



# 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

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



## 64-425 Seminar / Übungen

|                |   |
|----------------|---|
| <b>Seminar</b> | Donnerstag 8:15 - 9:45 Uhr  |
| <b>Raum</b>    | F-009   |
| <b>Web</b>     | <a href="http://tams.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2011ws/seminar/ir">http://tams.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2011ws/seminar/ir</a> |
| <b>Name</b>    | Benjamin Adler<br>Prof. Dr. Jianwei Zhang   |
| <b>Büro</b>    | F-324   |
| <b>Telefon</b> | (040) 42883-2504  |
| <b>E-mail</b>  | 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

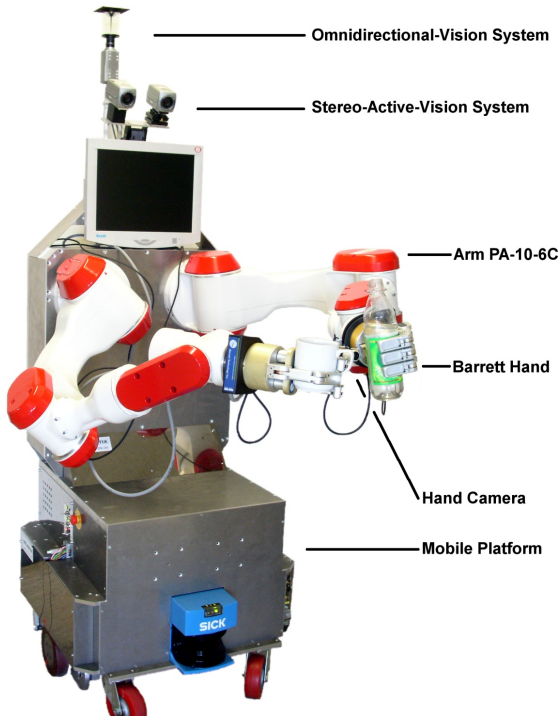
## Was sind „intelligente Roboter“?

Robotik umfasst sehr viele Teilgebiete der Informatik

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

# TASER – TAMS Service Robot

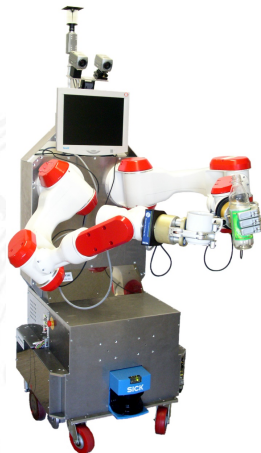
Forschungsplattform  
für Servicerobotik



