

## Vorlesung: Angewandte Sensorik

Prof. J. Zhang

zhang@informatik.uni-hamburg.de

Universität Hamburg

Fachbereich Informatik

AB Technische Aspekte Multimodaler Systeme

11. November 2005

## 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 *situier*te Verändern von Arbeitsabläufen erforderlich.

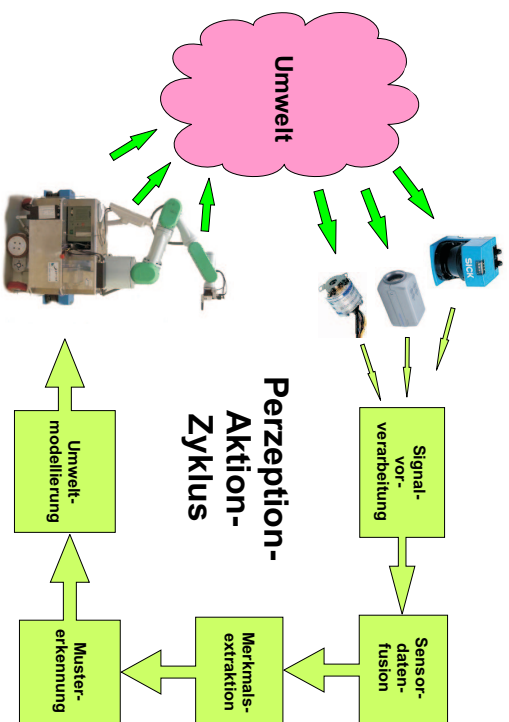
## Inhaltsverzeichnis

4. Sensoren in der Robotik . . . . .	78
Perzeption-Aktion-Zyklus . . . . .	79
Optische Encoder . . . . .	82
Inkrementalgeber . . . . .	83
Einschub: Schnitt-Trigger . . . . .	86
Richtungserkennung bei Inkrementalgebern . . . . .	90
Anwendung: Inkrementalgeber . . . . .	91
Winkelgeber . . . . .	105
Resolver . . . . .	111

## Perzeption-Aktion-Zyklus

Der Perzeption-Aktion-Zyklus durchläuft sieben Phasen:

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.
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, . . .).



## Anwendung von Sensoren in der Robotik

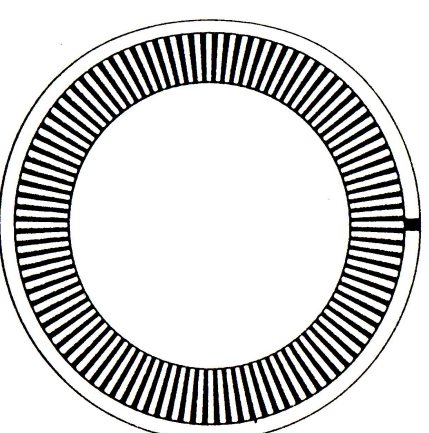
In den nächsten Kapiteln sollen folgende Sensoren näher betrachtet werden:

