



64-424 Intelligente Roboter

[http://tams.informatik.uni-hamburg.de/
lectures/2011ws/vorlesung/ir](http://tams.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2011ws/vorlesung/ir)

Jianwei Zhang



Universität Hamburg
Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
Fachbereich Informatik

Technische Aspekte Multimodaler Systeme

Wintersemester 2011/2012



Gliederung

1. Grundlagen der Sensorik
2. Winkel und Bewegungen
3. Kräfte und Druck
4. Abstandssensoren
5. Scandaten verarbeiten
6. Rekursive Zustandsschätzung
7. Sichtsysteme
8. Fuzzy-Logik
9. Steuerungsarchitekturen





64-424 Vorlesung

Vorlesung	Donnerstag 10:15 - 11:45 Uhr
Raum	F-009
Web	http://tams.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2011ws/vorlesung/ir
Name	Prof. Dr. Jianwei Zhang
Büro	F-308
E-mail	zhang@informatik.uni-hamburg.de
Sekretariat	Tatjana Tetsis
Büro	F-311
Telefon	(040) 42883-2430
E-mail	tetsis@informatik.uni-hamburg.de



64-425 Seminar / Übungen

Seminar	Donnerstag 8:15 - 9:45 Uhr
Raum	F-009
Web	http://tams.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2011ws/seminar/ir
Name	Benjamin Adler Prof. Dr. Jianwei Zhang
Büro	F-324
Telefon	(040) 42883-2504
E-mail	adler@informatik.uni-hamburg.de



Organisatorisches

- ▶ **Verbindung von Vorlesung + Seminar**
Aus Zeitgründen kann die Vorlesung nicht alle Themenbereiche von „Intelligente Roboter“ abdecken
- ▶ Seminar
 - ▶ ergänzende Inhalte
 - ▶ kurze Einführungen durch den Veranstalter
 - ▶ „klassische Seminarvorträge“
 - ▶ Laborbesichtigungen, Vorstellung einzelner Roboterplattformen
 - ▶ ggf. Übungen am Rechner



Motivation

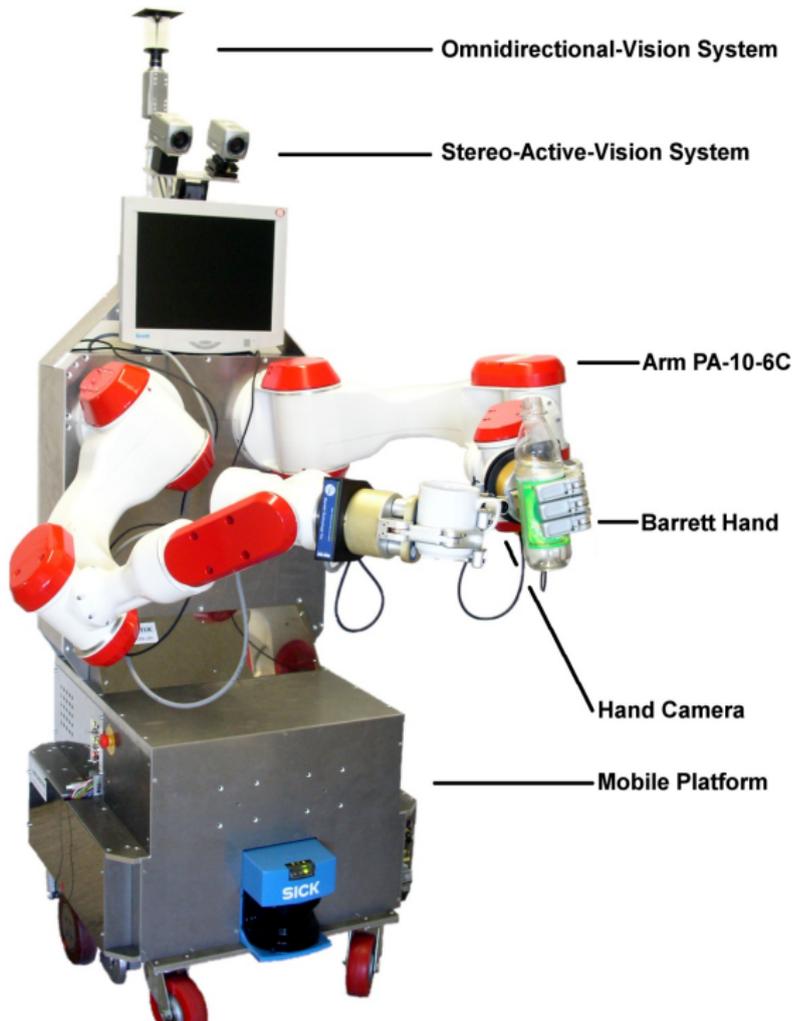
Was sind „intelligente Roboter“?

Robotik umfasst sehr viele Teilgebiete der Informatik

- ▶ Architektur- und Systementwurf
- ▶ Künstliche Intelligenz
- ▶ Bildverarbeitung
- ▶ Sprachverarbeitung
- ▶ Neuronale Netze
- ▶ Regelungstechnik
- ▶ Mechatronik
- ▶ ...

TASER – TAMS Service Robot

Forschungsplattform
für Servicerobotik



TAMS Service Robot

Hardwareplattform / Aktuatoren

- ▶ Neobotix MP-L655
 - ▶ Differentialantrieb
 - ▶ 6 Stunden Akkukapazität
- ▶ 2 × Mitsubishi PA10-6C Arm
 - ▶ 6 Achsen
 - ▶ 10 Kg Tragkraft
- ▶ Barrett 3-Finger Hand: BH8-262
- ▶ Schwenk/Neige Kamerakopf
- ▶ Lautsprecher



TAMS Service Robot (cont.)

Sensoren

- ▶ Kamerasysteme
 - ▶ Stereo Kameras
Sony DFW-VL500 (FireWire, VGA)
 - ▶ Omnidirektionales Sichtsystem
DFW-SX900 (FireWire, 1280 × 960)
 - ▶ 2 × Handkamera
- ▶ Laserentfernungsmesser
 - ▶ 2 × Sick LMS200
 - ▶ Ethernet Anbindung durch eingebettetes System
- ▶ Gyroskop in der Plattform



TAMS Service Robot (cont.)

- ▶ Kraft-/Moment Sensoren
 - ▶ Gelenke der Arme
 - ▶ Finger der Hände
- ▶ Positionssensoren
 - ▶ Plattform
 - ▶ Arm
 - ▶ Hand und Finger
 - ▶ Schwenk-/Neige-Einheit

Rechner

- ▶ Standard PC-Hardware
- ▶ Betriebssystem: Linux





TAMS Plattformen

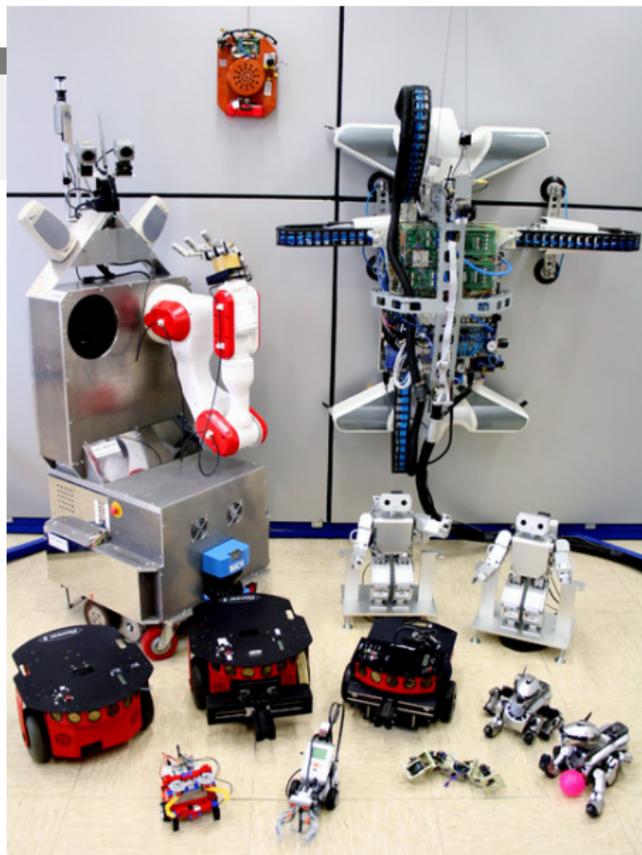
▶ sehr unterschiedliche Plattformen

- ▶ Service-Roboter
- ▶ Humanoide Roboter
- ▶ Fensterputz-Roboter
- ▶ Wall-climbing Roboter
- ▶ Modulare Roboter
- ▶ Mobile Plattform (Pioneer)
- ▶ Sony Aibo
- ▶ „Edutainment“

⇒ Systemarchitekturen

⇒ Sensoren, Aktuatoren

⇒ mechanischer Aufbau





Was sind „intelligente Roboter“?

- ▶ Die Frage lässt sich nicht generell beantworten
- ▶ Zu viele unterschiedliche Systeme und Architekturen

Die Vorlesung soll einen Überblick vermitteln, d.h.

- ▶ Grundlagen und allgemeingültige Prinzipien
- ▶ Gängige Verfahren und Algorithmen
- ▶ einige Konstruktionsprinzipien
- ▶ ...



Was sind „intelligente Roboter“? (cont.)

Wie sind Robotersysteme aufgebaut?

- ▶ Methodik
- ▶ Entwurf und Aufbau des mechanischen Systems
- ▶ Kinematik und Dynamik
- ▶ Modellierung und Simulation
- ▶ Controller-Design und -Algorithmen
- ▶ Softwarearchitektur
- ▶ Systemintegration
- ▶ ...



Was sind „intelligente Roboter“? (cont.)

Welche (Teil-) Aufgaben werden vom System durchgeführt?

- ▶ Lokalisation
- ▶ Pfadplanung
- ▶ Bewegung
- ▶ Manipulation
- ▶ Kontrolle von Kraft, Geschwindigkeit. . .
- ▶ Sensordatenerfassung und -verarbeitung
- ▶ Fusion und Interpretation der Daten
- ▶ Mensch-Maschine Schnittstelle
- ▶ Interaktionsmöglichkeiten
- ▶ . . .



Gliederung

1. Grundlagen der Sensorik

Einführung

Messen mit Sensoren

Eigenschaften von Sensoren

Literatur

Sensoren in der Robotik

2. Winkel und Bewegungen

3. Kräfte und Druck

4. Abstandssensoren

5. Scandaten verarbeiten

6. Rekursive Zustandsschätzung

7. Sichtsysteme

8. Fuzzy-Logik



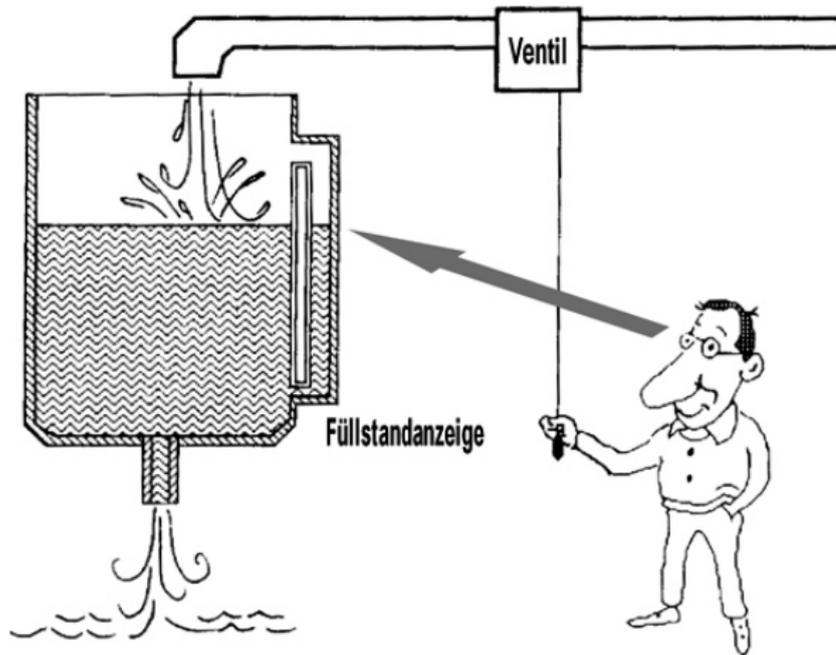


Gliederung (cont.)