# 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

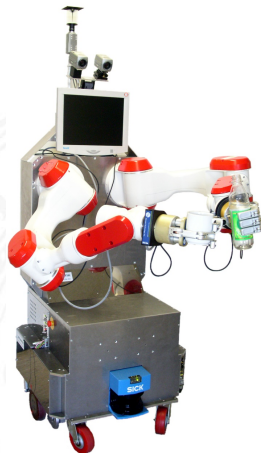




## TAMS Service Robot (cont.)

### 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

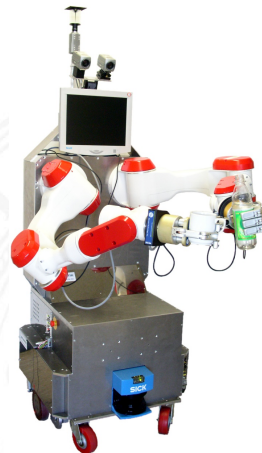


## TAMS Service Robot (cont.)

- ▶ 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

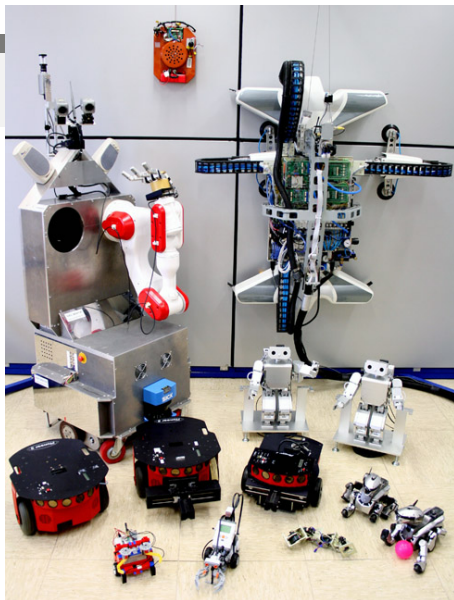
▶ sehr unterschiedliche Plattformen

- ▶ 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
- ▶ Kontroller-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





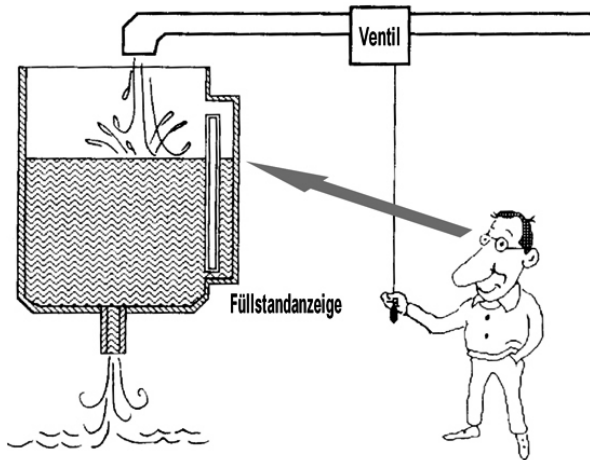
# Gliederung (cont.)

## 9. Steuerungsarchitekturen





## Ein einfaches Beispiel

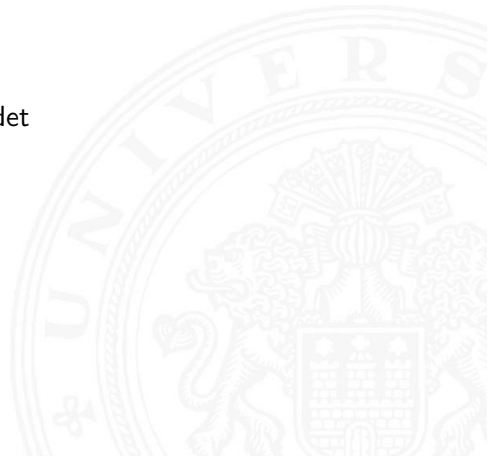




# Was ist ein Sensor?

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

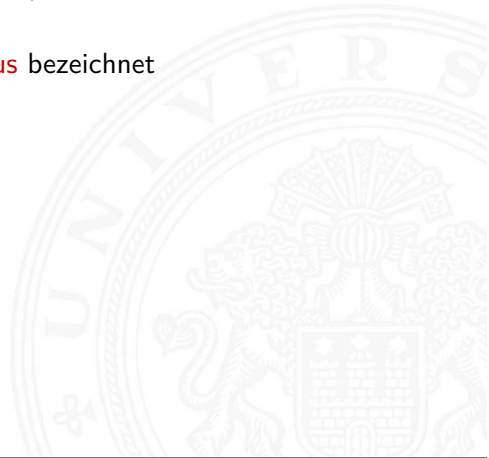
Ein **physikalischer Sensor** ist eine Einheit, die ein Signal oder Stimulus

- ▶ 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 Ladungsein
- ▶ Es kann weiter unterscheidbar sein durch
  - ▶ Amplitude,
  - ▶ Frequenz oder
  - ▶ Phase





