel, bleiben nicht erhalten
 $x' = \begin{pmatrix} A & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x$ $A = R(\theta) R(-\theta) DR(\theta)$
 $D = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$

Polynomale Transformation
 $\square \rightarrow \{ \}$ benutzt um schlechte Objekte
 zu korrigieren

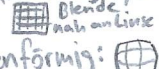
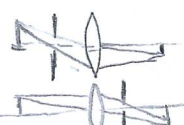
Projektivtransformation
 Richtige Punkte-Passung essenziell
 Mehr als 4 identische Punkte
 $\rightarrow$ überbestimmtes GLS $\rightarrow$ durch Optimierung
 berechnen
 mind. 4 für Berechnung (eindeutige Lösung)

Homographie
 Allg. Fall der Transformation zwischen 2
 Ebenen Koordinatensystemen
 - Komposition aus geometrischen, Ähnlichkeit
 - Affin- und Projektivtransformation
 - Hohe Bedeutung für das Messen von Bildern
 - Gleichungssystem ist schlecht konditioniert
 und Bestimmung der H-Matrix benötigt robuste
 Rechenverfahren (z.B. SVD)

Aktive Messverfahren:
 - Deflektometrie - Streifenprojektion
 - Streulichtsensor - Ellipsometrie

Passive Messverfahren:
 - Photogrammetrie - Fokusvariation
 - Konfokale Mikroskopie - Silhouettenchnitt
 Parameter beeinflusst Genauigkeit:
 - Verzerrung - Belichtung
 - Auflösung - Grösse

CCD Sensor
 Benötigt bestimmte Zeit um Spannung aufzubauen
~~schlecht~~ absorbing photons
 generated charged particles
 sehr zuverlässig, mehrere KHz Auflösung, sehr schnell

Verzeichnungstypen
 Käte 
 Tonnenförmig: 
 Kissenförmig: 
 Radialsymmetrie: 
 Tangential asymmetrische Verzeichnung
Chromatische Abberation:
 Verschiedene Lichtwellen (RGB) brechen unterschiedlich
 sphärisch. Führen zu Brennlinie statt Brennpunkt
 $\rightarrow$ wird unscharf

Effizienz Sensor
 Quantum Efficiency, Wirkungsgrad eines Sensors
 wie viele Photonen bestimmter Wellenlänge müssen
 am Sensor landen um Photoelektr. Effekt.

Bildgebende Messverfahren
 - digitale Bilder tasten Umgebung diskret ab
 - Bildpunkt hat unendliche Grösse
 - Grösse der Fläche bestimmt durch
 Kamerakonstante (u.Brennweite) & Objektentfernung
 - Bildmassstab abhängig von Objektentfernung
 - Objekt dessen Fläche kleiner ist als Pixelfläche
 im Objektbereich $\rightarrow$ nicht abgebildet oder
 verzerrt werden mit anderen Objekten
 (Nyquist-Shannon Abtasttheorem)

Direkte Messung: Absolutmessung, Messschieber
Indirekte Messung: Referenzmessung, nicht direkt
 ablesbar - Zwischenschritt, Messuhr

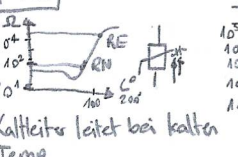
Empfänger-Sensoren

Widerstandsthermometer:

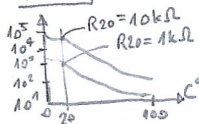
Messung eines Temp. abhängigen Widerstandes (R)
Pt-100 / Pt-1000 → falls Erwärmung durch Strom-
durchfluss ein Problem ist
Sensor
Einsatzlänge 200-900mm

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

PTC



NTC



Kaltleiter leitet bei kaltem Temp

Thermoelement

Messung einer Temp. abhängigen Spannung
Ausnutzung des Seebeck-Effekts (Gesamt Peltier)

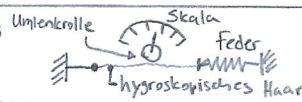
Vergleich Widerstandsthermo vs. Thermoelement

	Widerstandsthermo.	Thermoelement
Messbereich	-200 → 500°C	-250 → 2320°C
Ansprechzeit	2.5 - 10s	< 1s
Grösse	3.175 - 6.35mm	< 1.6mm
Genauigkeit	bis ± 0.001%	± 1°C