9. Steuerungsarchitekturen



Ein einfaches Beispiel





Was ist ein Sensor?

Der Sensor besteht aus zwei Teilen:

- ▶ der Füllstandanzeige und
- ▶ dem menschlichen Auge,
das ein Signal an das Gehirn sendet





Was ist ein Sensor?

Der Sensor besteht aus zwei Teilen:

- ▶ der Füllstandanzeige und
- ▶ dem menschlichen Auge,

das ein Signal an das Gehirn sendet

Definition

Ein **Sensor** ist eine Einheit, die ein Signal oder Stimulus

- ▶ empfängt
- ▶ und darauf reagiert



Natürliche und physikalische Sensoren

Natürliche Sensoren:

- ▶ Reaktion ist elektrochemisches Signal auf Nervenbahnen
- ▶ **Beispiele:** Hören, Sehen, Tasten, ...



Natürliche und physikalische Sensoren

Natürliche Sensoren:

- ▶ Reaktion ist elektrochemisches Signal auf Nervenbahnen
- ▶ **Beispiele:** Hören, Sehen, Tasten, ...

Physikalische Sensoren:

Definition

Ein **physikalischer Sensor** ist eine Einheit, die ein Signal oder Stimulus

- ▶ empfängt
- ▶ und darauf mit einem *elektrischen Signal* reagiert



Eingangssignal

- ▶ Ein Sensor wandelt ein (generell) nicht-elektrisches Signal in ein elektrisches um
- ▶ Dieses Signal wird als **Stimulus** bezeichnet





Eingangssignal

- ▶ Ein Sensor wandelt ein (generell) nicht-elektrisches Signal in ein elektrisches um
- ▶ Dieses Signal wird als **Stimulus** bezeichnet

Definition

Ein **Stimulus** ist eine

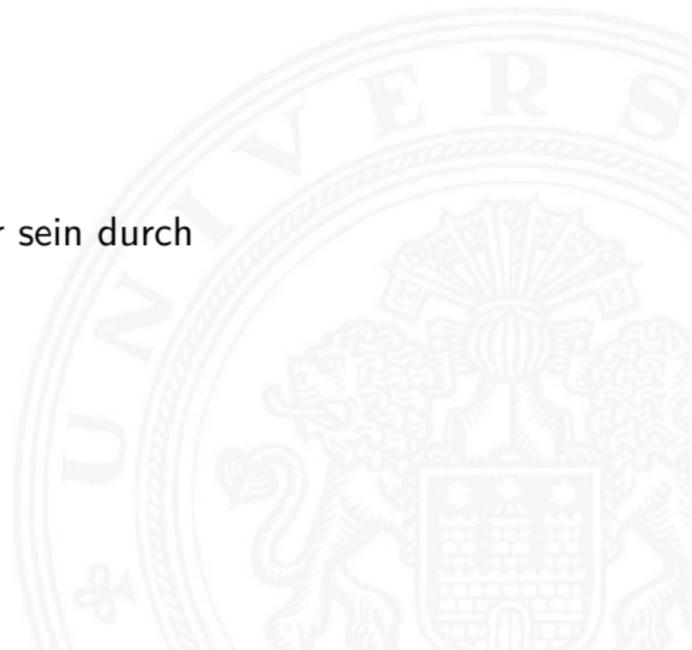
- ▶ Größe,
- ▶ Eigenschaft oder
- ▶ Beschaffenheit,

die wahrgenommen und in ein elektrisches Signal umgewandelt wird



Ausgangssignal

- ▶ Das Ausgangssignal kann
 - ▶ eine Spannung,
 - ▶ ein Strom oder
 - ▶ eine Ladung
 sein
- ▶ Es kann weiter unterscheidbar sein durch
 - ▶ Amplitude,
 - ▶ Frequenz oder
 - ▶ Phase





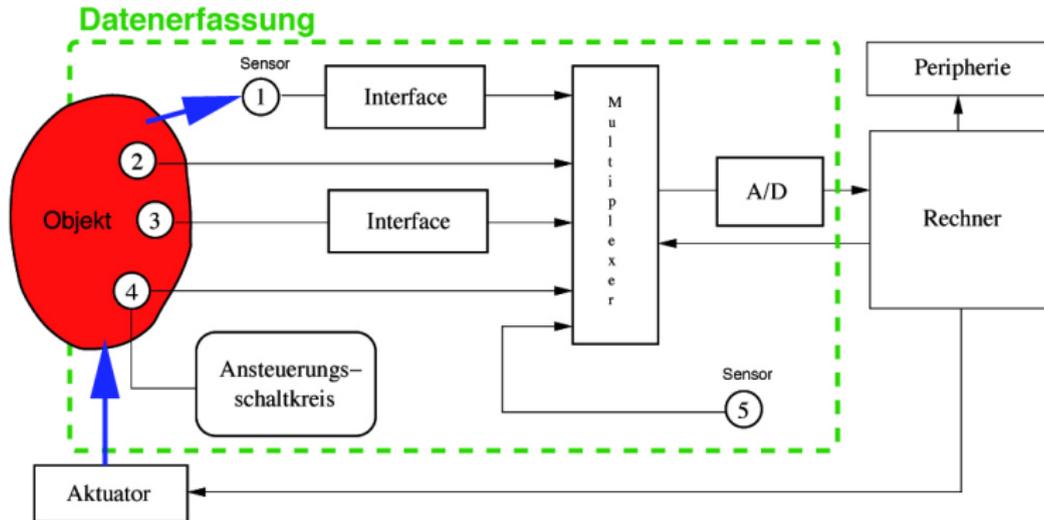
Sensortypen

- ▶ **extrinsisch:**
Ermitteln von Informationen über die *Systemumgebung*
- ▶ **intrinsisch:**
Ermitteln von Informationen über den *internen Systemzustand*
- ▶ **aktiv:**
Variieren *angelegtes elektrisches Signal* bei Veränderung des Stimulus
- ▶ **passiv:**
Erzeugen *direkt* ein elektrisches Signal bei Veränderung des Stimulus



Sensortypen

- ▶ **extrinsisch:**
Ermitteln von Informationen über die *Systemumgebung*
- ▶ **intrinsisch:**
Ermitteln von Informationen über den *internen Systemzustand*
- ▶ **aktiv:**
Variieren *angelegtes elektrisches Signal* bei Veränderung des Stimulus
- ▶ **passiv:**
Erzeugen *direkt* ein elektrisches Signal bei Veränderung des Stimulus



Sensortypen:

1.: extrinsisch, passiv

2. und 3.: intrinsisch, passiv

4.: intrinsisch, aktiv

5.: intrinsisch (in der Datenerfassung), passiv



Multiplexer (MUX)

- ▶ Schalter bzw. Weiche
- ▶ verbindet Signale einzeln mit dem A/D-Wandler
- ▶ Vorteil: nur ein A/D-Wandler notwendig
- ▶ Rechner steuert das Timing des MUX

Digitale **Sensorausgaben** können auch **direkt** an den Rechner gehen



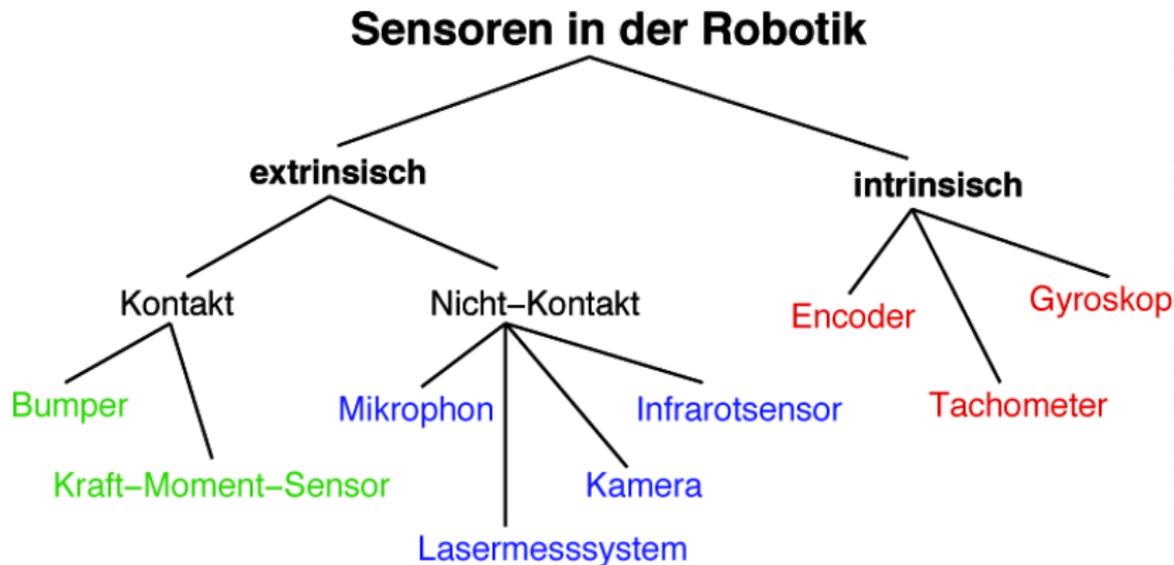
Sensorklassifikation

Klassifikation von Sensoren anhand von:

- ▶ Art des Stimulus
- ▶ Eigenschaften, Spezifikation und Parameter,
- ▶ Art wie Stimulus detektiert wird
- ▶ Art der Umwandlung von Stimulus in Ausgangssignal
- ▶ Material des Sensors
- ▶ Einsatzgebiet



Beispiel-Klassifikation





Messen mit Sensoren

- ▶ wichtiges wissenschaftliches Kriterium: *Reproduzierbarkeit*
- ▶ wissenschaftliche Aussagen müssen vergleichbar sein
- ▶ Aussagen müssen *quantitativ* sein, sie müssen auf Messungen beruhen
- ▶ Messergebnis besteht aus:
 - ▶ Maßeinheit
 - ▶ Zahlenwert
- ▶ **zusätzlich:** Angabe der Genauigkeit der Messung



Messen mit Sensoren

- ▶ wichtiges wissenschaftliches Kriterium: *Reproduzierbarkeit*
- ▶ wissenschaftliche Aussagen müssen vergleichbar sein
- ▶ Aussagen müssen *quantitativ* sein, sie müssen auf Messungen beruhen
- ▶ Messergebnis besteht aus:
 - ▶ Maßeinheit
 - ▶ Zahlenwert
- ▶ **zusätzlich:** Angabe der Genauigkeit der Messung

Messfehler

Es gibt keinen Messprozess, der ein fehlerloses, absolut genaues Ergebnis liefert!