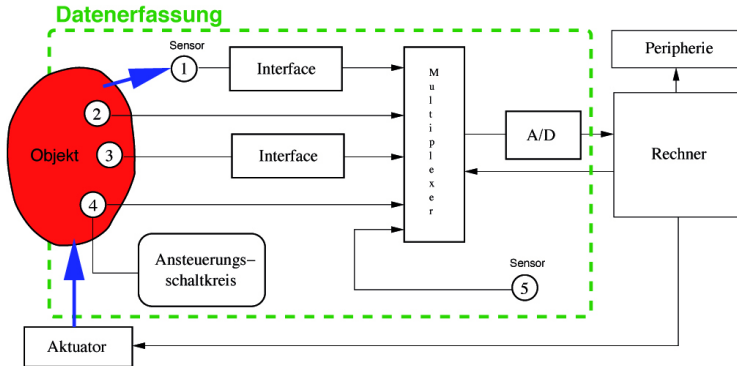
# Sensortypen

- ▶ **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



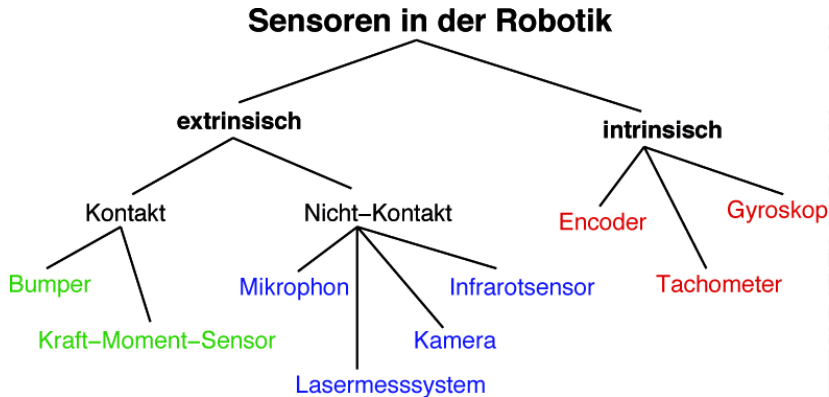
# Sensorklassifikation

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

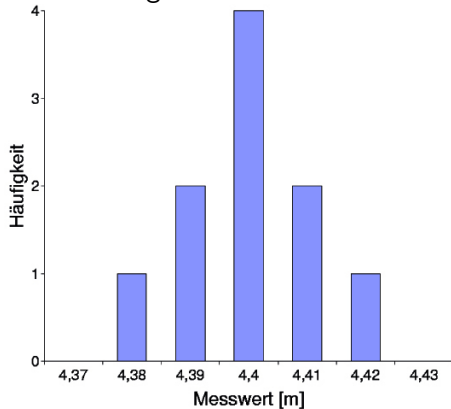
- ▶ Eine Messung ist stets mit Unsicherheit behaftet
- ▶ **Beispiel:** Entfernungsmessung
  - ▶ Abstand zu einem Objekt wird mehrmals gemessen

| 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  $\Delta x_i$  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  $\Delta x_i$  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  $\mu$  bezeichnet

**Anmerkung:**  $\mu$  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  $\mu$  bezeichnet

**Anmerkung:**  $\mu$  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)  $\mu$



# 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.)

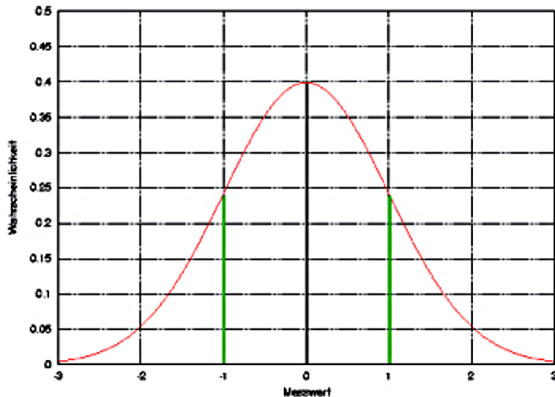
### Definition

*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:

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



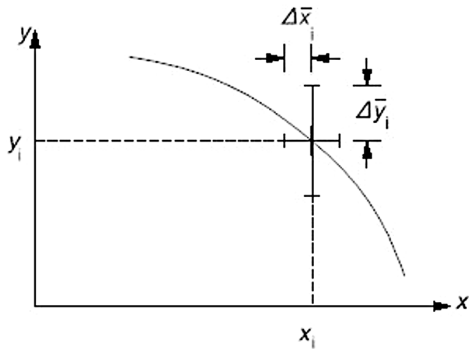
## Fehlerfortpflanzung (cont.)

