



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

Optische Encoder

Inkrementalgeber

Winkelgeber

Resolver

Anwendung von Inkrementalgebern

Literatur

Tachometer

Gyroskope

3. Kräfte und Druck
4. Abstandssensoren
5. Scandaten verarbeiten



Gliederung (cont.)

6. Rekursive Zustandsschätzung
7. Sichtsysteme
8. Fuzzy-Logik
9. Steuerungsarchitekturen





Optische Encoder

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



Optische Encoder

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



Optische Encoder

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



Optische Encoder

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



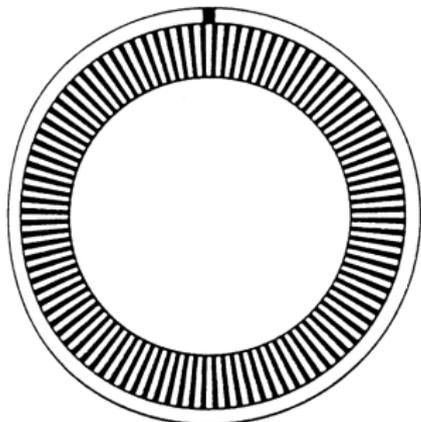
Optische Encoder

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

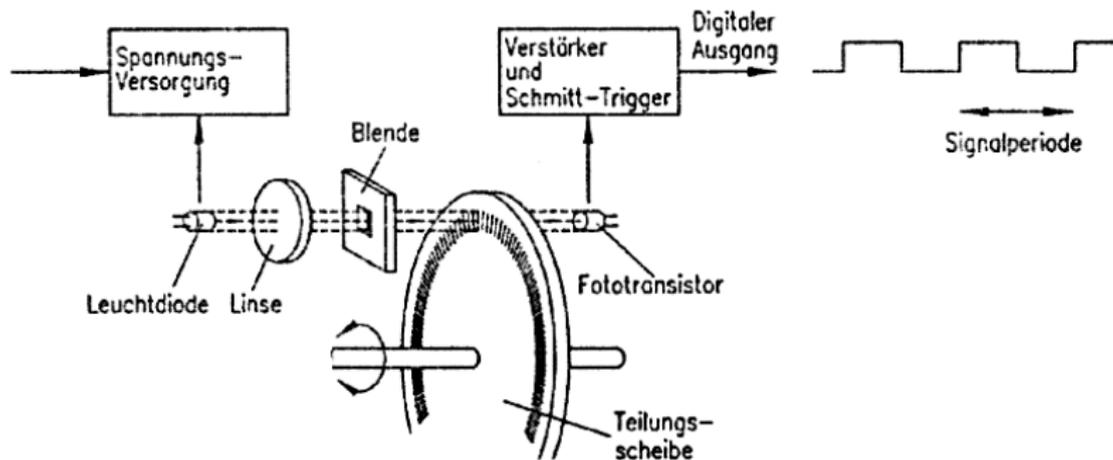
Inkrementalgeber

Encoderscheibe für Inkrementalgeber

- ▶ Bei einem **Inkrementalgeber** besteht die Maske aus gleichgroßen, äquidistanten transparenten und nicht-transparenten Flächen



Funktionsprinzip optischer Encoder



Aufbau eines Inkrementalgebers

- ▶ 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
- ▶ **Nachteil:** Nur innerhalb geringer Temperaturgrenzen einsetzbar
- ▶ Scheiben für hohe Temperaturen werden aus gelochtem Metall hergestellt

Aufbau eines Inkrementalgebers

- ▶ 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
- ▶ **Nachteil:** Nur innerhalb geringer Temperaturgrenzen einsetzbar
- ▶ Scheiben für hohe Temperaturen werden aus gelochtem Metall hergestellt



Aufbau eines Inkrementalgebers

- ▶ 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
- ▶ **Nachteil:** Nur innerhalb geringer Temperaturgrenzen einsetzbar
- ▶ Scheiben für hohe Temperaturen werden aus gelochtem Metall hergestellt



Aufbau eines Inkrementalgebers

- ▶ 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
- ▶ **Nachteil:** Nur innerhalb geringer Temperaturgrenzen einsetzbar
- ▶ Scheiben für hohe Temperaturen werden aus gelochtem Metall hergestellt

Aufbau eines Inkrementalgebers

- ▶ 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
- ▶ **Nachteil:** Nur innerhalb geringer Temperaturgrenzen einsetzbar
- ▶ Scheiben für hohe Temperaturen werden aus gelochtem Metall hergestellt



Aufbau eines Inkrementalgebers

- ▶ 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
- ▶ **Nachteil:** Nur innerhalb geringer Temperaturgrenzen einsetzbar
- ▶ Scheiben für hohe Temperaturen werden aus gelochtem Metall hergestellt

Aufbau eines Inkrementalgebers

- ▶ 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
- ▶ **Nachteil:** Nur innerhalb geringer Temperaturgrenzen einsetzbar
- ▶ Scheiben für hohe Temperaturen werden aus gelochtem Metall hergestellt



Schmitt-Trigger

- ▶ Ein **Schmitt-Trigger** dient z.B.
 - ▶ zum Entprellen von Schaltern oder
 - ▶ zum Formen von Signalen

- ▶ Er wandelt eine **analoge Eingangsspannung** 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



Schmitt-Trigger

- ▶ Ein **Schmitt-Trigger** dient z.B.
 - ▶ zum Entprellen von Schaltern oder
 - ▶ zum Formen von Signalen

- ▶ Er wandelt eine **analoge Eingangsspannung** 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



Schmitt-Trigger

- ▶ Ein **Schmitt-Trigger** dient z.B.
 - ▶ zum Entprellen von Schaltern oder
 - ▶ zum Formen von Signalen
- ▶ Er wandelt eine **analoge Eingangsspannung** 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

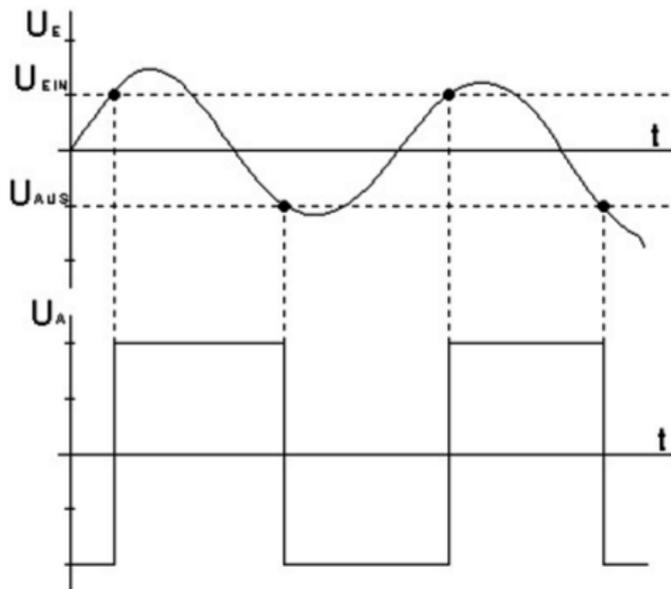


Schmitt-Trigger

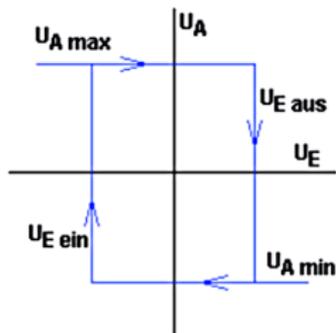
- ▶ Ein **Schmitt-Trigger** dient z.B.
 - ▶ zum Entprellen von Schaltern oder
 - ▶ zum Formen von Signalen

- ▶ Er wandelt eine **analoge Eingangsspannung** 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

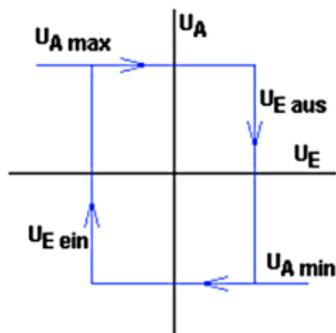


Kennlinie des Schmitt-Triggers



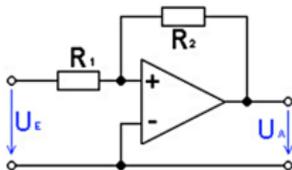
- ▶ Die dargestellte Übertragungskennlinie nennt man **Spannungshysterese** oder **Schalthysterese**
- ▶ Sie definiert bei welcher Eingangsspannung die Ausgangsspannung auf ihren maximale bzw. minimalen Wert springt