Messabweichung (Messfehler)

Systematische Abweichung („systematischer Fehler“):

- ▶ Abweichung wird durch den Sensor verursacht
- ▶ z.B.: falsche Eichung, dauernd vorhandene Störungen wie Reibung
- ▶ nur durch sorgfältiges Untersuchen der Fehlerquelle zu beseitigen

Zufällige Abweichung („zufälliger oder statistischer Fehler“):

- ▶ Abweichung wird durch unvermeidbare, regellose Störungen verursacht
- ▶ bei wiederholter Messung weichen Einzelergebnisse voneinander ab
- ▶ Einzelergebnisse schwanken um einen Mittelwert



Messabweichung (Messfehler)

Systematische Abweichung („systematischer Fehler“):

- ▶ Abweichung wird durch den Sensor verursacht
- ▶ z.B.: falsche Eichung, dauernd vorhandene Störungen wie Reibung
- ▶ nur durch sorgfältiges Untersuchen der Fehlerquelle zu beseitigen

Zufällige Abweichung („zufälliger oder statistischer Fehler“):

- ▶ Abweichung wird durch unvermeidbare, regellose Störungen verursacht
- ▶ bei wiederholter Messung weichen Einzelergebnisse voneinander ab
- ▶ Einzelergebnisse schwanken um einen Mittelwert



Fehlerangabe

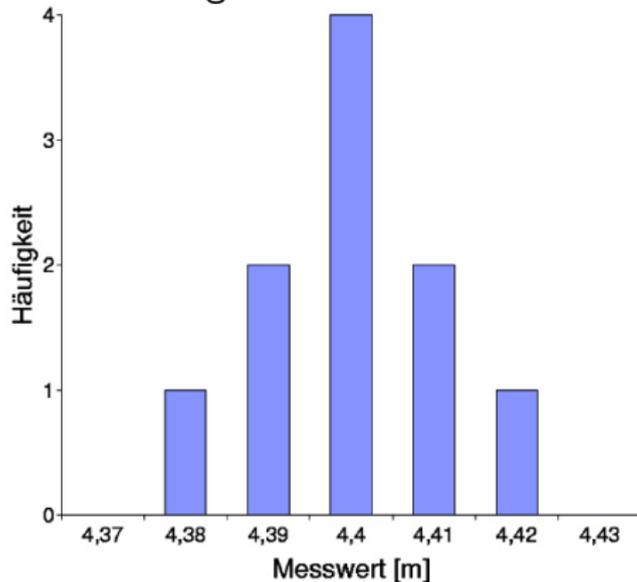
- ▶ Eine Messung ist stets mit Unsicherheit behaftet
- ▶ **Beispiel:** Entfernungsmessung
 - ▶ Abstand zu einem Objekt wird mehrmals gemessen

Einzelergebnisse der Messung:				
4,40 m	4,40 m	4,38 m	4,41 m	4,42 m
4,39 m	4,40 m	4,39 m	4,40 m	4,41 m

- ▶ Einzelergebnisse der Messung sind unterschiedlich

Histogramm

Die Messung lässt sich in einem **Histogramm** darstellen:





Absolute und relative Messabweichung

Die Unsicherheit wird in zwei Formen angegeben:

- ▶ **Absolute Messabweichung** („Absoluter Fehler“):

Der absolute Fehler Δx_i einer Einzelmessung x_i ist gleich der Abweichung vom Mittelwert \bar{x} aller N Messungen $\{x_n | n \in \{1 \dots N\}\}$

- ▶ **Relative Messabweichung** („Relativer Fehler“):

Der relative Fehler ist das Verhältnis von absolutem Fehler zum Mittelwert $\frac{\Delta x_i}{\bar{x}}$



Absolute und relative Messabweichung

Die Unsicherheit wird in zwei Formen angegeben:

- ▶ **Absolute Messabweichung** („Absoluter Fehler“):
 Der absolute Fehler Δx_i einer Einzelmessung x_i ist gleich der Abweichung vom Mittelwert \bar{x} aller N Messungen $\{x_n | n \in \{1 \dots N\}\}$

- ▶ **Relative Messabweichung** („Relativer Fehler“):
 Der relative Fehler ist das Verhältnis von absolutem Fehler zum Mittelwert $\frac{\Delta x_i}{\bar{x}}$



Mittelwert

Den **Mittelwert** \bar{x} der Einzelmessungen x_i erhält man durch

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Der Mittelwert wird auch als **arithmetisches Mittel** oder **bester Schätzwert** für den wahren Wert μ bezeichnet

Anmerkung: μ ist der *Mittel-* oder *Erwartungswert* der Grundgesamtheit (häufig auch „wahrer“ Wert x_w der Messgröße X genannt: $E(X) = \mu = x_w$). Es wird angenommen, dass die Messgröße X eine (normalverteilte) Zufallsvariable ist. Die unendliche Grundgesamtheit ist die Menge aller möglichen Messwerte.



Mittelwert

Den **Mittelwert** \bar{x} der Einzelmessungen x_i erhält man durch

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Der Mittelwert wird auch als **arithmetisches Mittel** oder **bester Schätzwert** für den wahren Wert μ bezeichnet

Anmerkung: μ ist der *Mittel-* oder *Erwartungswert* der Grundgesamtheit (häufig auch „wahrer“ Wert x_w der Messgröße X genannt: $E(X) = \mu = x_w$). Es wird angenommen, dass die Messgröße X eine (normalverteilte) Zufallsvariable ist. Die unendliche Grundgesamtheit ist die Menge aller möglichen Messwerte.

Varianz einer Messreihe

Die *Streuung* der einzelnen Messwerte x_i um den arithmetischen Mittelwert \bar{x} lässt sich durch die **Varianz** (auch: *Varianz einer Messreihe*) charakterisieren:

$$\begin{aligned}
 s^2 = (\Delta x)^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta x_i)^2 \\
 &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2
 \end{aligned}$$

In der Formel steht der Faktor $N - 1$ und nicht N , da man erst ab $N = 2$ einen Fehler bestimmen kann



Standardabweichung einer Messreihe

Die positive Wurzel der Varianz ist die **Standardabweichung** bzw. **Standardabweichung der Messreihe**:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Die Standardabweichung wird auch als **durchschnittlicher** bzw. **mittlerer Fehler der Einzelmessung** bezeichnet

Standardabweichung des Mittelwertes

Als **Standardabweichung des Mittelwertes** (auch: **Fehler des Mittelwertes**) erhält man:

$$\begin{aligned}
 s_{\bar{x}} &= \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \\
 &= \frac{\Delta x}{\sqrt{N}} = \frac{s}{\sqrt{N}}
 \end{aligned}$$

$s_{\bar{x}}$ beschreibt die **Streuung** der aus verschiedenen Messreihen erhaltenen Mittelwerte \bar{x} um den „wahren“ Wert (Mittelwert) μ



Gaußverteilung

- ▶ Eine diskrete Häufigkeitsverteilung einer Messreihe geht für $N \rightarrow \infty$ in eine kontinuierliche Verteilung über
- ▶ Die Messwerte einer physikalisch-technischen Messgröße X sind in den *meisten* Fällen *annähernd normalverteilt*
- ▶ $N \rightarrow \infty$: $\bar{x} \rightarrow \mu$ und $s \rightarrow \sigma$



Gaußverteilung (cont.)

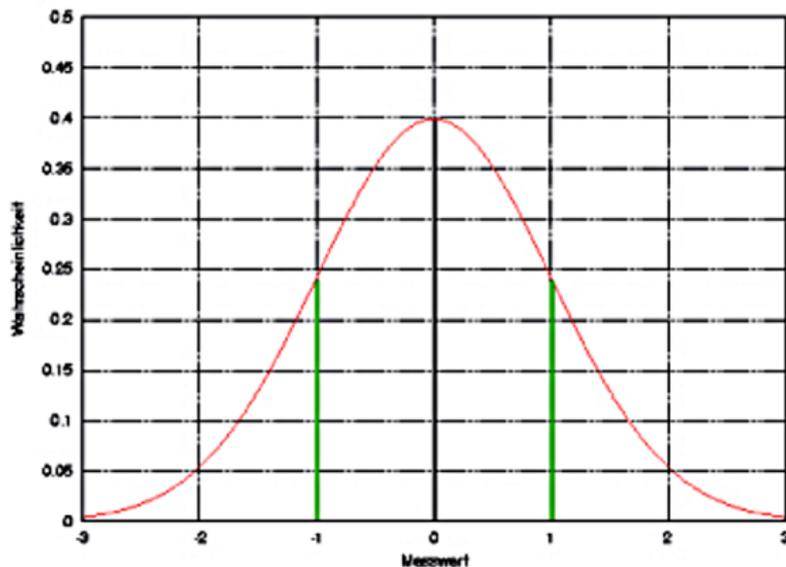
Definition

Normierte Dichtefunktion (Gaußsche Normalverteilung)

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$



Gaußverteilung (cont.)





Ergebnis einer Messung

Definition

Das **Ergebnis einer Messung** wird erwartet innerhalb des Konfidenzintervalls:

$$x = (\bar{x} \pm s_{\bar{x}}) [\textit{Einheit}]$$

Konfidenzintervall

- ▶ Bereich um den Mittelwert, der mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit den wahren Messwert enthält
- ▶ Intervall $\bar{x} \pm t * s_{\bar{x}}$ mit $t = 1.0$ besagt für großes $N (> 25)$ ein Konfidenzniveau von ca. 68 %
- ▶ D.h. ca. 68 % der Messwerte liegen im angegebenen Intervall
- ▶ Faktor t berücksichtigt die Verbindung zwischen Konfidenzniveau und der Anzahl der Messwerte N
- ▶ Bei gleicher Anzahl an Messwerten muss somit für ein Konfidenzniveau von 95 % das Intervall mit $t = 2.0$ vergrößert werden. Für ein Niveau von 99 % mit $t = 3.0$

Fehlerfortpflanzung

- ▶ wird eine abgeleitete Größe aus mehreren Messgrößen berechnet, so ist ebenfalls eine Messunsicherheit anzugeben
- ▶ ist die zu berechnende Größe

$$y = f(x_1, \dots, x_n)$$

und $\Delta \bar{x}_i$ die Messunsicherheit (Maximalfehler) der einzelnen Messgrößen, so ist die Messunsicherheit $\Delta \bar{y}$ der zu berechnenden Größe

$$\Delta \bar{y} = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| \cdot \Delta \bar{x}_1 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| \cdot \Delta \bar{x}_n$$



Fehlerfortpflanzung (cont.)

- ▶ Die partiellen Ableitungen stellen Gewichtungsfaktoren für die Fortpflanzung der einzelnen Fehler dar
- ▶ Die Messunsicherheiten sollten grundsätzlich vor der Messung berechnet werden
- ▶ Nur so kann erkannt werden, welche Fehler sich besonders stark auf das Endergebnis auswirken
- ▶ Entsprechende Messwerte müssen besonders genau ermittelt werden
- ▶ Das Messergebnis einer indirekt ermittelten Messgröße lautet dann:

$$y = \bar{y} \pm \Delta\bar{y}$$



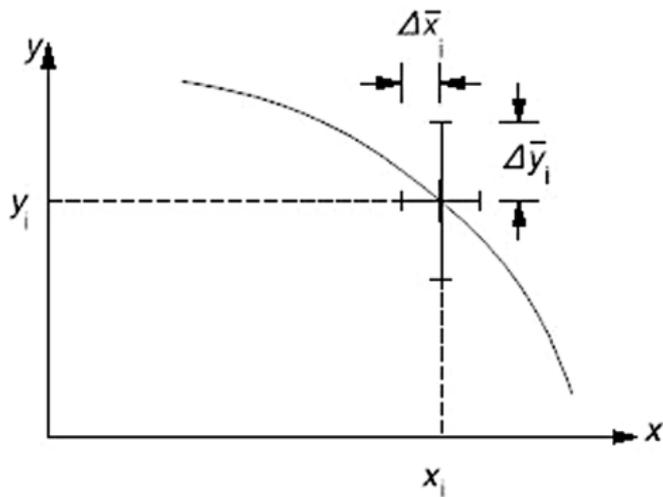
Fehlerfortpflanzung (cont.)

▶ zwei Faustregeln:

- ▶ Bei *Addition* und *Subtraktion* addieren sich die *absoluten Fehler*
- ▶ Bei *Multiplikation* und *Division* addieren sich die *relativen Fehler*
- ▶ die Differenz zweier nahezu gleich großer Größen erhält einen großen *relativen Fehler* \Rightarrow besser: Differenz direkt messen
- ▶ Quadrierung verdoppelt, Quadratwurzel ziehen halbiert den *relativen Fehler*

Grafische Fehlerdarstellung

- ▶ Ermittelte Fehler werden als Fehlerbalken an den Messpunkten eingetragen





Lineare Regression

- ▶ **Häufig:** Messen eines Zusammenhangs zwischen zwei Größen x und y
- ▶ **Beispiel:** Spannung und Strom an einem Widerstand
- ▶ **Besonders leicht:** linearer Zusammenhang von x und y

$$y = m \cdot x + b$$

- ▶ Koeffizienten werden durch **lineare Regression** bestimmt
- ▶ Um den statistischen Fehler zu reduzieren, wird eine Messreihe mit n Messwertpaaren aufgenommen



Lineare Regression (cont.)