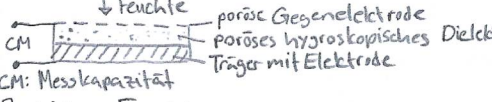
Feuchtemessung in Gasen

- Wettervorhersage
 - Trocknung
 - Gesundheit (schimme)
 - Absolute Feuchte: $F_{abs} = \frac{m_w}{V_{Lu}} \left[\frac{g}{m^3} \right]$
 - relative Feuchte: $F_{rel} = \frac{F_{abs}}{F_{sat}} \cdot 100\%$
- Verpackungstechnik
 - Atemschutz (Druckluftflaschen)
 - Lagererhaltung

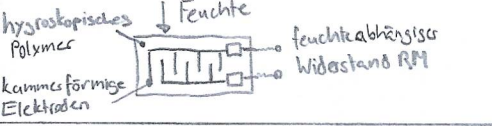
Fadenhygrometer:



Kapazitiver Feuchtemesser:



Resistiver Feuchtemesser:

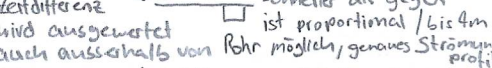


Durchflussmessung

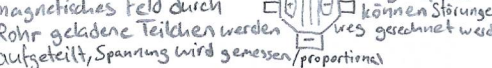
Differenzdruck (Venturi):



Ultraschall:



Magnetisch Induktiv:



Add-In

Alles was in Rechner kommt. Kann selbstständige Recheneinheit sein (z.B. Texas Instruments Zeug)
oder auch unselbstständiges (z.B. Grafikkarte) PC-Express

Add-On

Über standardisierte Schnittstellen angeschlossen
vielfält & flexibel, können das System umteilig
viele Module/FK erweitern.

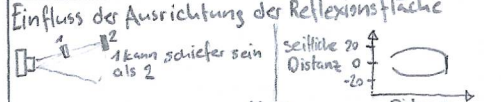
Bus-Systeme

Parallel: byteweise Datenübertragung, Vielzahl von
Managementleitungen, hoher Verdichtungsanwand, geringe
Reichweite, hohe Übertragungsrate, einfaches Protokoll
möglich, Bsp. IEC-625-Bus, VXI Bus, PXI

Bus-Systeme serielle

Bitweise Datenübertragung, keine Managementleitungen
niedriger Verdichtungsanwand, grosse Reichweite
bis einige km, aufwendiges Protokoll Bsp. RS485

Prak 2 Ultraschallsensor



Schallkeule zeigt den effektiven Erfassungsbereich
Wegen Schallabsorption und Diffusion in der Luft bei
höheren Distanzen seitliche Distanz wird kleiner.

Prak 3 Schwingungsmessungen

$y(t) = y_0 \cdot \cos(\omega_0 t)$ $\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{m}}$ m: Masse Prüfgewicht
Schwingungsdauer $T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}$ D: Federrate
harmonisch → gedämpft (Reibungsvorgänge)
nichtlinearität der Federrate/mehrere Nulldurchgänge →
fehler Periodendauer
Lösung: Butterworth-Filter
Material: Ultraschall, Kraftsensor, Feder

Prak 4 Kraft-Beschleunigung-Wegmessung

Abweichung Erdbeschleunigung: zu tiefe Raumtemp.
Körpertemp., Vibration
 $f(t) = A \cdot \sin(\omega(t - t_0))$ A: Amplitude to: Phasenverschiebung
 ω : Frequenz
Fehler: Befestigung des Sensors, ungewollte (x, y)

Prak 5 Berührungsloses Messen statischer Größen

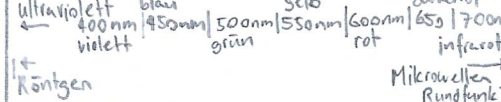
Einfluss Foto: Kamera entscheidend, Winkel,
Schatten, Stichprobe muss genug gross sein

Länge l Meter m Lichtgeschwindigkeit und Zeit
Zeit t Sekunden s Periodendauer einer Strahlung
Masse m Kilogramm kg Planck-Konstante, Sekunde und h
Stromstärke I Ampere A Kraftwirkung zwischen parallel
Elementarladung + Sekunden
Temperatur T Kelvin K Tripelpunkt des Wassers

Lichtstärke Iv Candela cd Strahlung des schwarzen Körpers
Stoffmenge n Mol mol Atomzahl (12 in 12g) Avogadro
 $N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$ $J = 1Nm = V \cdot A \cdot s = W \cdot s$ $W = \frac{J}{s} = V \cdot A$
 $L_0 = \frac{m^2 \cdot kg}{s^2}$