- **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

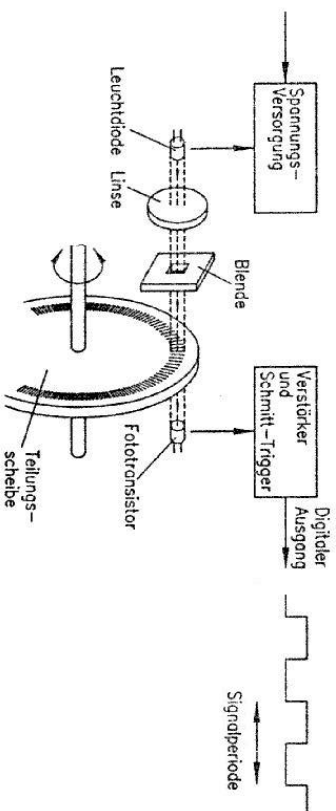
## Optische Encoder

- *Optische Encode* basieren auf einer Maske mit transparenten und nicht-transparenten Flächen.
- Ein Lichtstrahl fällt auf die Maske und wird gegebenenfalls von einem dahinter liegenden Empfänger registriert.
- Die Maske ist auf einen Streifen oder auf eine Scheibe aufgedruckt.
- Bei einem *Inkrementalgeber* besteht die Maske aus gleichgroßen, äquidistanten transparenten und nicht-transparenten Flächen.
- Bei einer Scheibe wird die Maske gedreht und der Empfänger registriert schrittweise Änderungen der Winkelstellung der Scheibe.
- Wird die Zeit gemessen, die für eine Winkeländerung benötigt wird, erhält man die Winkelgeschwindigkeit.

## Encoder-Scheibe für Inkrementalgeber



## Funktionsprinzip optischer Encoder



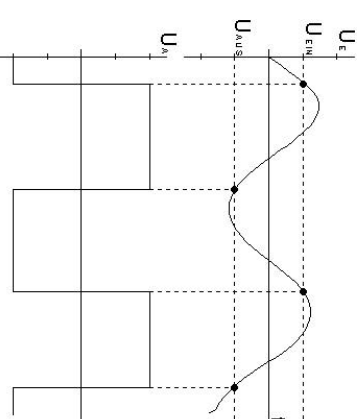
## Aufbau optischer Encoder

- Meist werden Infrarot-Leuchtdioden eingesetzt.
- Die Empfänger arbeiten in einem spektralen Bereich von 820 bis 960  $nm$ .
- Die Scheiben bestehen aus laminiertem Plastik.
- Die nicht-transparenten Linien werden durch einen fotografischen Prozess erzeugt.
- **Vorteil:** Die Scheiben sind leicht, haben ein geringes Trägheitsmoment und sind sehr schock- und vibrationsresistent.
- **Nachtteil:** Nur innerhalb geringer Temperaturgrenzen einsetzbar.
- Scheiben für hohe Temperaturen werden aus gelochtem Metall hergestellt.

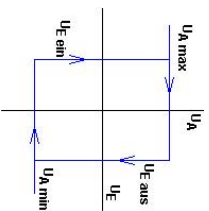
## Einschub: Schmitt-Trigger

- Ein *Schmitt-Trigger* wandelt eine analoge Eingangsspannung (z.B. Sinus-Spannung) in eine Rechteckspannung um.
- Die Ausgangsspannung  $U_A$  kippt bei Erreichen einer Eingangsspannung  $U_E = U_{EIN}$ .
- Sinkt die Eingangsspannung auf  $U_{AUS}$  kippt die Ausgangsspannung wieder auf den vorherigen Wert zurück.

## Spannungsverlauf des Schmitt-Triggers

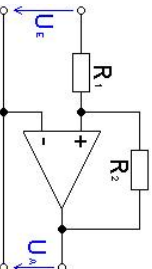


## Kennlinie des Schmitt-Triggers



- Die dargestellte Übertragungskennlinie nennt man *Spannungshysterese* oder *Schalthysterese*.
- Sie wird definiert ab welcher Eingangsspannung die Ausgangsspannung auf die maximale Ausgangsspannung bzw. die minimale Ausgangsspannung springt.
- Bei Erhöhung der Eingangsspannung werden die Linien auf der waagerechten Achse länger!

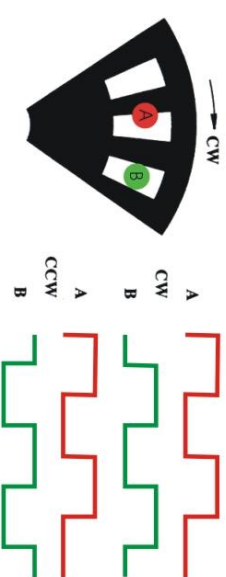
## Schaltbild des Schmitt-Triggers



- Schmitt-Trigger können mit einem Operationsverstärker (OP) aufgebaut werden.
- Dabei wird der OP mit einem Widerstand  $R_2$  mitgekoppelt.
- Die Schaltung arbeitet dann als Sinus-Rechteck-Wandler.
- Diese Schaltungsmaßnahmen gehen auf einen Mann namens Schmitt zurück.  $\Rightarrow$  Daher Schmitt-Trigger!
- Der Schmitt-Trigger funktioniert als Schwellwertschalter. Für die Spannungsschwellen sind die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  verantwortlich.