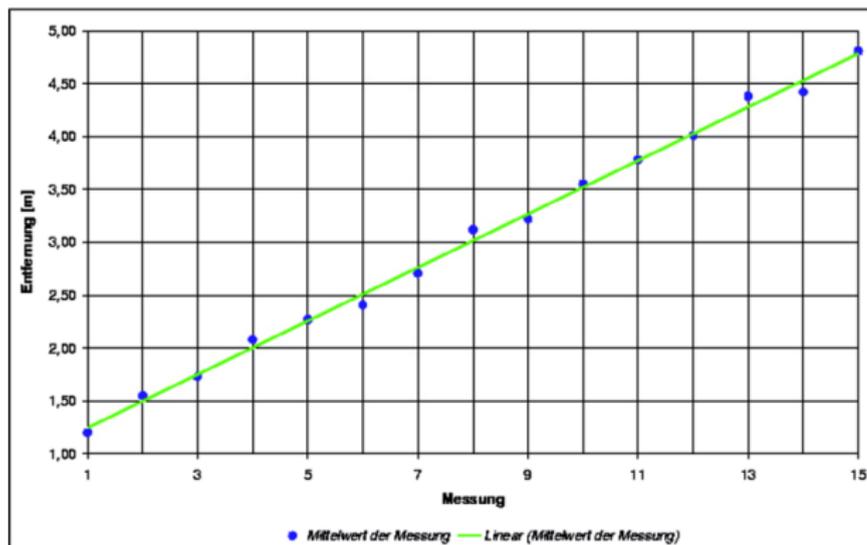
- ▶ Die Koeffizienten der **Ausgleichsgeraden** berechnen sich nach:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$b = \bar{y} - m \cdot \bar{x}$$

- ▶ x_i und y_i sind die Messwertpaare
- ▶ \bar{x} und \bar{y} sind die Mittelwerte der Messwertreihen¹

Lineare Regression (cont.)



¹ Nicht mehr die Mittelwerte der einzelnen Messwerte an den Messpunkten!



Korrelationskoeffizient

- ▶ Häufig wird der **empirische Korrelationskoeffizient** r_{xy} angegeben:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

- ▶ Der Wertebereich des Korrelationskoeffizienten liegt zwischen -1 und 1
- ▶ Je näher r_{xy} an -1 bzw. 1 liegt, um so stärker ist eine lineare Abhängigkeit gegeben



Regressionsparabel

Liegen die Messpunkte *nahezu* auf einer Parabel wählt man einen quadratischen Lösungsansatz

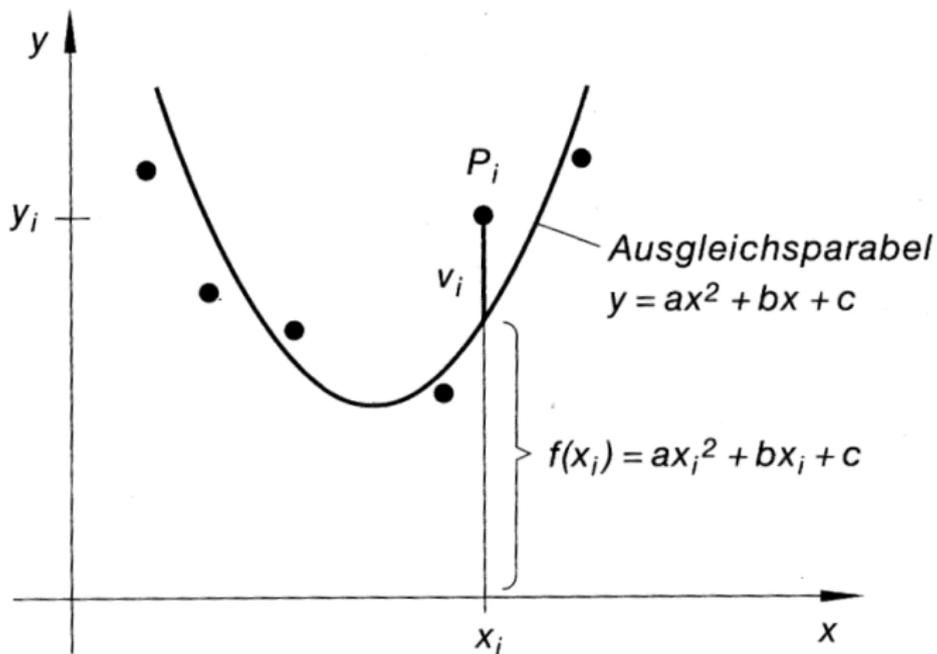
Regressions- oder Ausgleichsparabel

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

Der **vertikale Abstand** v_i des i -ten Messpunktes von dieser Parabel beträgt:

$$v_i = y_i - f(x_i) = y_i - ax_i^2 - bx_i - c$$

Regressionsparabel (cont.)



Gaußschen Methode der kleinsten Quadrate

- ▶ Minimieren der Abstandsquadrate aller Messpunkte

$$S(a; b; c) = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i^2 - bx_i - c)^2 \rightarrow \text{Minimum}$$

- ▶ Eliminieren der partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i^2 - bx_i - c)(-x_i^2) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i^2 - bx_i - c)(-x_i) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial c} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i^2 - bx_i - c)(-1) = 0$$

Regressionsparabel

- Durch Auflösen der Summen und Ordnen erhält man drei **Normalgleichungen**

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=0}^n x_i^4 \right) \cdot a + \left(\sum_{i=0}^n x_i^3 \right) \cdot b + \left(\sum_{i=0}^n x_i^2 \right) \cdot c &= \sum_{i=0}^n x_i^2 y_i \\ \left(\sum_{i=0}^n x_i^3 \right) \cdot a + \left(\sum_{i=0}^n x_i^2 \right) \cdot b + \left(\sum_{i=0}^n x_i \right) \cdot c &= \sum_{i=0}^n x_i y_i \\ \left(\sum_{i=0}^n x_i^2 \right) \cdot a + \left(\sum_{i=0}^n x_i \right) \cdot b + n \cdot c &= \sum_{i=0}^n y_i \end{aligned}$$



Regressionsparabel (cont.)

- ▶ Dieses **quadratische lineare Gleichungssystem** läßt sich mit Hilfe der **Cramerschen Regel** oder durch den **Gaußschen Algorithmus** lösen
- ▶ Für eine Regressionsparabel müssen mindestens vier Messpunkte vorliegen ($n \geq 4$)



Beispiel: Regressionsparabel

- ▶ Ermittlung des Zusammenhangs zwischen *Bremsweg* s (in m) und *Geschwindigkeit* v (in km/h)
- ▶ **siehe:** L. Papula: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler (Band 3)*, Seite 712–714



Nichtlineare Regression

- ▶ Viele **nichtlineare** Lösungsansätze lassen sich durch eine **Transformation** auf den **linearen** Ansatz zurückführen
- ▶ Beispiel: Exponentialfunktion

$$y = a \cdot e^{bx}$$

- ▶ Durch *Logarithmieren* erhält man:

$$\ln y = \ln(a \cdot e^{bx}) = \ln a + \ln(e^{bx}) = \ln a + bx$$



Nichtlineare Regression (cont.)

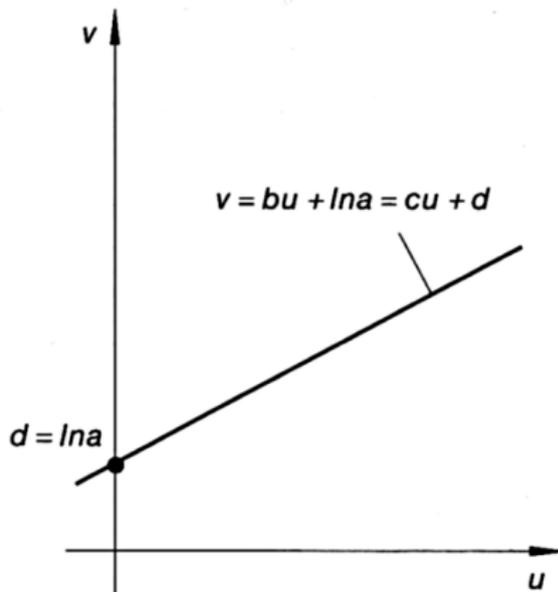
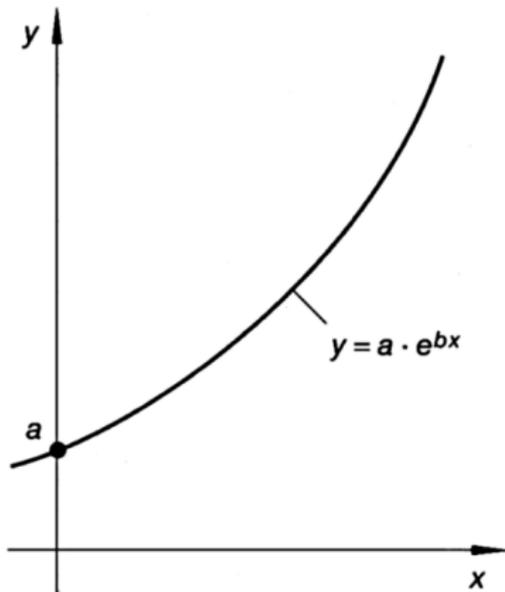
- ▶ Einführen einer *Transformation*

$$u = x, \quad v = \ln y \quad \text{Zusätzlich: } c = b, \quad d = \ln a$$

Transformation: *Exponentialfunktion in lineare Funktion*

$$y = a \cdot e^{bx} \xrightarrow{\ln} \ln y = bx + \ln a \xrightarrow[\substack{u=x \\ v=\ln y}]{v} v = cu + d$$

Nichtlineare Regression (cont.)





Nichtlineare Regression (cont.)

- ▶ Bei der Transformation gehen die Messwerte $(x_i; y_i)$ in neue Wertepaare $(u_i; v_i) = (x_i; \ln y_i)$ über
- ▶ Auf den neuen Werten wird die Regression ausgeführt
- ▶ Man erhält die „Hilfsparameter“ c und d

Durch Rücktransformation erhält man a und b

$$\ln a = d \Rightarrow a = e^d \quad \text{und} \quad b = c$$



Nichtlineare Regression (cont.)

Ansatz	Transformation		transformierter Ansatz (linear)	Rücktransformation
	$u =$	$v =$		
$y = a \cdot x^b$	$\ln x$	$\ln y$	$v = cu + d$	$a = e^d, \quad b = c$
$y = a \cdot e^{bx}$	x	$\ln y$	$v = cu + d$	$a = e^d, \quad b = c$
$y = \frac{a}{x} + b$	$1/x$	y	$v = cu + d$	$a = c, \quad b = d$
$y = \frac{a}{b+x}$	x	$1/y$	$v = cu + d$	$a = \frac{1}{c}, \quad b = \frac{d}{c}$
$y = \frac{ax}{b+x}$	$1/x$	$1/y$	$v = cu + d$	$a = \frac{1}{d}, \quad b = \frac{c}{d}$



Nichtlineare Regression (cont.)