### ▶ 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.)

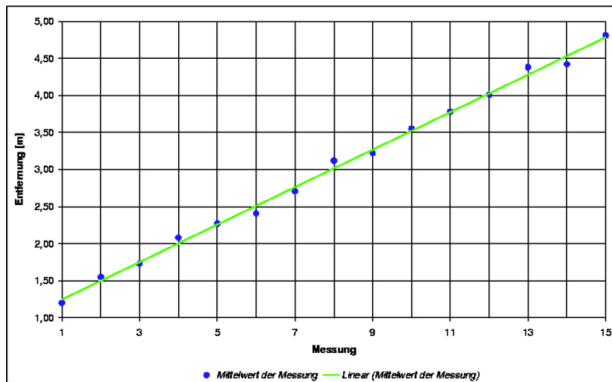
- ▶ Die Koeffizienten der **Ausgleichsgeraden** berechnen sich nach:

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

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

- ▶  $x_i$  und  $y_i$  sind die Messwertpaare
- ▶  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  sind die Mittelwerte der Messwertreihen<sup>1</sup>

## Lineare Regression (cont.)



<sup>1</sup> 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

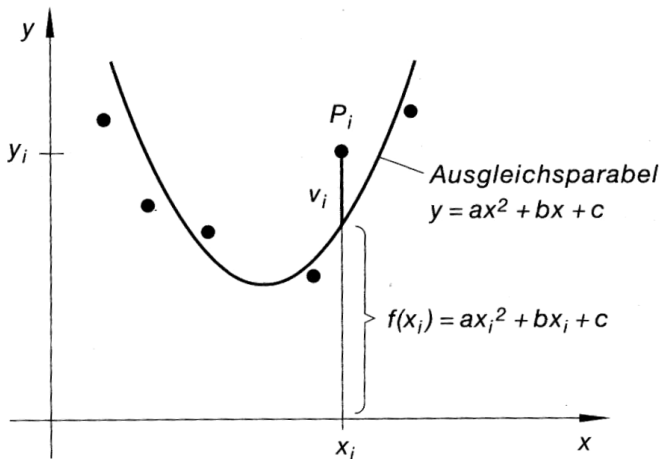
### Regressions- oder Ausgleichsparabel

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

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*

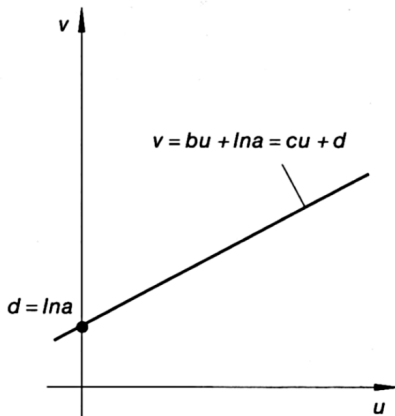
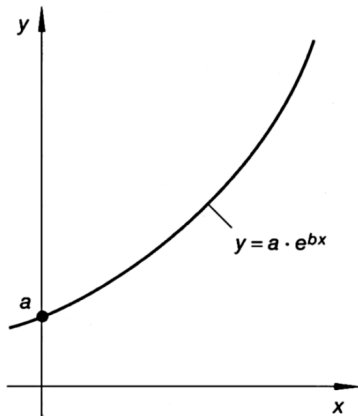
$$u = x, \quad v = \ln y \quad \text{Zusätzlich: } c = b, \quad d = \ln a$$