## Richtungserkennung bei Inkrementalgebern

- Verwendet man zwei Leuchtdioden und Empfänger, kann die Bewegungsrichtung ermittelt werden.



- Rotiert die Scheibe im Uhrzeigersinn (CW) führt Signal A.
- Rotiert die Scheibe gegen den Uhrzeigersinn (CCW) führt Signal B.

## Anwendung von Inkrementalgebern



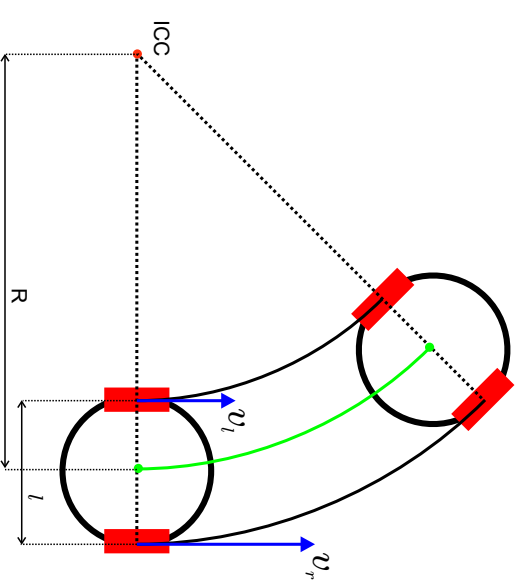
- Häufigster Anwendungsfall: Kombination mit Motoren
- Es wird der relative Drehwinkel, die Drehrichtung und -geschwindigkeit bestimmt.
- Mit Wissen über angeschlossene Getriebe und Räder, kann die zurückgelegte Strecke berechnet werden.

## Einfache Lokalisation mobiler Roboter

- Bei mobilen Robotern sind meistens Inkrementalgeber in die Antriebsmotoren integriert.
- Mit Wissen über die Radgröße und den Radabstand der angetriebenen Räder lässt sich die Position des Roboters bestimmen.
- Dabei wird Bezug auf ein globales Koordinatensystem genommen.
- Dieses Verfahren für die Lokalisation mobiler Roboter heißt *Koppelnavigation* (engl. *dead reckoning*).
- Anhand der Messwerte der Inkrementalgeber wird die relative Positionsänderung des Roboters bestimmt und zur letzten bekannten Position hinzuaddiert.

## Koppelnavigation (1)

- Der einfachste Fall von Koppelnavigation lässt sich für mobile Roboter mit einem *Differentialantrieb* aufstellen.
- Beim Differentialantrieb liegen die zwei Antriebsräder eines Roboters auf einer gemeinsamen Achse.
- Die Radgeschwindigkeiten lassen sich getrennt steuern und regeln.
- Der Mittelpunkt des Roboters soll auf der Mitte der Verbindung der beiden Räder liegen.
- Der Roboter fährt bei gleichen Radgeschwindigkeiten vor- bzw. rückwärts.
- Sind die Geschwindigkeiten unterschiedlich fährt der Roboter auf einer Kreisbahn.



## Koppelnavigation (2)

- Der Roboter kann sich nur auf einer Kreisbahn um einen Punkt der gemeinsamen Achse der Räder bewegen.
- Dieser Punkt wird als *instantaneous center of curvature (ICC)* bezeichnet.
- Durch variierende Radgeschwindigkeiten kann die Position des ICC verändert werden.
- Sei  $\omega$  die Rotationsgeschwindigkeit mit der sich der Roboter um den ICC dreht.
- Sei  $l$  die Strecke zwischen den beiden Rädern.
- Das rechte Rad habe die Geschwindigkeit  $v_r$ , das linke die Geschwindigkeit  $v_l$ .