- ▶ Nach **Linearisierung** stets lineare Regression mit **transformierten Messwerten**
- ▶ Rechentechnisch einfach und daher beliebt, führt aber **nicht** zu den tatsächlichen Parametern a, b, \dots
- ▶ **Exakte Bestimmung** nur über Minimierung der eigentlichen Zielfunktion

$$S(a; b; \dots) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2$$

- ▶ Exakte Parameter meist nur durch erheblichem numerischen Rechenaufwand bestimmbar



Eigenschaften von Sensoren

- ▶ Ein Eingangssignal muss eventuell mehrmals konvertiert werden, bis der Sensor ein elektrisches Ausgangssignal ausgibt

Beispiel: Druck auf Glasfaser-Sensor

- ⇒ Dehnung
- ⇒ Änderung des Brechungsindex
- ⇒ Änderung der optischen Übertragung
- ⇒ Messung des Photonenflusses
- ⇒ Umwandlung in Strom

- ▶ In diesem Kapitel wird ein Sensor zunächst als „Black Box“ betrachtet



Eigenschaften von Sensoren

- ▶ Ein Eingangssignal muss eventuell mehrmals konvertiert werden, bis der Sensor ein elektrisches Ausgangssignal ausgibt

Beispiel: Druck auf Glasfaser-Sensor

- ⇒ Dehnung
- ⇒ Änderung des Brechungsindex
- ⇒ Änderung der optischen Übertragung
- ⇒ Messung des Photonenflusses
- ⇒ Umwandlung in Strom

- ▶ In diesem Kapitel wird ein Sensor zunächst als „Black Box“ betrachtet



Eigenschaften von Sensoren

- ▶ Ein Eingangssignal muss eventuell mehrmals konvertiert werden, bis der Sensor ein elektrisches Ausgangssignal ausgibt

Beispiel: Druck auf Glasfaser-Sensor

- ⇒ Dehnung
- ⇒ Änderung des Brechungsindex
- ⇒ Änderung der optischen Übertragung
- ⇒ Messung des Photonenflusses
- ⇒ Umwandlung in Strom

- ▶ In diesem Kapitel wird ein Sensor zunächst als „**Black Box**“ betrachtet

Übertragungsfunktion

- ▶ Es interessiert im Folgenden nur die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal
- ▶ \Rightarrow der Zusammenhang zwischen Stimulus und Ausgangsgröße
- ▶ Jeder Sensor besitzt eine **ideale** bzw. **theoretische** Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal

Definition

Die **ideale Beziehung** zwischen Eingangs- und Ausgangssignal eines Sensors wird durch die **Übertragungsfunktion** $S = f(s)$ beschrieben (engl.: *transfer function*)



Übertragungsfunktion (cont.)

- ▶ Das Ausgangssignal S repräsentiert den **wahren Wert** des Eingangssignals s
- ▶ Dies gilt im Falle von idealem Design, Material und idealer Fabrikation
- ▶ In der Regel beeinflussen
 - ▶ Fertigungsungenauigkeiten,
 - ▶ Materialfehler,
 - ▶ Umgebungseinflüsse,
 - ▶ Abnutzung,
 - ▶ etc.
 die Beziehung zwischen Stimulus und Ausgangssignal
- ▶ Die wirkliche Beziehung wird als \rightarrow **reale Übertragungsfunktion** bezeichnet



Übertragungsfunktion (cont.)

- ▶ Meistens ist die Beziehung zwischen Stimulus und Ausgangssignal
 - ▶ **eindimensional** und
 - ▶ **linear**

Lineare Übertragungsfunktion

$$S = a + b \cdot s$$

- ▶ a ist das Ausgangssignal bei einem Eingangssignal von $s = 0$
- ▶ b ist die Steigung
- ▶ b wird in diesem Zusammenhang oft als **Sensitivität** bezeichnet

Übertragungsfunktion (cont.)

Weitere wichtige Übertragungsfunktionen

- ▶ Logarithmische Übertragungsfunktion:

$$S = a + k \cdot \ln s$$

k ist eine Konstante

- ▶ Exponentiale Übertragungsfunktion:

$$S = a \cdot e^{ks}$$

- ▶ weitere Übertragungsfunktionen:

$$S = a_0 + a_1 \cdot s^k$$

- ▶ oder beliebige Polynome höherer Ordnung



Sensitivität

Definition

Für nicht-lineare Übertragungsfunktionen ist die Sensitivität für jeden Eingangswert s_i wie folgt definiert:

$$b = \frac{dS(s_i)}{ds}$$



Approximation einer Übertragungsfunktion

- ▶ Einige nicht-lineare Übertragungsfunktionen sind linear in einem eingeschränkten Bereich
- ▶ Nicht-lineare Übertragungsfunktionen können durch mehrere lineare Funktionen approximiert werden
- ▶ Die Differenz zwischen wahren und linear approximiertem Ausgangssignal sollte unter einem zu spezifizierenden Limit liegen



Approximation einer Übertragungsfunktion

- ▶ Einige nicht-lineare Übertragungsfunktionen sind linear in einem eingeschränkten Bereich
- ▶ Nicht-lineare Übertragungsfunktionen können durch mehrere lineare Funktionen approximiert werden
- ▶ Die Differenz zwischen wahren und linear approximiertem Ausgangssignal sollte unter einem zu spezifizierenden Limit liegen



Approximation einer Übertragungsfunktion

- ▶ Einige nicht-lineare Übertragungsfunktionen sind linear in einem eingeschränkten Bereich
- ▶ Nicht-lineare Übertragungsfunktionen können durch mehrere lineare Funktionen approximiert werden
- ▶ Die Differenz zwischen wahrem und linear approximiertem Ausgangssignal sollte unter einem zu spezifizierenden Limit liegen



Mehrdimensionale Übertragungsfunktionen

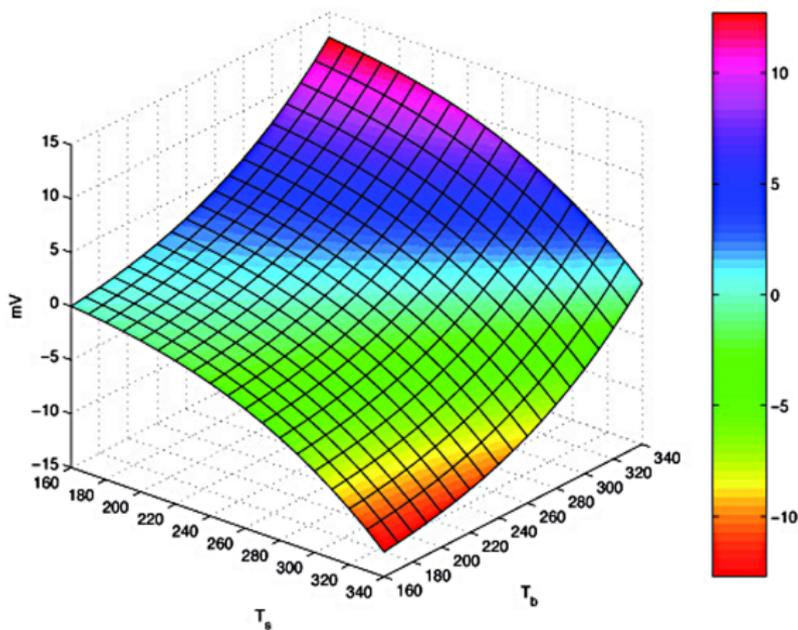
- ▶ Übertragungsfunktion kann von mehr als einem Stimulus abhängen
- ▶ **Beispiel:** Infrarot-Wärmestrahlungssensor

$$U = G(T_b^4 - T_s^4) \quad (\text{Stefan - Boltzmann - Gesetz})$$

- ▶ G – Konstante
- ▶ T_b – absolute Temperatur des gemessenen Objektes
- ▶ T_s – absolute Temperatur der Sensoroberfläche
- ▶ U – Ausgangsspannung
- ▶ Sensitivität in Bezug auf die Temperatur des gemessenen Objektes:

$$b = \frac{\partial U}{\partial T_b} = 4GT_b^3$$

Mehrdimensionale Übertragungsfunktionen (cont.)





Messbereich

Definition

Der dynamische Bereich eines Stimulus, der von einem Sensor erfasst wird, wird **Messbereich** (engl. *Span* oder *Full Scale Input*) genannt

- ▶ beziffert den höchsten für einen Sensor zulässigen Stimuluswert
- ▶ größere Stimuli können den Sensor beschädigen



Messbereich (cont.)

- ▶ Der Messbereich wird als Verhältnis vom maximalen zum minimalen Eingangswert angegeben
- ▶ Bei großen dynamischen und nicht-linearen Eingangssignalen wird er in *Dezibel* angegeben
- ▶ Dezibel ist ein logarithmisches Maß für ein Verhältnis G von Kraft, Strom oder Spannung:

$$G [dB] = 20 \log \frac{s_2}{s_1}$$

- ▶ **Beispiel:** Spannungsmesser für die Batterie eines Roboters
 Messbereich: $1 \text{ mV} \dots 20 \text{ V}$ $\rightarrow 20 \cdot \log \left[\frac{20}{0.001} \right] = 86 \text{ db}$



Ausgabebereich

Definition

Der **Ausgabebereich** (engl. *Full Scale Output*) eines Sensors ist das Intervall zwischen dem Ausgangssignal bei kleinstem und größtem angelegten Stimulus



Genauigkeit

- ▶ Eine wichtige Eigenschaft eines Sensors ist die **Genauigkeit**
- ▶ *eigentlich*: Ungenauigkeit
- ▶ Die Genauigkeit beschreibt die maximale Abweichung zwischen den idealen und den vom Sensor ausgegebenen Werten
- ▶ Wie bei jeder Messung spricht man von *systematischen* und *zufälligen* Fehlern eines Sensors

⇒ siehe Abschnitte zu „Messfehler“ und „Fehlerrechnung“



Genauigkeit

- ▶ Eine wichtige Eigenschaft eines Sensors ist die **Genauigkeit**
- ▶ *eigentlich*: Ungenauigkeit
- ▶ Die Genauigkeit beschreibt die maximale Abweichung zwischen den idealen und den vom Sensor ausgegebenen Werten
- ▶ Wie bei jeder Messung spricht man von *systematischen* und *zufälligen* Fehlern eines Sensors

⇒ siehe Abschnitte zu „Messfehler“ und „Fehlerrechnung“



Genauigkeit

- ▶ Eine wichtige Eigenschaft eines Sensors ist die **Genauigkeit**
- ▶ *eigentlich*: Ungenauigkeit
- ▶ Die Genauigkeit beschreibt die maximale Abweichung zwischen den idealen und den vom Sensor ausgegebenen Werten
- ▶ Wie bei jeder Messung spricht man von *systematischen* und *zufälligen* Fehlern eines Sensors

⇒ siehe Abschnitte zu „Messfehler“ und „Fehlerrechnung“



Genauigkeit

- ▶ Eine wichtige Eigenschaft eines Sensors ist die **Genauigkeit**
- ▶ *eigentlich*: Ungenauigkeit
- ▶ Die Genauigkeit beschreibt die maximale Abweichung zwischen den idealen und den vom Sensor ausgegebenen Werten
- ▶ Wie bei jeder Messung spricht man von *systematischen* und *zufälligen* Fehlern eines Sensors

⇒ siehe Abschnitte zu „Messfehler“ und „Fehlerrechnung“



Genauigkeit

- ▶ Eine wichtige Eigenschaft eines Sensors ist die **Genauigkeit**
- ▶ *eigentlich*: Ungenauigkeit
- ▶ Die Genauigkeit beschreibt die maximale Abweichung zwischen den idealen und den vom Sensor ausgegebenen Werten
- ▶ Wie bei jeder Messung spricht man von *systematischen* und *zufälligen* Fehlern eines Sensors

⇒ siehe Abschnitte zu „Messfehler“ und „Fehlerrechnung“



Reale Übertragungsfunktion

- ▶ Im Vergleich zur idealen Übertragungsfunktion sind reale Sensoren immer ungenau
- ▶ Die Übertragungsfunktion eines realen Sensors heißt daher: **reale Übertragungsfunktion**
- ▶ **Problem:** Sie ist im Gegensatz zu idealen Übertragungsfunktionen meistens weder linear und noch monoton
- ▶ **Gründe:** Unterschiede im Material und in der Herstellung, Fehler im Design, Toleranzen in der Herstellung, ...
- ▶ **Trotzdem:** Jeder Sensor sollte innerhalb der angegebenen Genauigkeit arbeiten



Reale Übertragungsfunktion (cont.)