Kennlinie des Schmitt-Triggers



- ▶ Die dargestellte Übertragungskennlinie nennt man **Spannungshysterese** oder **Schalthysterese**
- ▶ Sie definiert bei welcher Eingangsspannung die Ausgangsspannung auf ihren maximale bzw. minimalen Wert springt

Schaltbild des Schmitt-Triggers

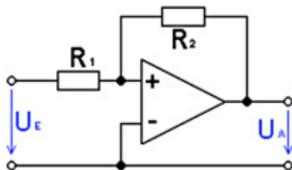


- ▶ Schmitt-Trigger können mit einem Operationsverstärker (OP) aufgebaut werden

$$U_{\text{Ausgang}} = (U_+ - U_-) \cdot G$$

- ▶ Dabei wird der OP mit dem Widerstand R_2 mitgekoppelt (Mitkopplung)
- ▶ Die Schaltung arbeitet dann als Sinus-Rechteck-Wandler (Schwellwertschalter)
- ▶ Spannungsschwellen einstellbar über R_1 und R_2

Schaltbild des Schmitt-Triggers

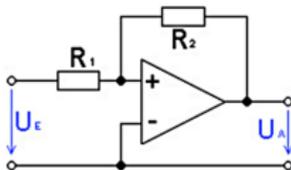


- ▶ Schmitt-Trigger können mit einem Operationsverstärker (OP) aufgebaut werden

$$U_{\text{Ausgang}} = (U_+ - U_-) \cdot G$$

- ▶ Dabei wird der OP mit dem Widerstand R_2 mitgekoppelt (Mitkopplung)
- ▶ Die Schaltung arbeitet dann als Sinus-Rechteck-Wandler (Schwellwertschalter)
- ▶ Spannungsschwellen einstellbar über R_1 und R_2

Schaltbild des Schmitt-Triggers

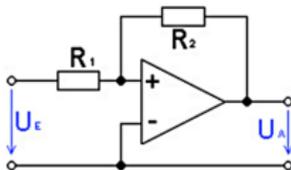


- ▶ Schmitt-Trigger können mit einem Operationsverstärker (OP) aufgebaut werden

$$U_{\text{Ausgang}} = (U_+ - U_-) \cdot G$$

- ▶ Dabei wird der OP mit dem Widerstand R_2 mitgekoppelt (Mitkopplung)
- ▶ Die Schaltung arbeitet dann als Sinus-Rechteck-Wandler (Schwellwertschalter)
- ▶ Spannungsschwellen einstellbar über R_1 und R_2

Schaltbild des Schmitt-Triggers



- ▶ Schmitt-Trigger können mit einem Operationsverstärker (OP) aufgebaut werden

$$U_{\text{Ausgang}} = (U_+ - U_-) \cdot G$$

- ▶ Dabei wird der OP mit dem Widerstand R_2 mitgekoppelt (Mitkopplung)
- ▶ Die Schaltung arbeitet dann als Sinus-Rechteck-Wandler (Schwellwertschalter)
- ▶ Spannungsschwellen einstellbar über R_1 und R_2

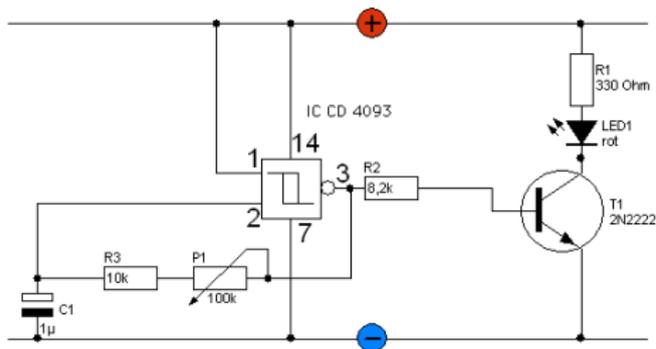


Weitere Anwendungen von Schmitt-Triggern

- ▶ Übertragung digitaler Signale über lange Kabel
 - ▶ Signalfanken werden verschliffen (Tiefpass-Charakteristik)
 - ▶ Schmitt-Trigger erzeugt wieder steilere Signalfanken und Signalpegel

Weitere Anwendungen von Schmitt-Triggern (cont.)

- ▶ Taktgeber/Oszillator:
 - ▶ Kombination aus Schmitt-Trigger, Widerstand und Kondensator (RC-Glied)



Quelle: <http://www.strippenstrolch.de>

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

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



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



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



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



Winkelgeber

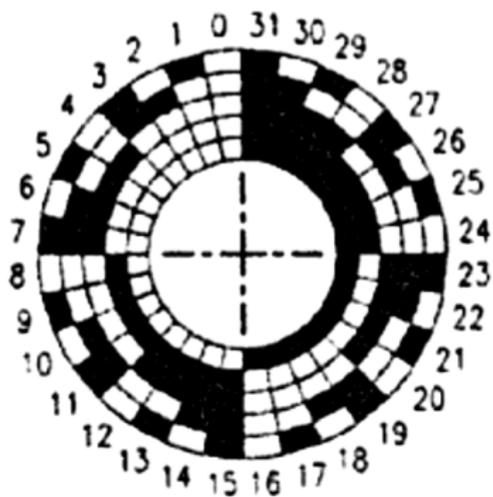
- ▶ Im Gegensatz zum Inkrementalgeber liefern **Winkelgeber** absolute Winkel
- ▶ Bei Winkelgebern werden binär kodierte Scheiben verwendet
- ▶ Mehrere Leuchtdioden und Empfänger tasten die Scheibe ab
- ▶ Jedem Winkel ist genau ein Binärkode zugeordnet
- ▶ Je nach Anzahl der Binärstellen lässt sich der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



Winkelgeber

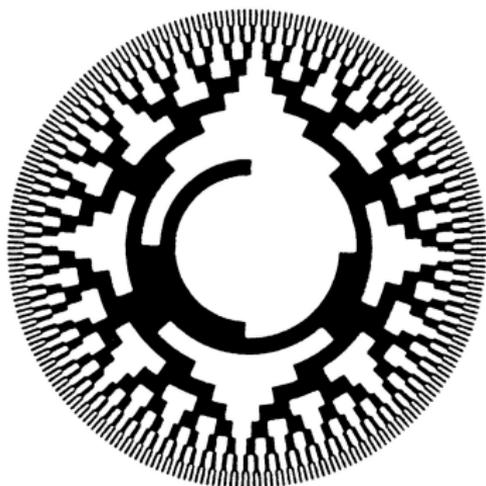
- ▶ Im Gegensatz zum Inkrementalgeber liefern **Winkelgeber** absolute Winkel
- ▶ Bei Winkelgebern werden binär kodierte Scheiben verwendet
- ▶ Mehrere Leuchtdioden und Empfänger tasten die Scheibe ab
- ▶ Jedem Winkel ist genau ein Binärkode zugeordnet
- ▶ Je nach Anzahl der Binärstellen lässt sich der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

Codescheibe für Winkelgeber



5Bit-Dualcode
32 Winkelwerte

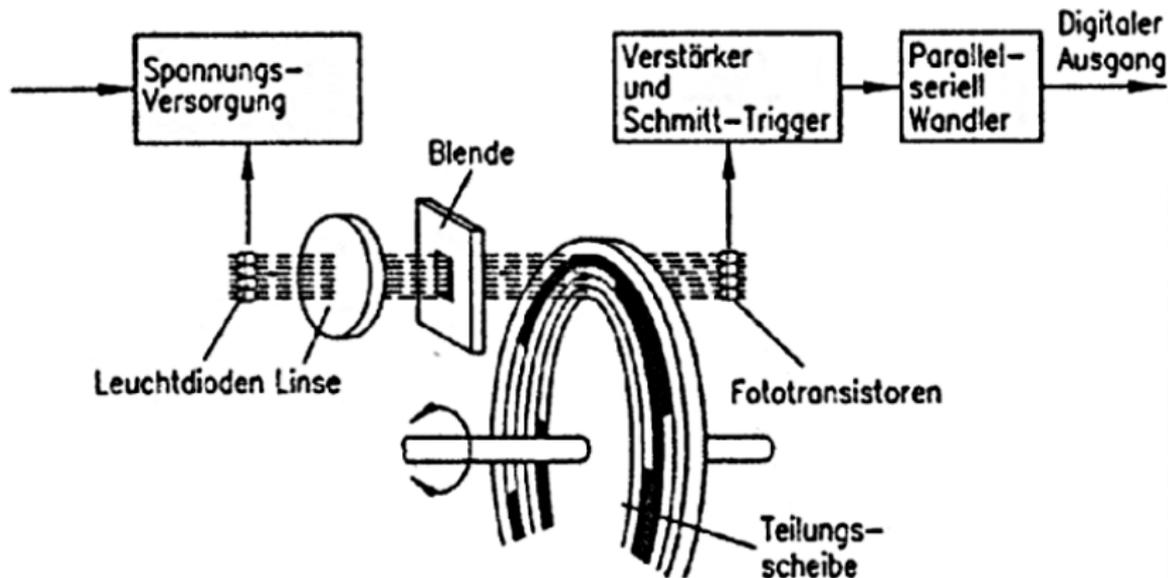
Codescheibe für Winkelgeber (cont.)