## Koppelnavigation (3)

Sei  $R$  der Abstand zwischen Robotermittelpunkt und ICC, dann gelten die folgenden beiden Beziehungen:

$$\begin{aligned}\omega \cdot (R + l/2) &= v_r \\ \omega \cdot (R - l/2) &= v_l\end{aligned}$$

## Koppelnavigation (5)

$$v_l = v_r:$$

- Gleichung für den Radius ist nicht lösbar.
- Nenner ist gleich Null.
- Praktisch ist der Radius unendlich.
- Roboter fährt geradeaus.

$$v_l = -v_r:$$

- Zähler der Gleichung für den Radius wird Null.
- Der Roboter dreht sich auf der Stelle.

## Koppelnavigation (4)

- Sowohl  $v_l$ ,  $v_r$ ,  $\omega$  als auch  $R$  sind zeitabhängige Funktionen.
- Zu jedem Zeitpunkt lassen sich  $R$  und  $\omega$  wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned}R &= \frac{l}{2} \cdot \frac{v_l + v_r}{v_r - v_l} & \omega &= \frac{v_r - v_l}{l}\end{aligned}$$

## Vorwärtskinematik (1)

- Der Roboter ändert beim Fahren seine Position  $(x, y)$  sowie seine Orientierung  $(\theta)$  im Bezug zu einem globalen bzw. Weltkoordinatensystem.
- Das aus Position und Orientierung gebildete Tripel  $(x, y, \theta)$  heißt *pose*.
- Der Winkel  $\theta$  ist der Winkel zur  $x$ -Achse des Weltkoordinatensystems.
- Die Berechnung der *pose*, die bei gegebenen Rotationsgeschwindigkeiten  $\omega_r$  und  $\omega_l$  der Räder erreicht wird, wird als *Vorwärtskinematik* bezeichnet.

## Vorwärtskinematik (2)

Der ICC lässt sich wie folgt berechnen:

$$ICC = (x - R \cdot \sin(\theta), y + R \cdot \cos(\theta))$$

## Vorwärtskinematik (3)

Mit dem ICC kann die *pose*  $(x', y', \theta')$  des Roboters zum Zeitpunkt  $t + \delta t$  bestimmt werden:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega \cdot \delta t) & -\sin(\omega \cdot \delta t) & 0 \\ \sin(\omega \cdot \delta t) & \cos(\omega \cdot \delta t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x - ICC_x \\ y - ICC_y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ICC_x \\ ICC_y \\ \omega \cdot \delta t \end{bmatrix}$$

Obige Berechnung gilt solange  $v_r$  und  $v_l$  während  $\delta t$  konstant bleiben.

## Vorwärtskinematik (4)

- Die *pose* kann für jeden Zeitpunkt  $t$  ausgehend von einer Anfangssituation  $(x_0, y_0, \theta_0)$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  bestimmt werden.
- Dazu wird die vorrangegangene Gleichung integriert.
- Es müssen die Radgeschwindigkeiten  $v_l(t)$  und  $v_r(t)$  bekannt sein.

## Vorwärtskinematik (5)

Es ergibt sich für den speziellen Fall des mobilen Roboters mit Differentialantrieb:

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{2} \int_0^t [v_r(t) + v_l(t)] \cos[\theta(t)] dt \\ y(t) &= \frac{1}{2} \int_0^t [v_r(t) + v_l(t)] \sin[\theta(t)] dt \\ \theta(t) &= \frac{1}{l} \int_0^t [v_r(t) + v_l(t)] dt \end{aligned}$$