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

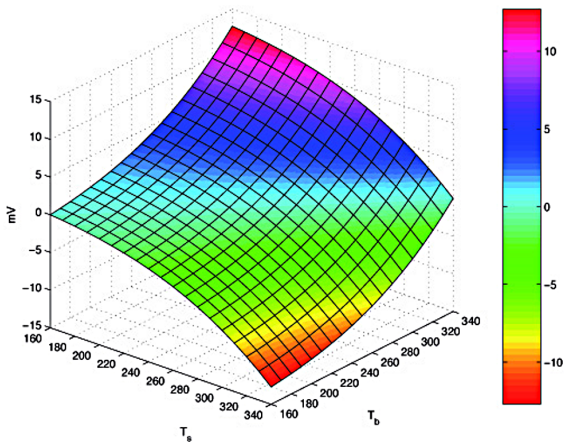
$$U = G(T_b^4 - T_s^4) \quad (\text{Stefan - Boltzmann - Gesetz})$$

- ▶  $G$  – 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:  
 $\pm\delta$

$$\delta \leq \Delta$$

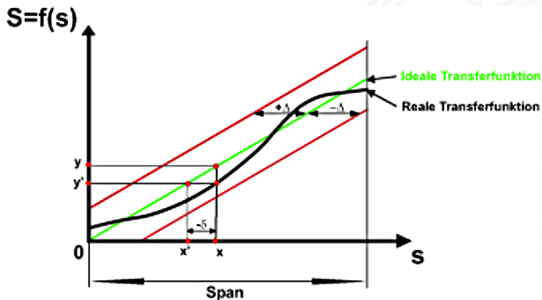
**Beispiel:** Stimulus  $x$

- ▶ 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

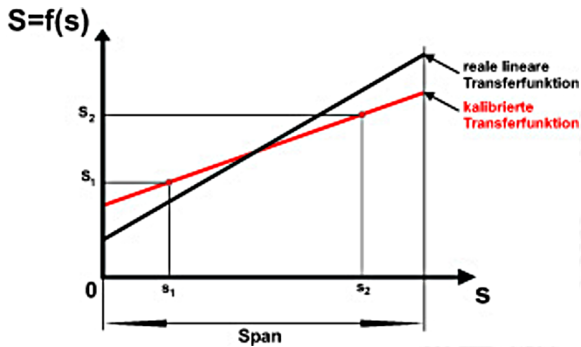




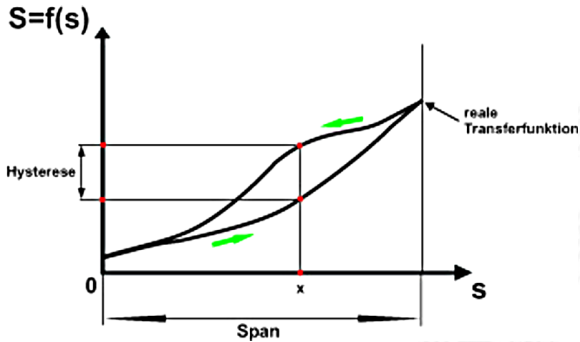
## Beispiel: Einfache Kalibration

- ▶ 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

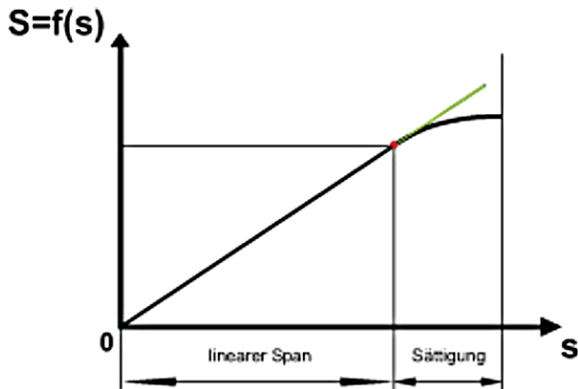
Ein **Hysteresefehler** ist die Abweichung des Ausgangssignals eines Sensors für einen bestimmten Stimuluswert, je nachdem, aus welcher Richtung der Stimulus sich diesem Wert nähert