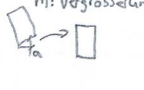
Exa E 10^{18}	Dezi d 10^{-1}	1 Zoll = 0.0254m
Peta P 10^{15}	Zenti c 10^{-2}	
Tera T 10^{12}	Milli m 10^{-3}	
Giga G 10^9	Mikro µ 10^{-6}	
Mega M 10^6	Nano n 10^{-9}	
Kilo k 10^3	Piko p 10^{-12}	
Hekto h 10^2	Femto f 10^{-15}	
Deka da 10^1	Atto a 10^{-18}	

sichtbares Spektrum



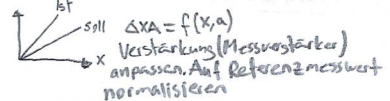
Ähnlichkeitstransformation

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = m \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$$

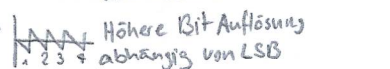


Fehler typen

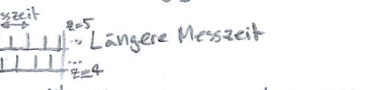
Multiplikativer Fehler



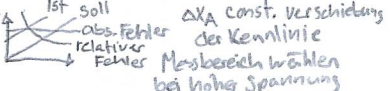
Quantisierungs Fehler



Digitaler Restfehler



Additive Fehler



$\Delta y_i = \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 \dots$ Partielle Ableitung der Formel nach den ein zehnen
 x_n , danach mal Δx_n rechnen und alle addieren.

max. Frequenz? wenn frequenzabhängige Amplituden-
abfall kleiner als 1% sein soll. $f_0 = 10 \text{ kHz}$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \geq 0.99 \Leftrightarrow \sqrt{\frac{1}{1 - 0.99^2}} \cdot f_0 = f = 1.425 \text{ MHz}$$

frequenzen über 1.425 MHz können mit Vorrichtung
nicht genau gemessen werden!

$$\text{Wellenlänge } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{299792458 \text{ m/s}}{f} = \dots \text{ m}$$

Distanz aus Phasenunterschied:

$D = \frac{1}{4\pi} \cdot \Delta \varphi \cdot \lambda$
Phasenvergleichsverfahren Nachteil:
Mehrdeutigkeit, max. eindeutig gemessene Distanz beträgt λ
Alternativverfahren, Distanzmessung:
ToF-Time of Flight, Triangulation, Interferometric

Encoder: $\frac{P_s}{\text{min}} \rightarrow \frac{P_u}{\text{min}}$ Encoder an System $\frac{P_u}{\text{min}} \cdot 10$
Pulsfrequenz $P_s \cdot 10$ für System
 $\dot{\varphi} = (\Delta \varphi / p_{\text{max}} \cdot 2\pi) / \Delta t$ $\frac{360^\circ}{P_u} = \text{min Winkelauflösung}$

Um Leskopf 1° genau positionieren zu können, wie lautet
minimale Winkelauflösung des Winkelgebers?
 $1^\circ/2 = 0.5^\circ$

Unsicherheit $\Delta a = 0.01 \text{ m/s}^2$ wie genau ist der gemessene
Weg nach 10s?
 $s(a, t) = \frac{1}{2} a t^2$ $\frac{\partial s}{\partial a} = \frac{1}{2} t^2 \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot 10^2 \cdot 0.01 = 0.5 \text{ m}$

Laser 600nm Distanzsensor (Phasendifferenz)
Auflösung: $\alpha = 1^\circ$, $\sigma_a = \pm 0.1^\circ$
Sin reflektiert und kommt zurück, Winkelunterschied wird
gemessen.

Auflösung = $\frac{600 \text{ nm}}{360^\circ} = 1.66 \text{ nm}$
Eindeutigkeitssbereich = Wellenlänge = 600nm
weil sich diese eine Wellenlänge immer wiederholt und wir
nur die 360° messen.
Genauigkeit = $1\sigma = 0.166 \text{ nm}$
minimale Längenunterschied, zuverlässig 3σ Konfidenzintervall
 $\hookrightarrow 3 \cdot 0.1666 = 0.5 \text{ nm}$
Auflösung Messgenauigkeit verbessern → kürzere Wellenlänge

Sensor 2048 x 2048 px / Sensorelementgrösse von 3.5 µm
Sensormasse in mm: $2048 \cdot 3.5 = 7168 \rightarrow 7.168 \text{ mm}$
Kamerakonstante 25mm, Entfernung 6m, Fläche Pixel in Ebene?
 $\frac{6}{0.025} \cdot 0.0035 = 0.84 \text{ mm}$
0.025 "Bildmagnastab konst, Ebene konst.
Eck-Pixel ist identisch weil Projektionsebene parallel
und Kamera konstant, und weil Projektionsebene parallel