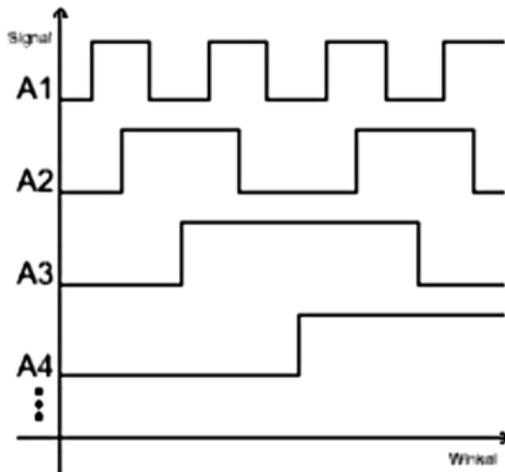
10Bit-Dualcode
1024 Winkelwerte



Funktionsprinzip eines Winkelgebers



Paralleles Ausgangssignal eines Winkelgebers





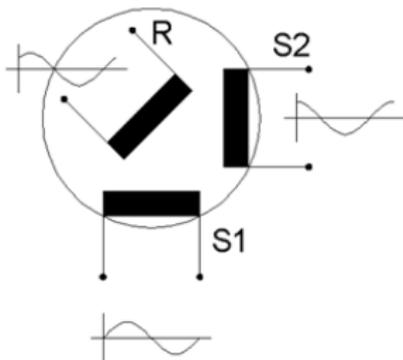
Anwendung von Winkelgebern

- ▶ Roboterarme
- ▶ Positioniersysteme



Resolver

- ▶ **Resolver** sind eine weitere Möglichkeit um absolute Winkel zu bestimmen, aber durch optische Encoder abgelöst
- ▶ Resolver entsprechen im konstruktiven Aufbau einer **2-strängigen Drehfeldmaschine**

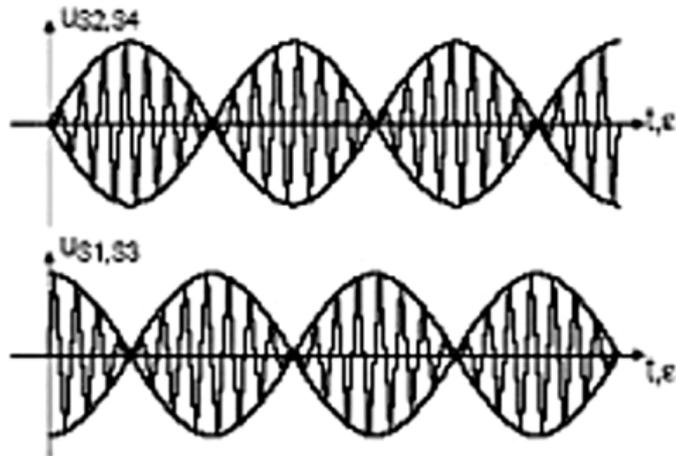
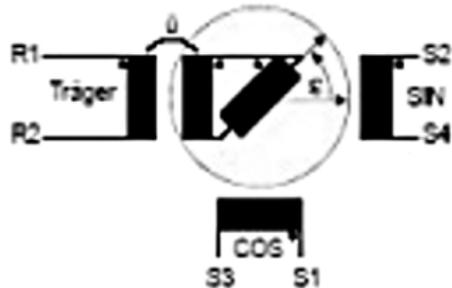




Resolver (cont.)

- ▶ Die Rotorwicklung des Resolvers wird meistens auf einer Motorwelle befestigt
- ▶ Die Rotorwicklung (Erregerwicklung) wird über Bürsten, Schleifringe oder einen rotierenden Transformator 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 φ_S auf

Ersatzschaltbild und Ausgangssignale





Spannungsverläufe

$$U_{R1,R2} = U_0 \cdot \sin(\omega t)$$

$$U_{S1,S3} = \ddot{u} \cdot U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_S) \cdot \cos(\epsilon)$$

$$U_{S2,S4} = \ddot{u} \cdot U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_S) \cdot \sin(\epsilon)$$

\ddot{u} ist das Übersetzungsverhältnis des Transformators



Resolver

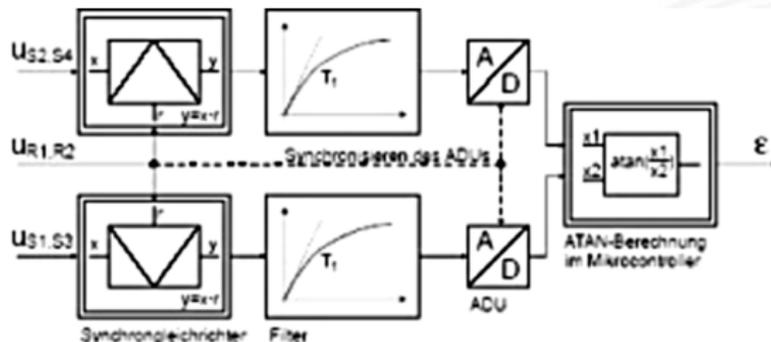
- ▶ Resolver für Servoantriebe verwenden hohe Speisefrequenzen im Bereich von 5 kHz bis 20 kHz
- ▶ Die Bestimmung des Drehwinkels aus den Resolverignalen erfolgt unter Anwendung einfacher trigonometrischer Beziehungen
- ▶ Die Winkellage ϵ errechnet sich aus den Amplituden α_1 und α_2 :

Winkellage

$$\epsilon = \arctan \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

Resolver (cont.)

- ▶ In Microcontrollern wird ein direkt abtastendes Verfahren angewandt



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



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



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



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 Selbst-Lokalisierung 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



Einfache Selbst-Lokalisierung 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



Einfache Selbst-Lokalisierung 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



Einfache Selbst-Lokalisierung 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



Einfache Selbst-Lokalisierung 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

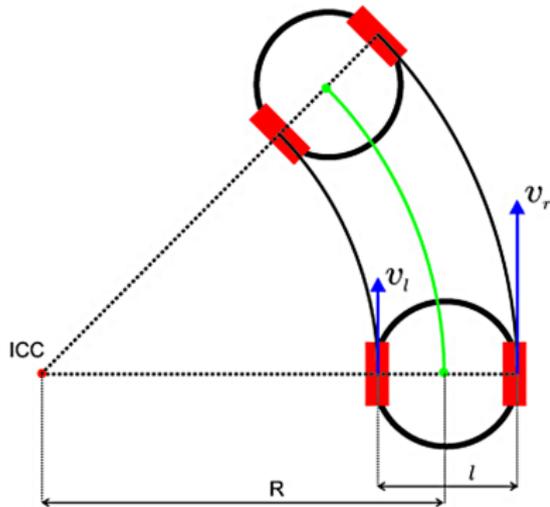


Koppelnavigation

- ▶ 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

Koppelnavigation (cont.)

- Sind die Geschwindigkeiten unterschiedlich fährt der Roboter auf einer Kreisbahn





Koppelnavigation (cont.)

- ▶ Der Roboter kann sich nur auf einer Kreisbahn um einen Punkt auf der gemeinsamen Achse der Räder bewegen
- ▶ Dieser Punkt wird als **instantaneous center of curvation (ICC)** bezeichnet
- ▶ Durch variierende Radgeschwindigkeiten kann die Position des ICC verändert werden
- ▶ Sei ω 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 (cont.)

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

Translationsgeschwindigkeit der Räder

$$\omega \cdot (R + l/2) = v_r$$

$$\omega \cdot (R - l/2) = v_l$$

- Sowohl v_l , v_r , ω als auch R sind zeitabhängige Funktionen



Koppelnavigation (cont.)

Zu jedem Zeitpunkt lassen sich R und ω wie folgt berechnen:

Winkelgeschwindigkeit und Radius

$$R = \frac{l}{2} \cdot \frac{v_l + v_r}{v_r - v_l}$$

$$\omega = \frac{v_r - v_l}{l}$$



Koppelnavigation (cont.)

$$v_l = v_r:$$

- ▶ 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



Vorwärtskinematik

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



Vorwärtskinematik (cont.)

Der ICC lässt sich wie folgt berechnen:

$$ICC = \begin{pmatrix} x - R \cdot \sin(\theta) \\ y + R \cdot \cos(\theta) \end{pmatrix}$$



Vorwärtskinematik (cont.)