- ▶ Erlaubte Abweichung von der idealen Übertragungsfunktion:
 $\pm\Delta$
- ▶ Abweichung zwischen idealer und realer Übertragungsfunktion:
 $\pm\delta$

$$\delta \leq \Delta$$

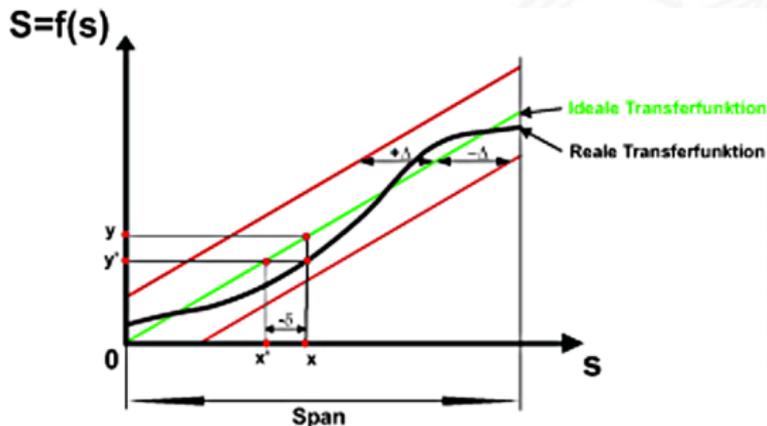
Beispiel: Stimulus x

- ▶ ideale Übertragungsfunktion: $y = f_{ideal}(x)$
- ▶ reale Übertragungsfunktion: $y' = f_{real}(x)$

Reale Übertragungsfunktion (cont.)

Achtung:

Nimmt man die ideale Übertragungsfunktion, um vom Ergebnis y' auf den Stimulus abzubilden erhält man x' und $\delta = x - x'$





Kalibrierungsfehler

- ▶ Firmen *kalibrieren* neue Sensoren nach der Herstellung
- ▶ Es ergibt sich ein systematischer Fehler: der *Kalibrationsfehler*
- ▶ Die Ausgabe des Sensors wird für jeden Stimulus um eine Konstante verschoben
- ▶ Dieser Fehler ist nicht unbedingt gleichmäßig über den Eingabebereich verteilt

Kalibrierungsfehler

- ▶ Firmen *kalibrieren* neue Sensoren nach der Herstellung
- ▶ Es ergibt sich ein systematischer Fehler: der *Kalibrationsfehler*
- ▶ Die Ausgabe des Sensors wird für jeden Stimulus um eine Konstante verschoben
- ▶ Dieser Fehler ist nicht unbedingt gleichmäßig über den Eingabebereich verteilt



Kalibrierungsfehler

- ▶ Firmen *kalibrieren* neue Sensoren nach der Herstellung
- ▶ Es ergibt sich ein systematischer Fehler: der *Kalibrationsfehler*
- ▶ Die Ausgabe des Sensors wird für jeden Stimulus um eine Konstante verschoben
- ▶ Dieser Fehler ist nicht unbedingt gleichmäßig über den Eingabebereich verteilt



Kalibrierungsfehler

- ▶ Firmen *kalibrieren* neue Sensoren nach der Herstellung
- ▶ Es ergibt sich ein systematischer Fehler: der *Kalibrationsfehler*
- ▶ Die Ausgabe des Sensors wird für jeden Stimulus um eine Konstante verschoben
- ▶ Dieser Fehler ist nicht unbedingt gleichmäßig über den Eingabebereich verteilt

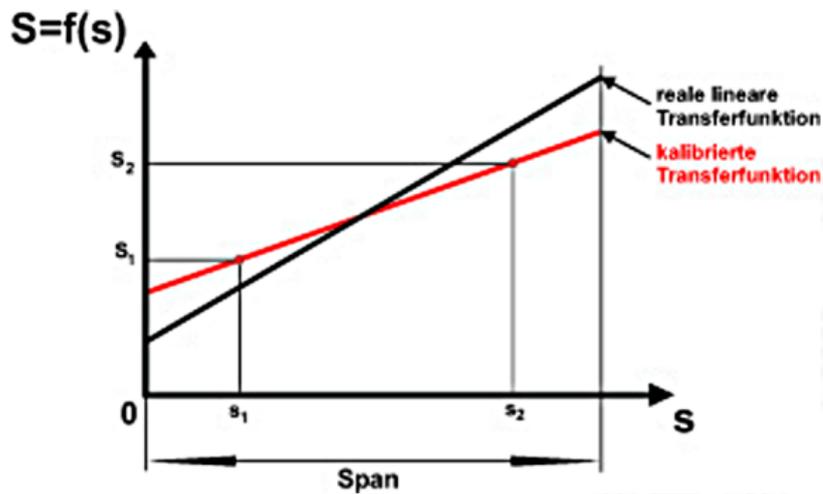


Beispiel: Einfache Kalibration

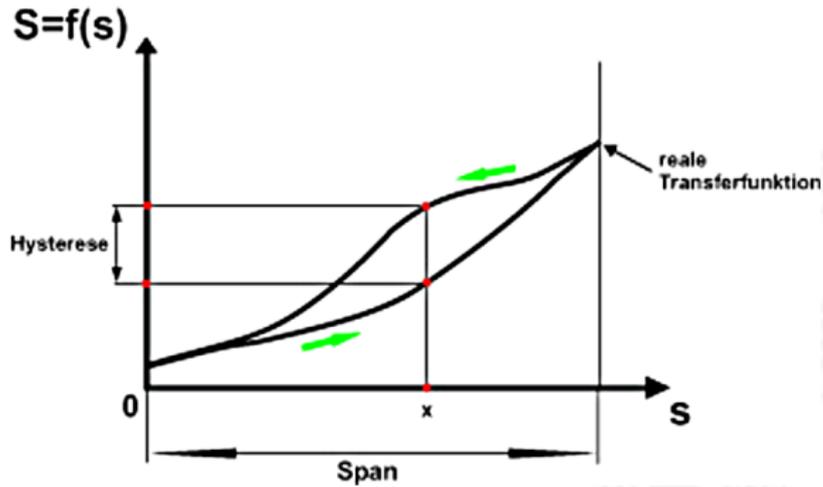
- ▶ Ein Sensor hat eine lineare Übertragungsfunktion
- ▶ Für jeden hergestellten Sensor kann die Steigung aus Materialgründen unterschiedlich sein

- ▶ Der Hersteller bestimmt daher die Steigung für jeden Sensor:
 - ▶ Es werden zwei Stimuli s_1 und s_2 angelegt
 - ▶ Der Sensor antwortet mit den zugehörigen Signalen S_1 und S_2
 - ▶ Die Steigung für diesen Sensor kann bestimmt werden
 - ▶ **Problem:** Die Steigung wird aufgrund von Messfehlern nicht mit der realen übereinstimmen

Beispiel: Einfache Kalibration (cont.)



Hysterese





Hysteresefehler

Definition

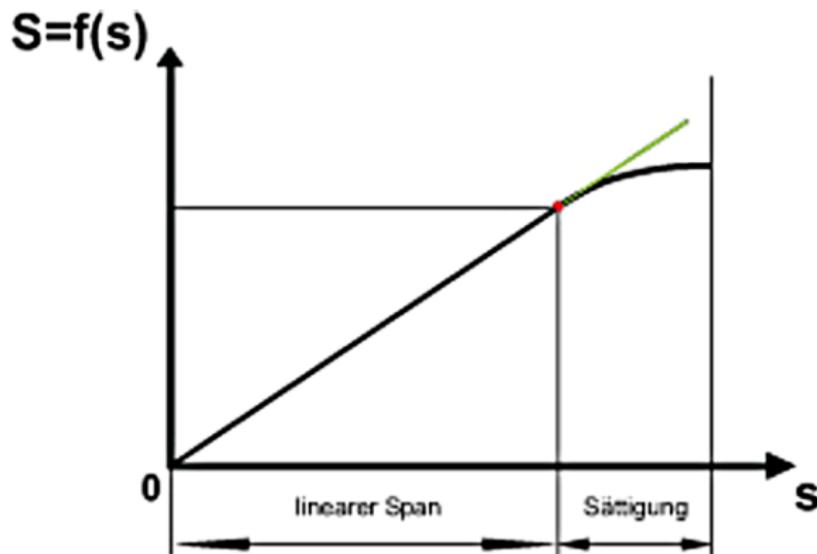
Ein **Hysteresefehler** ist die Abweichung des Ausgangssignals eines Sensors für einen bestimmten Stimuluswert, je nachdem, aus welcher Richtung der Stimulus sich diesem Wert nähert



Sättigung

- ▶ Fast jeder Sensor hat Arbeitsbereichsgrenzen
- ▶ Viele Sensoren haben eine lineare Übertragungsfunktion, ...
- ▶ **aber:** Ab einem bestimmten Stimuluswert wird nicht mehr die gewünschte Ausgabe erzeugt
- ▶ Man spricht dann von **Sättigung**

Sättigung (cont.)



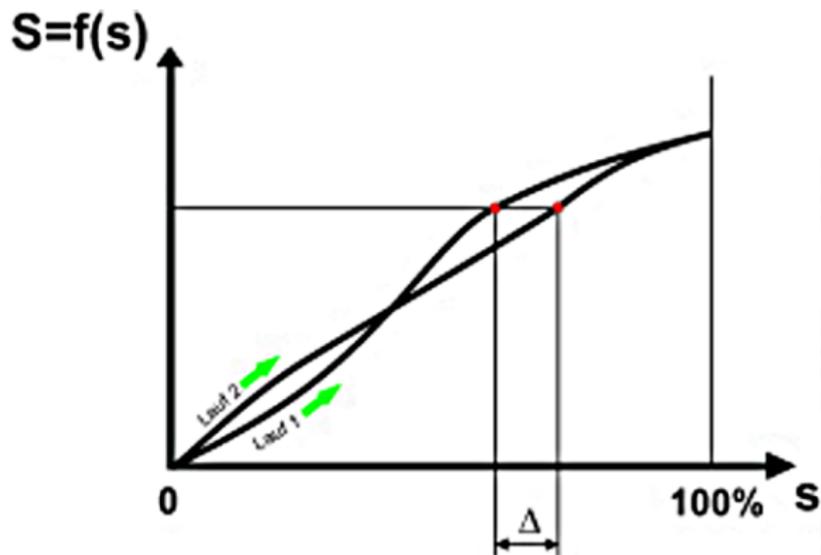


Wiederholgenauigkeit

- ▶ Ein Sensor kann bei gleichen Bedingungen unterschiedliche Ausgabewerte produzieren
- ▶ Dieser Fehler entspricht der **Wiederholgenauigkeit**
- ▶ Für zwei Kalibrationszyklen normalerweise:
Maximale Distanz Δ zweier Stimuli mit gleichem Ausgangssignal
- ▶ Die Wiederholgenauigkeit wird anteilig zum Messbereich angegeben:

$$\delta_r = \frac{\Delta}{Span} \cdot 100\%$$

Wiederholgenauigkeit (cont.)



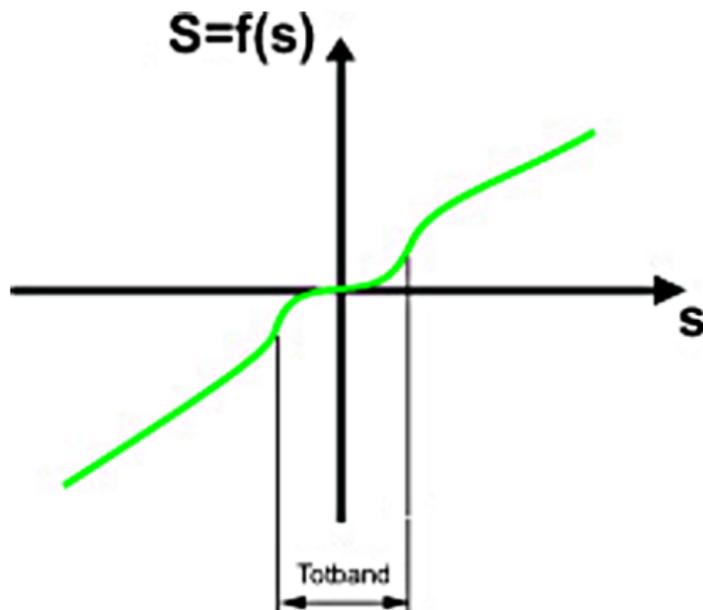


Totband

Definition

Ein Sensor hat ein **Totband**, wenn er in einem zusammenhängenden Bereich des Eingangssignals mit dem gleichen Ausgangssignal (oft 0) reagiert

Totband (cont.)