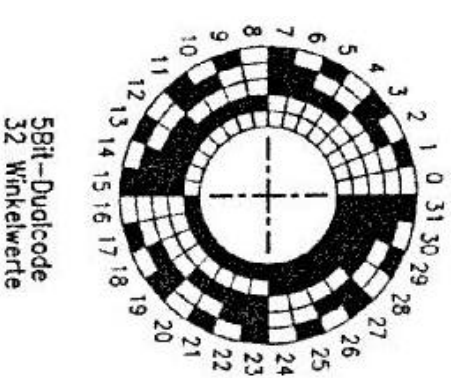
## Vorwärtskinematik (6)

- In der Praxis wird die Rotationsgeschwindigkeit der Räder gemessen.
- Dazu dienen die Inkrementalgeber.
- Die Rotationsgeschwindigkeiten werden in konstanten Zeitabständen  $\Delta t$  gemessen.
- Dadurch wird aus obigen Integralen eine Summe.
- Es wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeiten während  $\Delta t$  konstant bleiben.
- **Problem:** Die bei den Messungen gemachten Fehler summieren sich im Laufe einer Fahrt immer weiter auf!  
→ Berechnete und wirkliche Position weichen immer weiter voneinander ab (siehe Aufgabenzettel 3)!

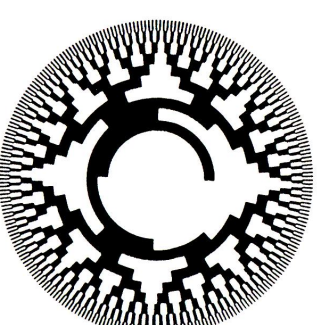
## Winkelgeber

- Im Gegensatz zum Inkrementalgeber liefern *Winkelgeber* absolute Winkel.
- Bei Winkelgebern werden binär kodierte Scheiben verwendet.
- Mehrere Leuchtdioden und Empfänger tasten die Scheibe ab.
- Jedem Winkel ist genau ein Binärkode zugeordnet.
- Je nach Anzahl der Binärstellen lässt sich der Winkel unterschiedlich genau messen.

## Codescheibe für Winkelgeber (1)



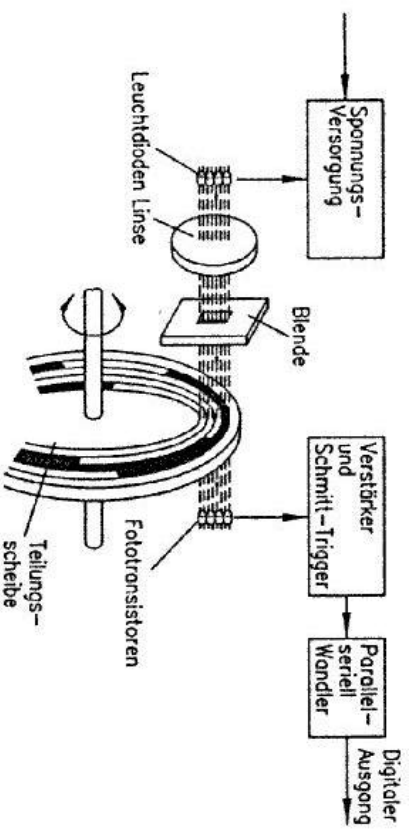
## Codescheibe für Winkelgeber (2)