## 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.)



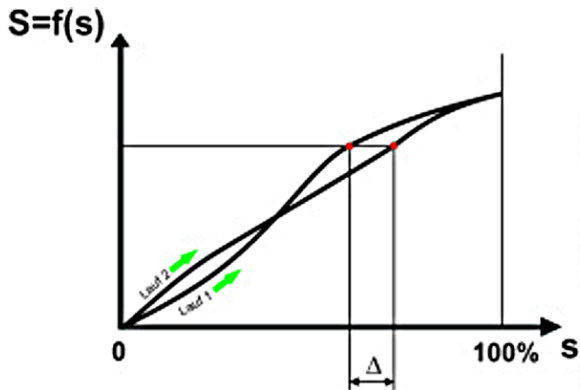


## Wiederholgenauigkeit

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

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

## Wiederholgenauigkeit (cont.)





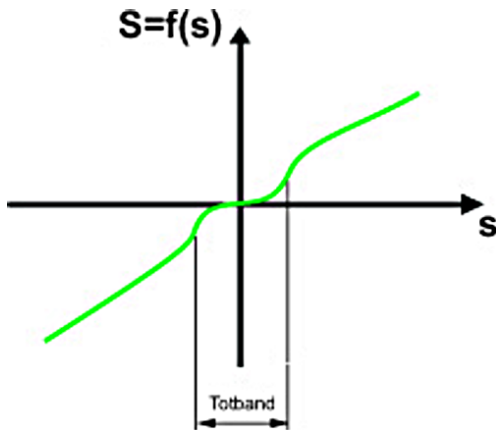


# Totband

## 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

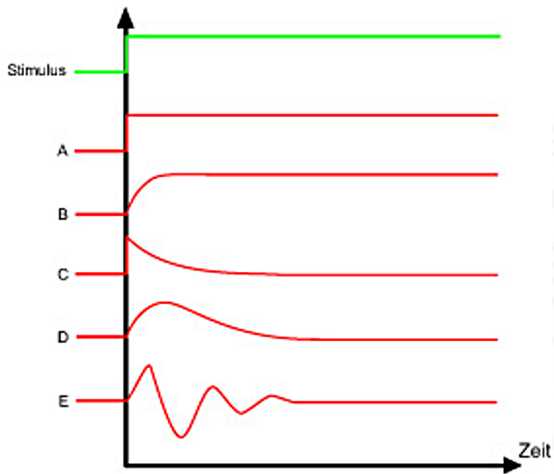
- ▶ Für statische Eingangssignale beschreiben die bisher genannten Eigenschaften einen Sensor vollständig
- ▶ Wenn das Eingangssignal variiert, gilt dies nicht mehr
- ▶ **Grund:** Der Sensor reagiert nicht immer direkt auf den Stimulus
- ▶ Ein Sensor gibt daher nicht immer gleichzeitig zum Stimulus den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



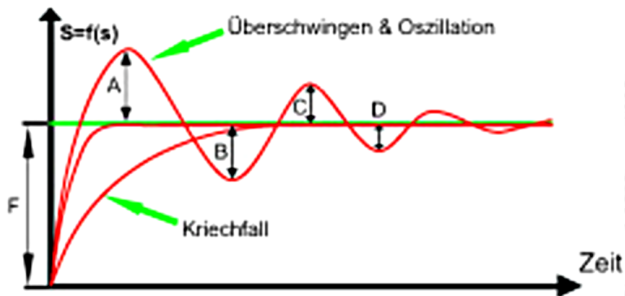
# Dynamische Eigenschaften

- ▶ 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 **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



# 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.)