Auflösung

Definition

Die **Auflösung** beschreibt den kleinsten Änderungsschritt des Stimulus, der vom Sensor erfasst wird

- ▶ Beispiele: Potentiometer, Winkel bei Lasermesssystemen, ...
- ▶ Die Auflösung kann sich über den gesamten Eingangsbereich ändern
- ▶ Die Auflösung digitaler Ausgabeformate ist durch die Anzahl der Bits im Ausgabewort definiert (Audio: 8bit/16bit/20bit/24bit)
- ▶ Sind die Schritte nicht messbar, hat der Sensor eine *kontinuierliche* bzw. *infinitesimale* Auflösung



Auflösung

Definition

Die **Auflösung** beschreibt den kleinsten Änderungsschritt des Stimulus, der vom Sensor erfasst wird

- ▶ Beispiele: Potentiometer, Winkel bei Lasermesssystemen, ...
- ▶ Die Auflösung kann sich über den gesamten Eingangsbereich ändern
- ▶ Die Auflösung digitaler Ausgabeformate ist durch die Anzahl der Bits im Ausgabewort definiert (Audio: 8bit/16bit/20bit/24bit)
- ▶ Sind die Schritte nicht messbar, hat der Sensor eine *kontinuierliche* bzw. *infinitesimale* Auflösung



Auflösung

Definition

Die **Auflösung** beschreibt den kleinsten Änderungsschritt des Stimulus, der vom Sensor erfasst wird

- ▶ Beispiele: Potentiometer, Winkel bei Lasermesssystemen, ...
- ▶ Die Auflösung kann sich über den gesamten Eingangsbereich ändern
- ▶ Die Auflösung digitaler Ausgabeformate ist durch die Anzahl der Bits im Ausgabewort definiert (Audio: 8bit/16bit/20bit/24bit)
- ▶ Sind die Schritte nicht messbar, hat der Sensor eine *kontinuierliche* bzw. *infinitesimale* Auflösung



Auflösung

Definition

Die **Auflösung** beschreibt den kleinsten Änderungsschritt des Stimulus, der vom Sensor erfasst wird

- ▶ Beispiele: Potentiometer, Winkel bei Lasermesssystemen, ...
- ▶ Die Auflösung kann sich über den gesamten Eingangsbereich ändern
- ▶ Die Auflösung digitaler Ausgabeformate ist durch die Anzahl der Bits im Ausgabewort definiert (Audio: 8bit/16bit/20bit/24bit)
- ▶ Sind die Schritte nicht messbar, hat der Sensor eine *kontinuierliche* bzw. *infinitesimale* Auflösung



Auflösung

Definition

Die **Auflösung** beschreibt den kleinsten Änderungsschritt des Stimulus, der vom Sensor erfasst wird

- ▶ Beispiele: Potentiometer, Winkel bei Lasermesssystemen, ...
- ▶ Die Auflösung kann sich über den gesamten Eingangsbereich ändern
- ▶ Die Auflösung digitaler Ausgabeformate ist durch die Anzahl der Bits im Ausgabewort definiert (Audio: 8bit/16bit/20bit/24bit)
- ▶ Sind die Schritte nicht messbar, hat der Sensor eine *kontinuierliche* bzw. *infinitesimale* Auflösung



Dynamische Eigenschaften

- ▶ Für statische Eingangssignale beschreiben die bisher genannten Eigenschaften einen Sensor vollständig
- ▶ Wenn das Eingangssignal variiert, gilt dies nicht mehr
- ▶ **Grund:** Der Sensor reagiert nicht immer direkt auf den Stimulus
- ▶ Ein Sensor gibt daher nicht immer gleichzeitig zum Stimulus den zugehörigen Ausgabewert aus
- ▶ Dies nennt man die **dynamischen Eigenschaften** eines Sensors
- ▶ Der entstehende Fehler heißt **dynamischer Fehler**



Dynamische Eigenschaften

- ▶ Für statische Eingangssignale beschreiben die bisher genannten Eigenschaften einen Sensor vollständig
- ▶ Wenn das Eingangssignal variiert, gilt dies nicht mehr
- ▶ **Grund:** Der Sensor reagiert nicht immer direkt auf den Stimulus
- ▶ Ein Sensor gibt daher nicht immer gleichzeitig zum Stimulus den zugehörigen Ausgabewert aus
- ▶ Dies nennt man die **dynamischen Eigenschaften** eines Sensors
- ▶ Der entstehende Fehler heißt **dynamischer Fehler**



Dynamische Eigenschaften

- ▶ Für statische Eingangssignale beschreiben die bisher genannten Eigenschaften einen Sensor vollständig
- ▶ Wenn das Eingangssignal variiert, gilt dies nicht mehr
- ▶ **Grund:** Der Sensor reagiert nicht immer direkt auf den Stimulus
- ▶ Ein Sensor gibt daher nicht immer gleichzeitig zum Stimulus den zugehörigen Ausgabewert aus
- ▶ Dies nennt man die **dynamischen Eigenschaften** eines Sensors
- ▶ Der entstehende Fehler heißt **dynamischer Fehler**



Dynamische Eigenschaften

- ▶ Für statische Eingangssignale beschreiben die bisher genannten Eigenschaften einen Sensor vollständig
- ▶ Wenn das Eingangssignal variiert, gilt dies nicht mehr
- ▶ **Grund:** Der Sensor reagiert nicht immer direkt auf den Stimulus
- ▶ Ein Sensor gibt daher nicht immer gleichzeitig zum Stimulus den zugehörigen Ausgabewert aus
- ▶ Dies nennt man die **dynamischen Eigenschaften** eines Sensors
- ▶ Der entstehende Fehler heißt **dynamischer Fehler**



Dynamische Eigenschaften

- ▶ Für statische Eingangssignale beschreiben die bisher genannten Eigenschaften einen Sensor vollständig
- ▶ Wenn das Eingangssignal variiert, gilt dies nicht mehr
- ▶ **Grund:** Der Sensor reagiert nicht immer direkt auf den Stimulus
- ▶ Ein Sensor gibt daher nicht immer gleichzeitig zum Stimulus den zugehörigen Ausgabewert aus
- ▶ Dies nennt man die **dynamischen Eigenschaften** eines Sensors
- ▶ Der entstehende Fehler heißt **dynamischer Fehler**

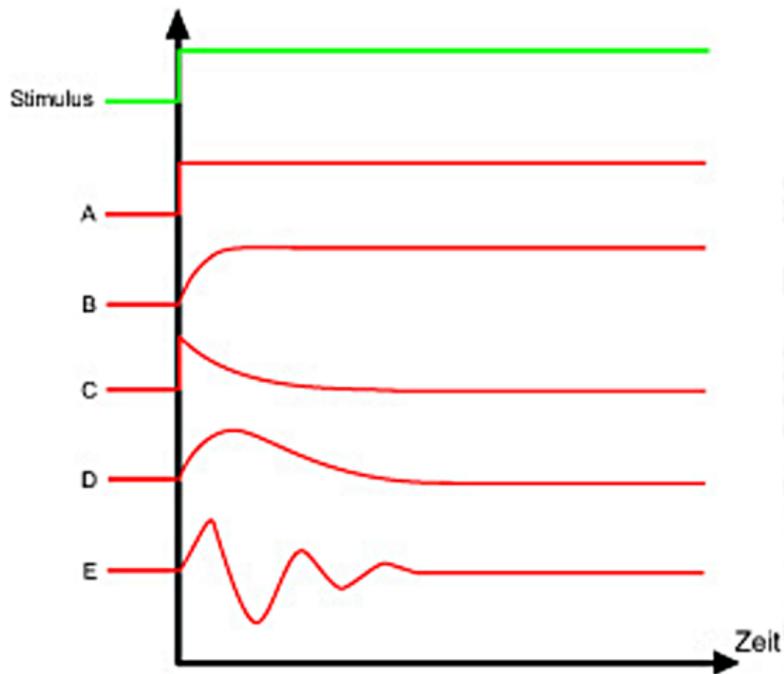


Dynamische Eigenschaften

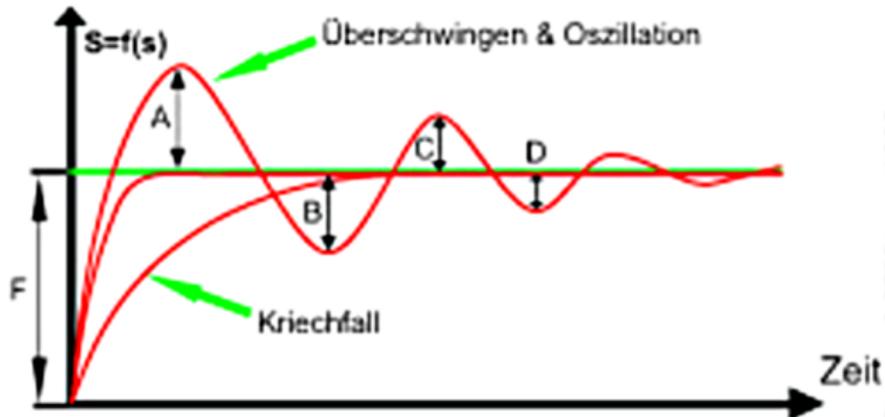
- ▶ Für statische Eingangssignale beschreiben die bisher genannten Eigenschaften einen Sensor vollständig
- ▶ Wenn das Eingangssignal variiert, gilt dies nicht mehr
- ▶ **Grund:** Der Sensor reagiert nicht immer direkt auf den Stimulus
- ▶ Ein Sensor gibt daher nicht immer gleichzeitig zum Stimulus den zugehörigen Ausgabewert aus
- ▶ Dies nennt man die **dynamischen Eigenschaften** eines Sensors
- ▶ Der entstehende Fehler heißt **dynamischer Fehler**



Antwortverhalten



Dämpfung





Dämpfungsfaktor

Für den oszillierenden Fall kann ein **Dämpfungsfaktor** bestimmt werden:

Definition

$$\text{Dämpfungsfaktor} = \frac{F}{A} = \frac{A}{B} = \frac{B}{C} = \text{usw.}$$



Umwelteinflüsse

- ▶ **minimal und maximal zulässige Umgebungstemperatur**
- ▶ minimal und maximal zulässige Luftfeuchtigkeit
- ▶ Kurz- und Langzeitstabilität (Drift)
Hilfe bei Langzeitdrift: Pre-Aging erhöht Stabilität
- ▶ statische und dynamische Änderungen von elektromagnetischen Feldern, Gravitationskräften, Vibrationen, Strahlung etc.
- ▶ Selbsterhitzung z.B. durch Stromfluss



Umwelteinflüsse

- ▶ minimal und maximal zulässige Umgebungstemperatur
- ▶ minimal und maximal zulässige Luftfeuchtigkeit
- ▶ Kurz- und Langzeitstabilität (Drift)
Hilfe bei Langzeitdrift: Pre-Aging erhöht Stabilität
- ▶ statische und dynamische Änderungen von elektromagnetischen Feldern, Gravitationskräften, Vibrationen, Strahlung etc.
- ▶ Selbsterhitzung z.B. durch Stromfluss

Umwelteinflüsse

- ▶ minimal und maximal zulässige Umgebungstemperatur
- ▶ minimal und maximal zulässige Luftfeuchtigkeit
- ▶ Kurz- und Langzeitstabilität (Drift)
 Hilfe bei Langzeitdrift: Pre-Aging erhöht Stabilität
- ▶ statische und dynamische Änderungen von elektromagnetischen Feldern, Gravitationskräften, Vibrationen, Strahlung etc.
- ▶ Selbsterhitzung z.B. durch Stromfluss



Umwelteinflüsse

- ▶ minimal und maximal zulässige Umgebungstemperatur
- ▶ minimal und maximal zulässige Luftfeuchtigkeit
- ▶ Kurz- und Langzeitstabilität (Drift)
Hilfe bei Langzeitdrift: Pre-Aging erhöht Stabilität
- ▶ statische und dynamische Änderungen von elektromagnetischen Feldern, Gravitationskräften, Vibrationen, Strahlung etc.
- ▶ Selbsterhitzung z.B. durch Stromfluss



Umwelteinflüsse

- ▶ minimal und maximal zulässige Umgebungstemperatur
- ▶ minimal und maximal zulässige Luftfeuchtigkeit
- ▶ Kurz- und Langzeitstabilität (Drift)
 Hilfe bei Langzeitdrift: Pre-Aging erhöht Stabilität
- ▶ statische und dynamische Änderungen von elektromagnetischen Feldern, Gravitationskräften, Vibrationen, Strahlung etc.
- ▶ Selbsterhitzung z.B. durch Stromfluss



Weitere Sensoreigenschaften

- ▶ **Verlässlichkeit**
z.B. durch Angabe der *mean-time-between-failure* (MTBF)
- ▶ besondere Eigenschaften für das Einsatzgebiet:
 - ▶ Design
 - ▶ Gewicht
 - ▶ Maße
 - ▶ Preis
 - ▶ ...