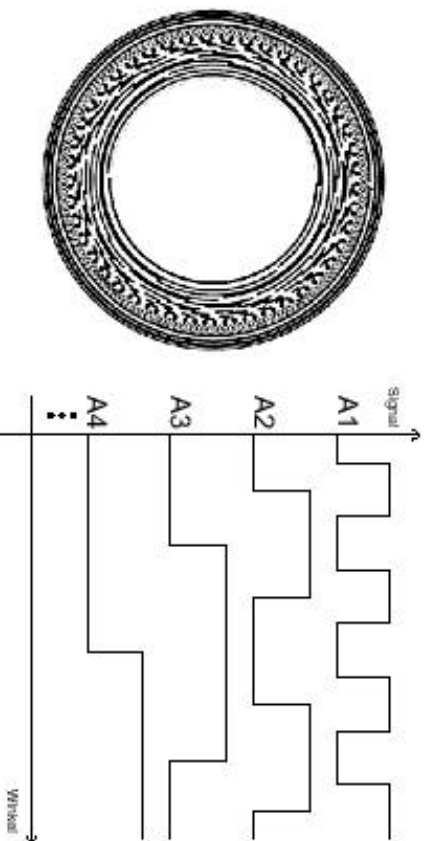
10Bit-Dualcode  
1024 Winkelwerte



## Funktionsprinzip eines Winkelgebers



## Paralleles Ausgangssignal eines Winkelgebers



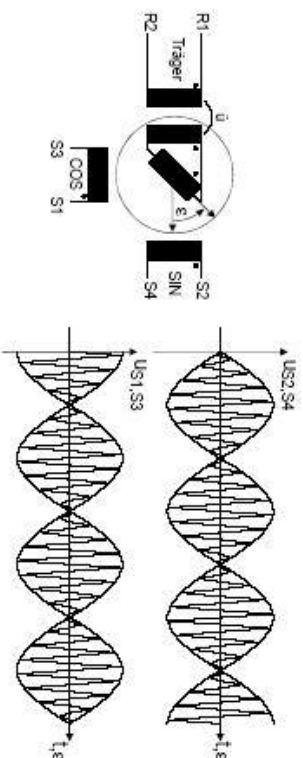
## Anwendung von Winkelgebern

- Roboterarme
- Positioniersysteme

## Resolver (1)

- Resolver sind eine weitere Möglichkeit um absolute Winkel zu bestimmen.
- Resolver entsprechen im konstruktiven Aufbau einer 2-strängigen Drehfeldmaschine.
- Meistens wird der Rotor des Resolvers auf der Motorwelle befestigt.
- Die Erregerwicklung im Rotor wird über eine rotierenden Transformator statorseitig mit der Wechselspannung  $U_{R1,R2}$  gespeist.
- Das Erregerfeld induziert in die Statorwicklungen  $U_{S1,S3}$  und  $U_{S2,S4}$  eine Spannung.
- Sie weist gegenüber der Erregerspannung eine Phasenverschiebung  $\varphi_S$  auf.

## Ersatzschaltbild und Ausgangssignale



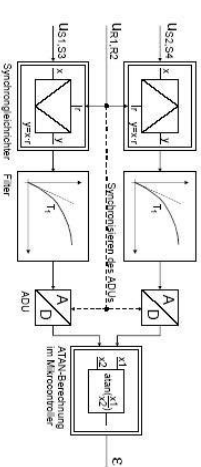
## Spannungsverläufe

$$\begin{aligned}
 U_{R1,R2} &= U_0 \cdot \sin(\omega t) \\
 U_{S1,S3} &= \ddot{u} \cdot U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_S) \cdot \cos(\epsilon) \\
 U_{S2,S4} &= \ddot{u} \cdot U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_S) \cdot \sin(\epsilon)
 \end{aligned}$$

$\ddot{u}$  ist das Übersetzungsverhältnis des Transformators.

## Resolver (2)

- Resolver für Servoantriebe verwenden hohe Speisefrequenzen im Bereich von  $5\text{ kHz}$  bis  $20\text{ kHz}$ .
- Die Bestimmung des Drehwinkels aus den Resolversignalen erfolgt unter Anwendung einfacher trigonometrischer Beziehungen.
- In Microcontrollern wird ein direkt abtastendes Verfahren angewandt.



- Resolver sind preiswerte Geber, die bei gemäßigten Anforderungen an die Bewegungsdynamik und Winkelgenauigkeit eingesetzt werden.

## Literatur

- [1] Elektronik-kompendium: Schnitt-trigger. <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0209241.htm>.
- [2] Jacob Fraden. *Handbook of modern sensors: physics, design, and applications*. chapter 5.7. Springer-Verlag New York, Inc., 2nd edition, 1996.
- [3] Jan Reimer. *Drehzahlensensor nach dem Wirbelstromprinzip für Servoantriebe*. PhD thesis, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2002. <http://www.ifr.ing.tu-bs.de>.