Mit dem ICC kann die **pose** (x', y', θ') 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 δt konstant bleiben

- ▶ Die *pose* kann für jeden Zeitpunkt t ausgehend von einer Anfangssituation (x_0, y_0, θ_0) zum Zeitpunkt $t = 0$ bestimmt werden



Vorwärtskinematik (cont.)

- ▶ Dazu wird die vorrangegangene Gleichung integriert
- ▶ Es müssen die Radgeschwindigkeiten $v_l(t)$ und $v_r(t)$ bekannt sein

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

$$x(t) = \frac{1}{2} \int_0^t [v_r(t) + v_l(t)] \cos [\theta(t)] dt$$

$$y(t) = \frac{1}{2} \int_0^t [v_r(t) + v_l(t)] \sin [\theta(t)] dt$$

$$\theta(t) = \frac{1}{l} \int_0^t [v_r(t) - v_l(t)] dt$$



Vorwärtskinematik (cont.)

- ▶ In der Praxis werden die Rotationsgeschwindigkeit ω_l und ω_r der Räder gemessen
- ▶ Dazu dienen die Inkrementalgeber
- ▶ Die Rotationsgeschwindigkeiten werden in konstanten Zeitabständen Δt gemessen
- ▶ Dadurch wird aus obigen Integralen eine Summe
- ▶ Es wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeiten während Δt konstant bleiben
- ▶ **Problem:** Die bei den Messungen gemachten Fehler summieren sich im Laufe einer Fahrt immer weiter auf!



Odometrie

- ▶ Das Verfahren die **pose** eines Roboters aus den Radgeschwindigkeiten zu berechnen wird auch als **Odometrie** bezeichnet
- ▶ Besonders die Fehler in der Orientierung erhöhen die Abweichung der geschätzten von der wahren **pose**
- ▶ Trotzdem wird die Odometrie in allen gängigen mobilen Robotersystemen eingesetzt:
 - ▶ Odometrie wird kombiniert mit absoluten **pose**-Messungen
 - ▶ Bei Verwendung von Landmarken zur absoluten **pose**-Bestimmung kann durch eine präzise Odometrie die Anzahl der Landmarken verringert werden
 - ▶ Manchmal ist Odometrie das einzige verfügbare Messsystem



Ursachen für die Abweichungen

- ▶ Systematische Abweichungen
 - ▶ Unterschiedliche Raddurchmesser
 - ▶ Wahrer Raddurchmesser weicht von angenommenem Durchmesser ab
 - ▶ Wahrer Radabstand weicht von angenommenem Abstand ab
 - ▶ Räder sind nicht auf einer Achse
 - ▶ Endliche Auflösung der Encoder
 - ▶ Endliche Abtastrate der Encoder



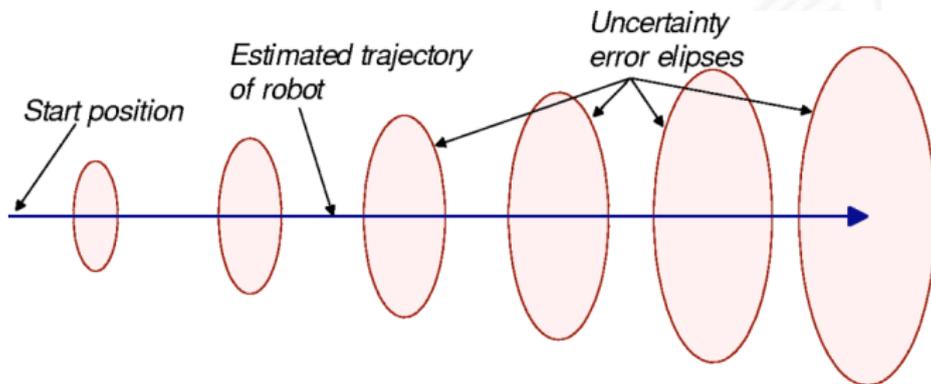
Ursachen für die Abweichungen (cont.)

- ▶ Zufällige Abweichungen
 - ▶ Unebener Untergrund
 - ▶ Unerwartete Objekte auf dem Untergrund
 - ▶ Durchdrehende Räder
 - ▶ rutschiger Boden
 - ▶ übermäßige Beschleunigung
 - ▶ schnelles Drehen (engl. *skidding*)
 - ▶ externe Kräfte
 - ▶ interne Kräfte (Schlingerräder)
 - ▶ Räder haben keinen dedizierten Kontaktpunkt zum Boden



Fehlerfortpflanzung

- ▶ Es gibt Verfahren um die Abweichung abzuschätzen
- ▶ Dabei wird nur die systematische Abweichung berücksichtigt, da die zufällige Abweichung unbeschränkt ist





Messung der Odometrie-Abweichung

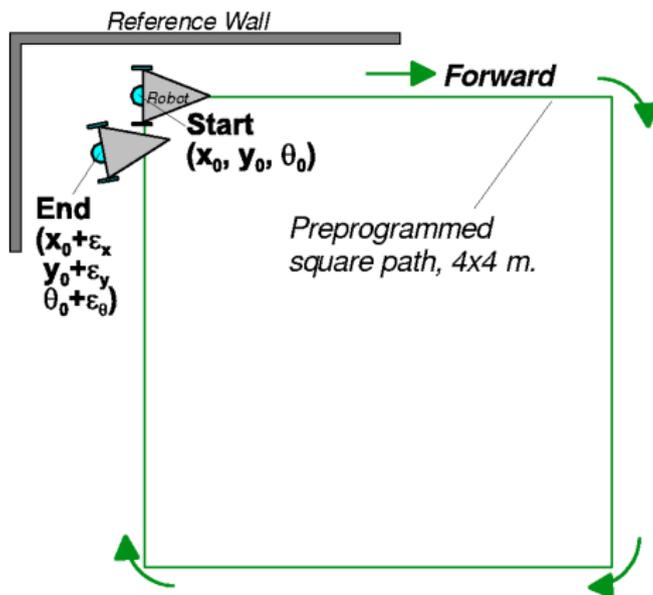
- ▶ Fehler durch ungleiche Raddurchmesser:

$$E_d = D_r/D_l$$

- ▶ Fehler durch die Unsicherheit über den Radabstand

$$E_b = b_{\text{actual}}/b_{\text{nominal}}$$

„Square Path“-Experiment





„Square Path“-Experiment (cont.)

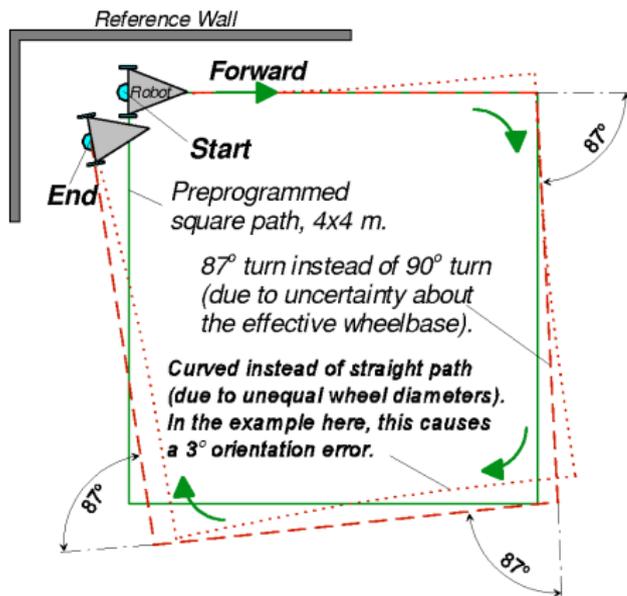
- ▶ Fehlerwerte: x , y , θ

$$\epsilon_x = x_{\text{abs}} - x_{\text{calc}}$$

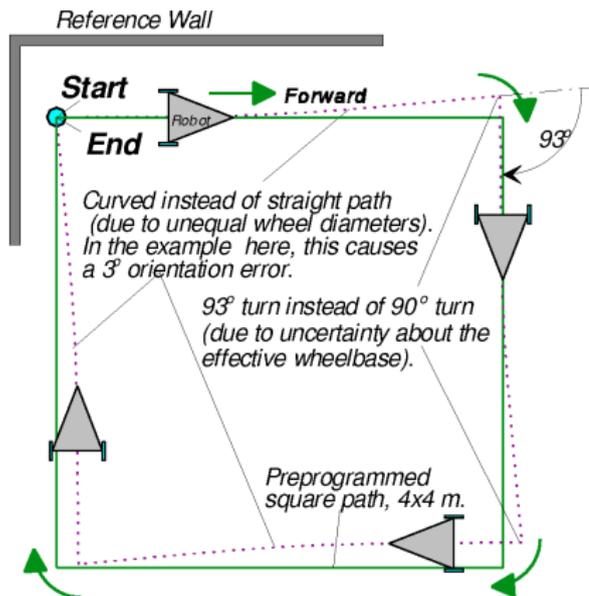
$$\epsilon_y = y_{\text{abs}} - y_{\text{calc}}$$