Weitere Sensoreigenschaften

- ▶ **Verlässlichkeit**
z.B. durch Angabe der *mean-time-between-failure* (MTBF)
- ▶ **besondere Eigenschaften für das Einsatzgebiet:**
 - ▶ Design
 - ▶ Gewicht
 - ▶ Maße
 - ▶ Preis
 - ▶ ...



Literaturliste

[Fra04] Kap. 2 In: Jacob Fraden:

Handbook of modern sensors: physics, design, and applications.

3.

Springer-Verlag New York, Inc., 2004, S. 1–32

[Pap01] Kap. IV In: Lothar Papula:

*Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler
(Band 3): Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung,
Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung.*

4.

Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Mai 2001



Literaturliste (cont.)

- [SK94] Kap. 1 In: Herbert A. Stuart, Gerhard Klages:
Kurzes Lehrbuch der Physik.
14.
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1994
- [SN04] Kap. 4.1 In: Roland Siegwart, Illah R. Nourbakhsh:
Introduction to Autonomous Mobile Robots.
MIT Press Cambridge, Massachusetts, 2004, S. 89–98



Sensoren in der Robotik

- ▶ Spezielle Sensoren, sowie deren Einsatzmöglichkeiten sollen am Beispiel der Robotik erläutert werden
- ▶ Der Sensoreinsatz gewinnt bei der Entwicklung **autonomer** und **intelligenter Robotersysteme** zunehmend an Bedeutung
- ▶ Dabei steht der **Perzeption-Aktion-Zyklus** im Vordergrund
- ▶ Hierbei wird die Umwelt über Sensoren wahrgenommen und **adaptiv** verändert
- ▶ Vor allem bei der **interaktiven** Zusammenarbeit mit Robotersystemen ist das **situierte** Verändern von Arbeitsabläufen erforderlich



Sensoren in der Robotik

- ▶ Spezielle Sensoren, sowie deren Einsatzmöglichkeiten sollen am Beispiel der Robotik erläutert werden
- ▶ Der Sensoreinsatz gewinnt bei der Entwicklung **autonom** und **intelligenter Robotersysteme** zunehmend an Bedeutung
- ▶ Dabei steht der **Perzeption-Aktion-Zyklus** im Vordergrund
- ▶ Hierbei wird die Umwelt über Sensoren wahrgenommen und **adaptiv** verändert
- ▶ Vor allem bei der **interaktiven** Zusammenarbeit mit Robotersystemen ist das **situierte** Verändern von Arbeitsabläufen erforderlich



Sensoren in der Robotik

- ▶ Spezielle Sensoren, sowie deren Einsatzmöglichkeiten sollen am Beispiel der Robotik erläutert werden
- ▶ Der Sensoreinsatz gewinnt bei der Entwicklung **autonomer** und **intelligenter Robotersysteme** zunehmend an Bedeutung
- ▶ Dabei steht der **Perzeption-Aktion-Zyklus** im Vordergrund
- ▶ Hierbei wird die Umwelt über Sensoren wahrgenommen und **adaptiv** verändert
- ▶ Vor allem bei der **interaktiven** Zusammenarbeit mit Robotersystemen ist das **situierte** Verändern von Arbeitsabläufen erforderlich



Sensoren in der Robotik

- ▶ Spezielle Sensoren, sowie deren Einsatzmöglichkeiten sollen am Beispiel der Robotik erläutert werden
- ▶ Der Sensoreinsatz gewinnt bei der Entwicklung **autonomer** und **intelligenter Robotersysteme** zunehmend an Bedeutung
- ▶ Dabei steht der **Perzeption-Aktion-Zyklus** im Vordergrund
- ▶ Hierbei wird die Umwelt über Sensoren wahrgenommen und **adaptiv** verändert
- ▶ Vor allem bei der **interaktiven** Zusammenarbeit mit Robotersystemen ist das **situierte** Verändern von Arbeitsabläufen erforderlich



Sensoren in der Robotik

- ▶ Spezielle Sensoren, sowie deren Einsatzmöglichkeiten sollen am Beispiel der Robotik erläutert werden
- ▶ Der Sensoreinsatz gewinnt bei der Entwicklung **autonomer** und **intelligenter Robotersysteme** zunehmend an Bedeutung
- ▶ Dabei steht der **Perzeption-Aktion-Zyklus** im Vordergrund
- ▶ Hierbei wird die Umwelt über Sensoren wahrgenommen und **adaptiv** verändert
- ▶ Vor allem bei der **interaktiven** Zusammenarbeit mit Robotersystemen ist das **situierte** Verändern von Arbeitsabläufen erforderlich



Anwendung von Sensoren in der Robotik

▶ **Intrinsische Sensoren:**

Inkrementalgeber, Winkelgeber, Tachometer, Gyroskop

▶ **Externe Kraftsensoren:**

Dehnungsmessstreifen, Kraft-Momentsensoren, Piezokristall- und Piezokeramik-Sensoren, Kraftsensoren auf Basis von Induktivität und Kapazität

▶ **Externe Abstandssensoren:**

Ultraschall, Infrarot, Laser, Abstandssensoren auf Basis von Induktivität und Kapazität

▶ **Visuelle Sensoren:**

Lineare Kameras, CCD-Kameras, Stereo-Sichtsysteme, Omnidirektionale Sichtsysteme



Anwendung von Sensoren in der Robotik

▶ **Intrinsische Sensoren:**

Inkrementalgeber, Winkelgeber, Tachometer, Gyroskop

▶ **Externe Kraftsensoren:**

Dehnungsmessstreifen, Kraft-Momentsensoren, Piezokristall- und Piezokeramik-Sensoren, Kraftsensoren auf Basis von Induktivität und Kapazität

▶ **Externe Abstandssensoren:**

Ultraschall, Infrarot, Laser, Abstandssensoren auf Basis von Induktivität und Kapazität

▶ **Visuelle Sensoren:**

Lineare Kameras, CCD-Kameras, Stereo-Sichtsysteme, Omnidirektionale Sichtsysteme



Anwendung von Sensoren in der Robotik

▶ **Intrinsische Sensoren:**

Inkrementalgeber, Winkelgeber, Tachometer, Gyroskop

▶ **Externe Kraftsensoren:**

Dehnungsmessstreifen, Kraft-Momentsensoren, Piezokristall- und Piezokeramik-Sensoren, Kraftsensoren auf Basis von Induktivität und Kapazität

▶ **Externe Abstandssensoren:**

Ultraschall, Infrarot, Laser, Abstandssensoren auf Basis von Induktivität und Kapazität

▶ **Visuelle Sensoren:**

Lineare Kameras, CCD-Kameras, Stereo-Sichtsysteme, Omnidirektionale Sichtsysteme



Anwendung von Sensoren in der Robotik

▶ **Intrinsische Sensoren:**

Inkrementalgeber, Winkelgeber, Tachometer, Gyroskop

▶ **Externe Kraftsensoren:**

Dehnungsmessstreifen, Kraft-Momentsensoren, Piezokristall- und Piezokeramik-Sensoren, Kraftsensoren auf Basis von Induktivität und Kapazität

▶ **Externe Abstandssensoren:**

Ultraschall, Infrarot, Laser, Abstandssensoren auf Basis von Induktivität und Kapazität

▶ **Visuelle Sensoren:**

Lineare Kameras, CCD-Kameras, Stereo-Sichtsysteme, Omnidirektionale Sichtsysteme



Perzeption-Aktion-Zyklus

1. **Datenerfassung:** Die Sensoren erfassen die Stimuli und geben ein analoges oder digitales Signal aus
2. **Signalvorverarbeitung:** Filtern, Normieren, usw.
3. **Sensordatenfusion:** Redundante oder hochdimensionale Sensordaten werden zusammengefasst, um robustere Messdaten zu erhalten
4. **Merkmalsextraktion:** Für die technische Realisierung biologischer/menschlicher Wahrnehmung werden Merkmale berechnet, die die Perzeption mathematisch beschreiben



Perzeption-Aktion-Zyklus

1. **Datenerfassung:** Die Sensoren erfassen die Stimuli und geben ein analoges oder digitales Signal aus
2. **Signalvorverarbeitung:** Filtern, Normieren, usw.
3. **Sensordatenfusion:** Redundante oder hochdimensionale Sensordaten werden zusammengefasst, um robustere Messdaten zu erhalten
4. **Merkmalsextraktion:** Für die technische Realisierung biologischer/menschlicher Wahrnehmung werden Merkmale berechnet, die die Perzeption mathematisch beschreiben



Perzeption-Aktion-Zyklus

1. **Datenerfassung:** Die Sensoren erfassen die Stimuli und geben ein analoges oder digitales Signal aus
2. **Signalvorverarbeitung:** Filtern, Normieren, usw.
3. **Sensordatenfusion:** Redundante oder hochdimensionale Sensordaten werden zusammengefasst, um robustere Messdaten zu erhalten
4. **Merkmalsextraktion:** Für die technische Realisierung biologischer/menschlicher Wahrnehmung werden Merkmale berechnet, die die Perzeption mathematisch beschreiben



Perzeption-Aktion-Zyklus

1. **Datenerfassung:** Die Sensoren erfassen die Stimuli und geben ein analoges oder digitales Signal aus
2. **Signalvorverarbeitung:** Filtern, Normieren, usw.
3. **Sensordatenfusion:** Redundante oder hochdimensionale Sensordaten werden zusammengefasst, um robustere Messdaten zu erhalten
4. **Merkmalsextraktion:** Für die technische Realisierung biologischer/menschlicher Wahrnehmung werden Merkmale berechnet, die die Perzeption mathematisch beschreiben



Perzeption-Aktion-Zyklus (cont.)

- 5. Mustererkennung:** Auf den extrahierten Merkmalen werden Muster gesucht (Klassifikation)
- 6. Umweltmodellierung:** Mit den Mustern wird die Umgebung und Umwelt des Roboters modelliert
- 7. Manipulation:** Auf Basis des Modells werden Aktionen durchgeführt, mit denen der Roboter die Umwelt verändert (Roboterarm, Greifer, Räder, ...)



Perzeption-Aktion-Zyklus (cont.)

5. **Mustererkennung:** Auf den extrahierten Merkmalen werden Muster gesucht (Klassifikation)
6. **Umweltmodellierung:** Mit den Mustern wird die Umgebung und Umwelt des Roboters modelliert
7. **Manipulation:** Auf Basis des Modells werden Aktionen durchgeführt, mit denen der Roboter die Umwelt verändert (Roboterarm, Greifer, Räder, ...)



Perzeption-Aktion-Zyklus (cont.)

5. **Mustererkennung:** Auf den extrahierten Merkmalen werden Muster gesucht (Klassifikation)
6. **Umweltmodellierung:** Mit den Mustern wird die Umgebung und Umwelt des Roboters modelliert
7. **Manipulation:** Auf Basis des Modells werden Aktionen durchgeführt, mit denen der Roboter die Umwelt verändert (Roboterarm, Greifer, Räder, ...)

Perzeption-Aktion-Zyklus (cont.)