$$\epsilon_\theta = \theta_{\text{abs}} - \theta_{\text{calc}}$$

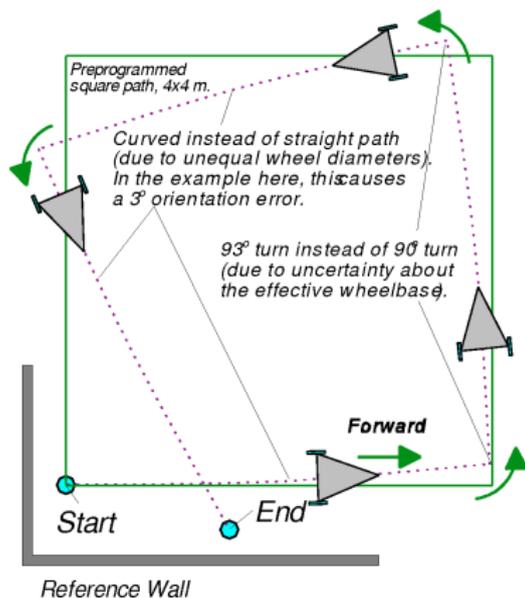
Unidirektionales „Square Path“-Experiment



Unidirektionales „Square Path“-Experiment (cont.)

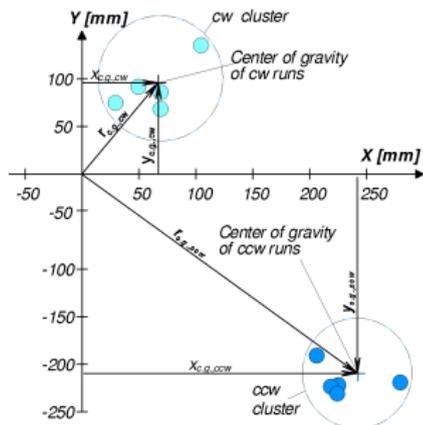


Unidirektionales „Square Path“-Experiment (cont.)



Bidirectionales „Square Path“-Experiment (UMBmark)

- ▶ Das Viereck wird mehrmals gegen und im Uhrzeigersinn umfahren
- ▶ Typischerweise clustern die Endpunkte:



Bidirectionales „Square Path“-Experiment (UMBmark) (cont.)

- Die Zentren der Cluster werden wie folgt berechnet:

$$x_{c.g.,cw/ccw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_{x_{i,cw/ccw}}$$

$$y_{c.g.,cw/ccw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_{y_{i,cw/ccw}}$$

Bidirectionales „Square Path“-Experiment (UMBmark) (cont.)

- ▶ Die absolute Abweichung der Zentren errechnet sich mit:

$$r_{c.g.,cw} = \sqrt{(x_{c.g.,cw})^2 + (y_{c.g.,cw})^2}$$

$$r_{c.g.,ccw} = \sqrt{(x_{c.g.,ccw})^2 + (y_{c.g.,ccw})^2}$$

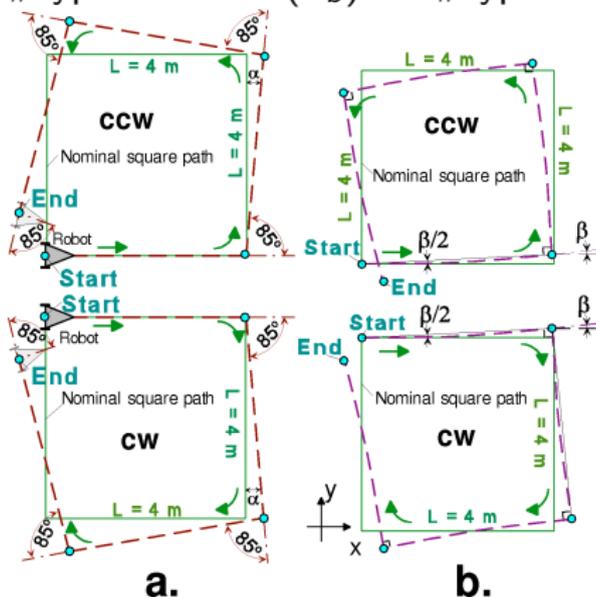
- ▶ Der größere der beiden Werte ist ein **Maß für die Genauigkeit der Odometry**
- ▶ Es wird nicht der Durchschnitt der Cluster gewählt, da in der Praxis die größte Abweichung wichtig ist
- ▶ Die Orientierung wird nicht berücksichtigt, da Orientierungsfehler direkt zu Positionsabweichungen führen

Vermindern der Odometrie-Abweichung

- ▶ Roboter mit einem schmalen Radstand sind anfällig für Orientierungsfehler
- ▶ Schlingerräder können ein Durchdrehen der Antriebsräder verursachen (abhängig von der Gewichtsbelastung der Schlingerräder)
- ▶ Die Kontaktfläche zum Boden verringern
- ▶ Qualität abhängig von der Kinematik (Differential-Antrieb, Synchro-Drive, etc.)
- ▶ Einsatz von zusätzlichen, nicht angetriebenen „Encoder-Rädern“
- ▶ Kalibrierung der Odometrie

Kalibrierung der Odometrie

- ▶ „Typ A“-Fehler (E_b) vs. „Typ B“-Fehler (E_d)





Kalibrierung der Odometrie (cont.)

▶ Annahme:

- ▶ E_d und E_b sind die dominanten Fehlerquellen-
- ▶ Ein falscher Radabstand (E_b) verursacht Fehler nur während der Drehung
- ▶ Nicht gleiche Raddurchmesser (E_d) verursachen Fehler nur während der geraden Fahrt
- ▶ E_b verursacht nur „Typ A“-Fehler
- ▶ E_d verursacht nur „Typ B“-Fehler



Kalibrierung der Odometrie (cont.)

- ▶ „**Typ A**“-Fehler: α ist die Abweichung von der 90° Drehung:

$$\alpha = \frac{x_{c.g.,cw} + x_{c.g.,ccw}}{-4L} \frac{180^\circ}{\pi}$$

- ▶ „**Typ B**“-Fehler: β ist die inkrementell gewachsene Abweichung der Orientierung am Ende jeder Geraden:

$$\beta = \frac{x_{c.g.,cw} - x_{c.g.,ccw}}{-4L} \frac{180^\circ}{\pi}$$



Kalibrierung der Odometrie (cont.)

- ▶ Damit kann der Radius der kurvigen Fahrt ermittelt werden:

$$R = \frac{L/2}{\sin \beta/2}$$

- ▶ Über diesen Radius lässt sich Verhältnis der Raddurchmesser bestimmen:

$$E_d = \frac{D_R}{D_L} = \frac{R + b/2}{R - b/2}$$



Kalibrierung der Odometrie (cont.)

- ▶ Da der Radstand b direkt proportional zur Umdrehung ist, gilt folgende Gleichung:

$$\frac{b_{\text{actual}}}{90^\circ} = \frac{b_{\text{nominal}}}{90^\circ - \alpha} \quad \Rightarrow \quad b_{\text{actual}} = \frac{90^\circ}{90^\circ - \alpha} b_{\text{nominal}}$$

- ▶ Daraus folgt:

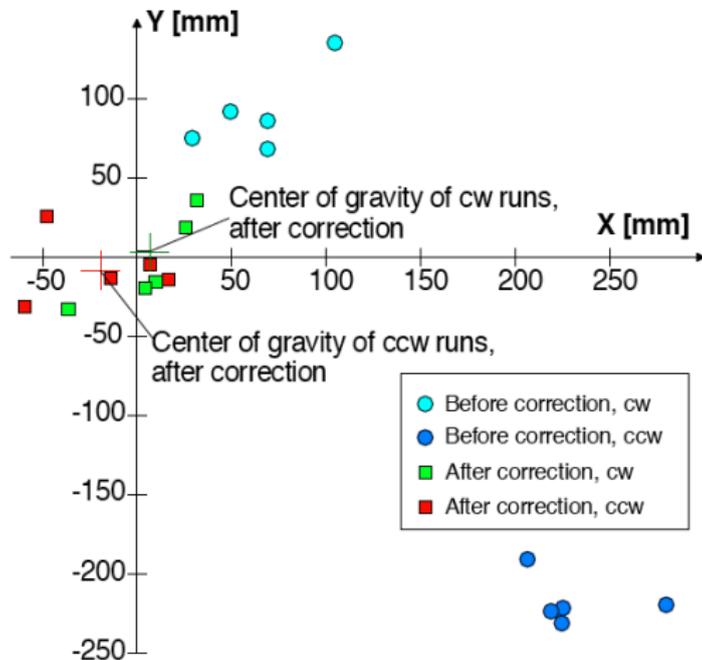
$$E_b = \frac{90^\circ}{90^\circ - \alpha}$$



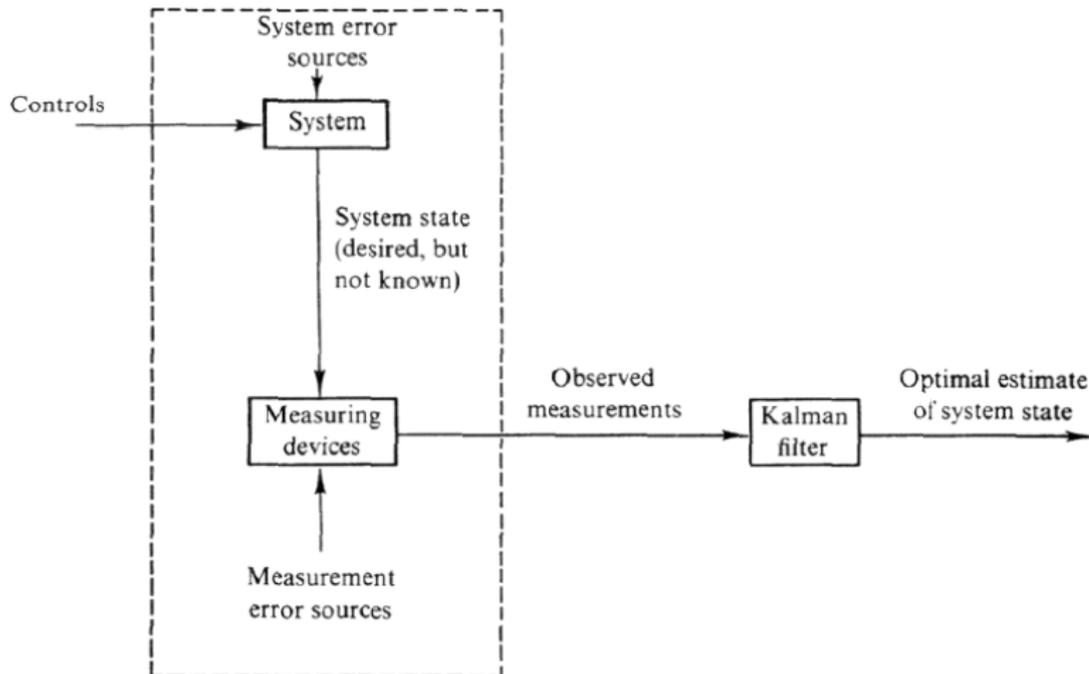
Kalibrierung der Odometrie (cont.)

- ▶ E_d und E_b können in der Steuersoftware als Kompensationsfaktoren eingesetzt werden
- ▶ Das Verfahren führt zu eine Reduktion des systematischen Fehlers um etwa das 10fache

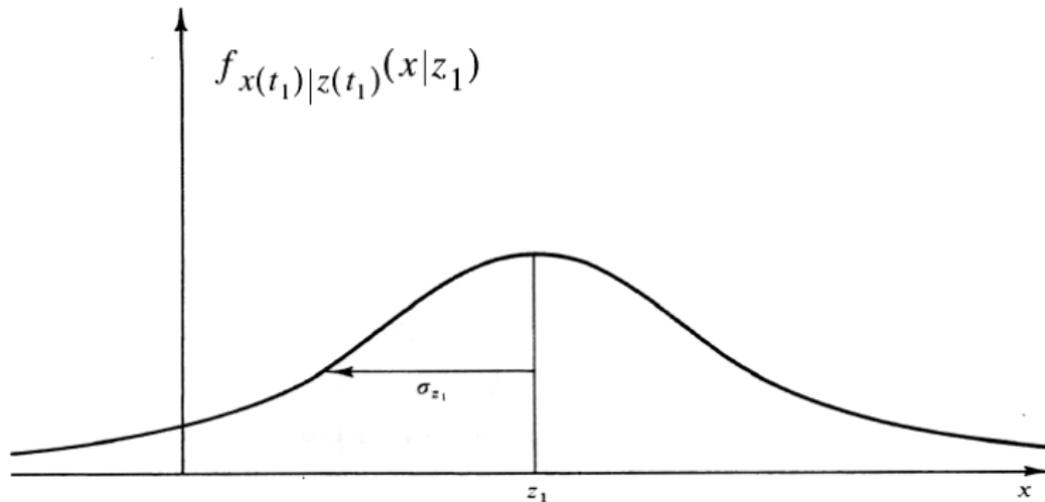
Odometrie nach UMBmark



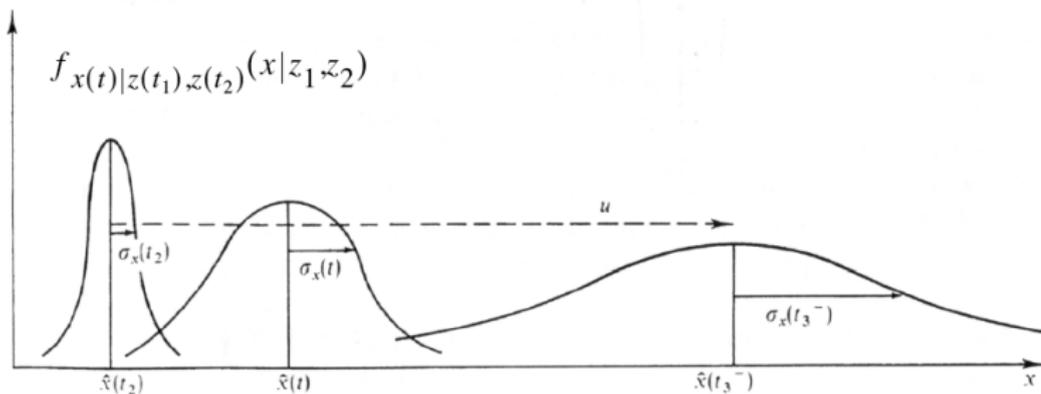
Typische Kalman-Filter-Anwendung



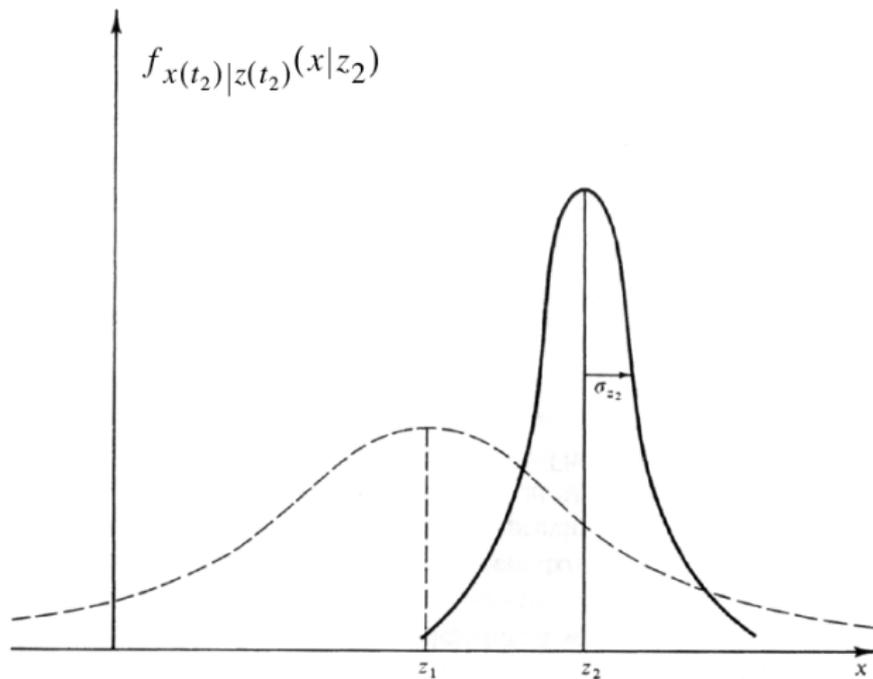
Ausgangspunkt: Positionsschätzung nach Messung



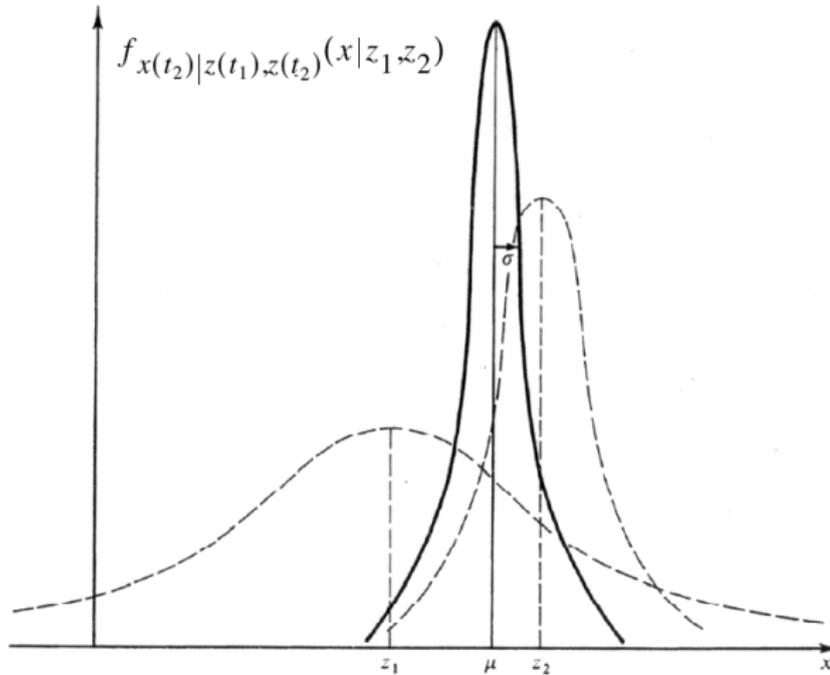
Veränderung der Varianz bei Vorhersage der nächsten Position



Eine neue Messung



Kalman-Filter-Update





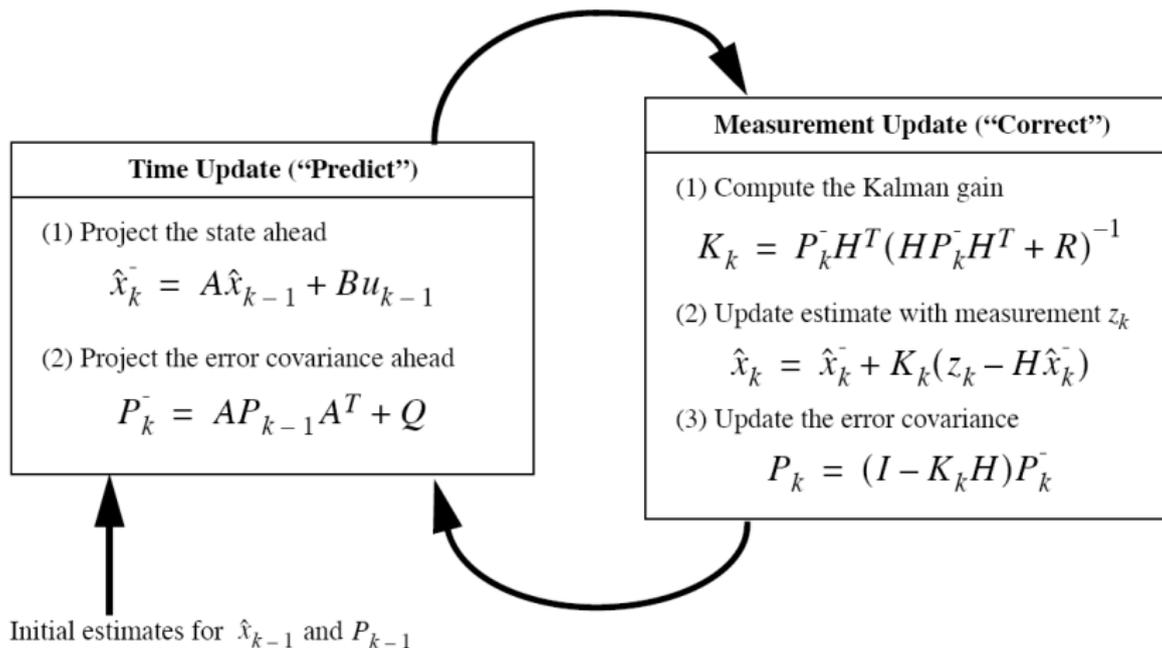
Vorschau: Kalman-Filter

Genauerer folgt später im Abschnitt zur **Zustandsschätzung**,
speziell der Selbst-Lokalisierung.

Links

- ▶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Kalman-Filter>
- ▶ <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman>

Vorschau: Kalman-Filter (cont.)





- [BEF96] Kap. 1.1, 1.3.1 and 5 In: Johann Borenstein, H.R. Everett, Liqiang Feng:
Where am I? - Systems and Methods for Mobile Robot Positioning.
University of Michigan, April 1996. –
URL www.umich.edu/~johannb/
- [BF96] Johann Borenstein, Liqiang Feng:
Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots.
In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation*
12 (1996), December, Nr. 6, S. 869–880



[Fra04] Kap. 7.5 In: Jacob Fraden:

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

3.

Springer-Verlag New York, Inc., 2004, S. 281–283

[May79] Kap. 1 In: Peter S. Maybeck:

Stochastic models, estimation, and control (Volume 1).

Academic Press, 1979



Tachometer

- ▶ **Tachometer** \leftrightarrow Geschwindigkeitsmesser
- ▶ Genaue Tachometer mit Hilfe von Inkrementalgebern oder Resolvern
- ▶ Gemessene Winkeländerung wird durch vergangene Zeit geteilt
- ▶ Günstigere Alternativen zählen Umdrehungen eines Rades (z.B. Fahrradcomputer)



Tachometer

- ▶ **Tachometer** \leftrightarrow Geschwindigkeitsmesser
- ▶ Genaue Tachometer mit Hilfe von Inkrementalgebern oder Resolvern
- ▶ Gemessene Winkeländerung wird durch vergangene Zeit geteilt
- ▶ Günstigere Alternativen zählen Umdrehungen eines Rades (z.B. Fahrradcomputer)



Tachometer

- ▶ **Tachometer** \leftrightarrow Geschwindigkeitsmesser
- ▶ Genaue Tachometer mit Hilfe von Inkrementalgebern oder Resolvern
- ▶ Gemessene Winkeländerung wird durch vergangene Zeit geteilt
- ▶ Günstigere Alternativen zählen Umdrehungen eines Rades (z.B. Fahrradcomputer)



Tachometer

- ▶ **Tachometer** \leftrightarrow Geschwindigkeitsmesser
- ▶ Genaue Tachometer mit Hilfe von Inkrementalgebern oder Resolvern
- ▶ Gemessene Winkeländerung wird durch vergangene Zeit geteilt
- ▶ Günstigere Alternativen zählen Umdrehungen eines Rades (z.B. Fahrradcomputer)



Gyroskope (Kreisel)

- ▶ Ein **Gyroskope** ist eine Art Richtungsgeber (kurz: **Gyro**)
- ▶ Alternative zu magnetischem Kompass
- ▶ Der am häufigsten verwendete Sensor in der Navigation
- ▶ Anwendung vor allem im Weltraum
(Kontrolle der Position und Orientierung von Satelliten oder Raumstationen)
- ▶ Drei Typen von Gyroskopen:
 - ▶ mechanisch
 - ▶ monolithisch Silizium / MEMS (Micro-Electro-Mechanical System)
 - ▶ optisch

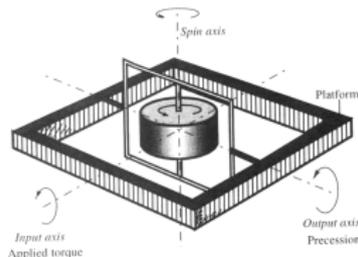


Mechanisches Gyroskope

- ▶ Massive Scheibe rotiert um eine Drehachse
- ▶ Drehachse befindet sich in einem Rahmen
- ▶ Dieser kann um ein (oder zwei) Achsen rotieren



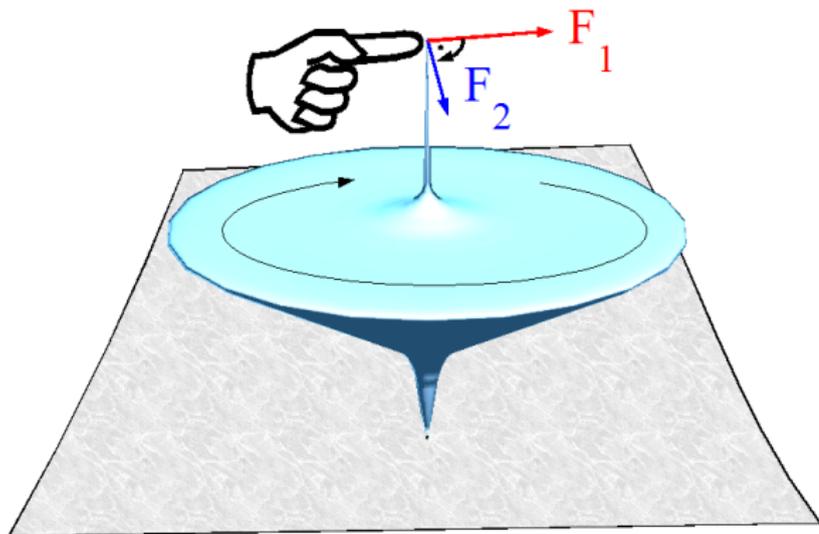
Mechanisches Gyroskope (cont.)



Zwei Eigenschaften:

1. Drehachse eines Gyroskopes bleibt fix mit Bezug auf ein globales Koordinatensystem
2. Ein Gyroskope liefert ein Drehmoment proportional zur Winkelgeschwindigkeit einer Rotation um eine Achse senkrecht zur Drehachse (Grund: **Präzession**)

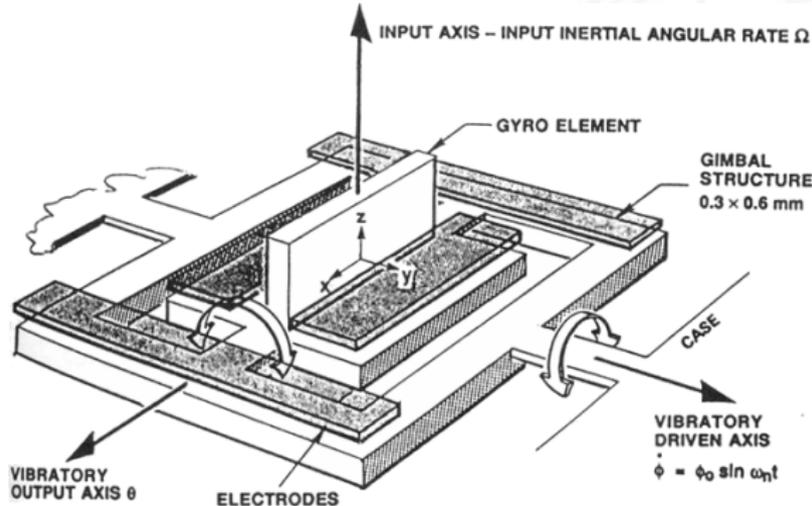
Präzession



Video: *praezession.mov*

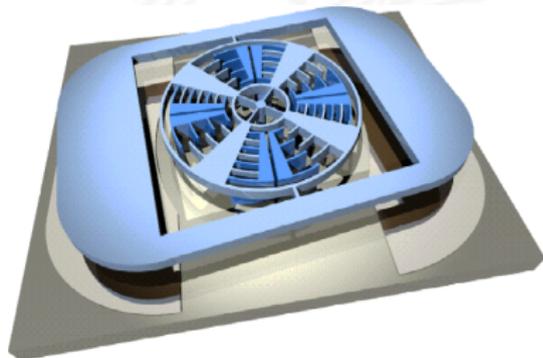
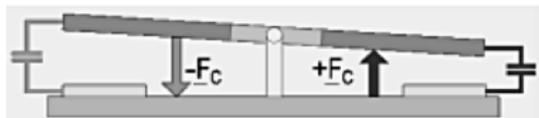
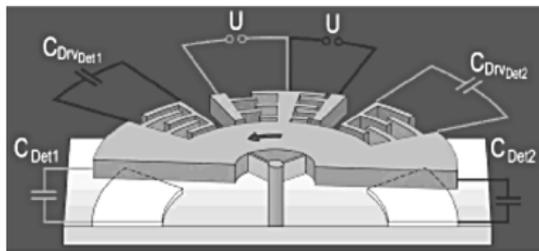
Monolithische Silizium Gyroskope

- ▶ Mikromechanischer Aufbau in Silizium
- ▶ Oberflächen- oder Bulk-Mikromechanik
- ▶ unterschiedliche Realisierungsformen

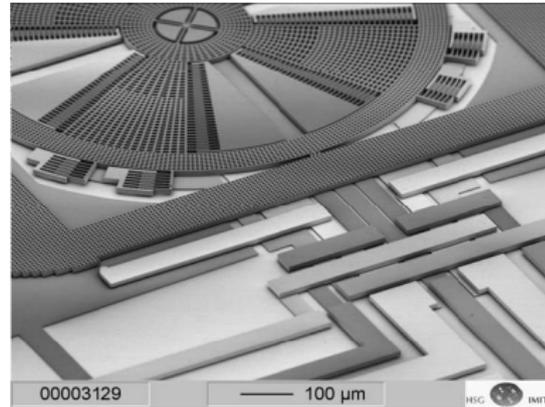
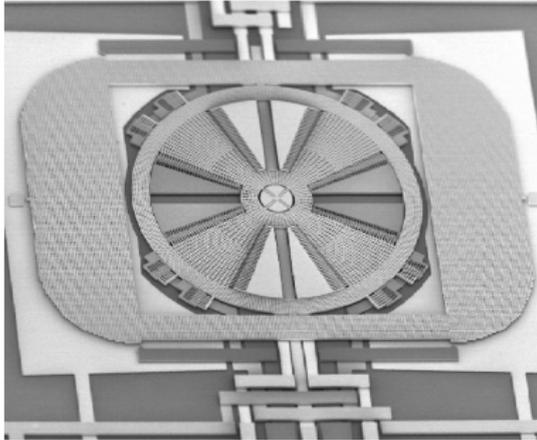


Monolithische Silizium Gyroskope (cont.)

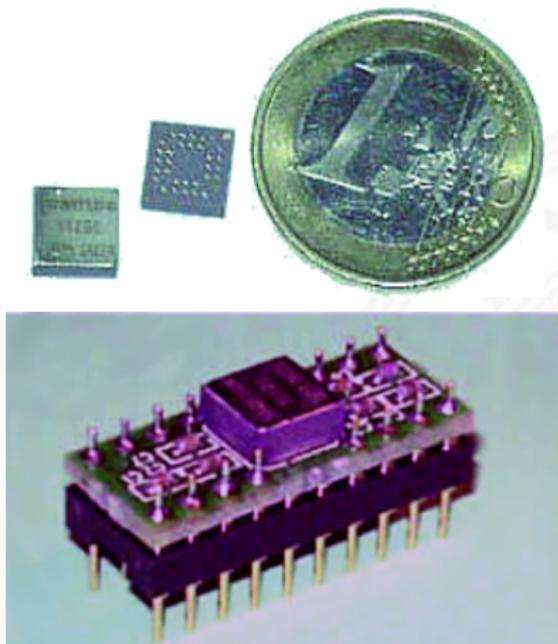
- ▶ schwingende Struktur
- ▶ Sekundärschwingung durch äußere Drehbewegung
- ▶ kapazitive Auswertung



Monolithische Silizium Gyroskope (cont.)



Monolithische Silizium Gyroskope (cont.)





Optisches Gyroscope

- ▶ Zwei gegenläufige Lichtstrahlen werden von einem Sender/Empfänger in einen Fiberglas-Ring ausgestrahlt
- ▶ Laufzeit einer Umdrehung:

$$\Delta t = \frac{2\pi R}{nc}$$

n : Brechungskoeffizient

c : Lichtgeschwindigkeit



Optisches Gyroscope (cont.)

Wenn der Ring mit der Winkelgeschwindigkeit Ω rotiert, gilt (Sagnac Effekt):

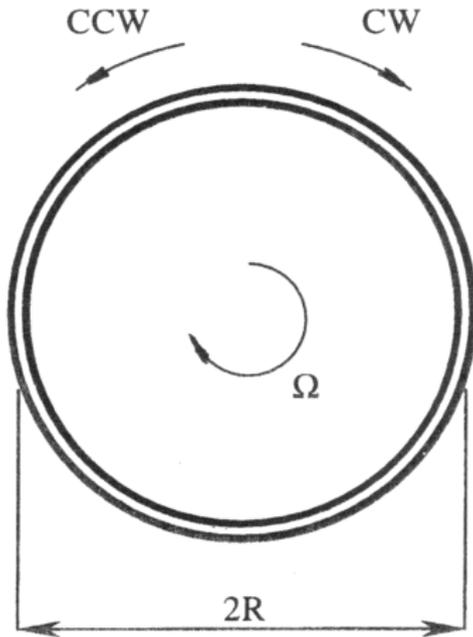
$$l_{cw} = 2\pi R + \Omega R \Delta t$$

$$l_{ccw} = 2\pi R - \Omega R \Delta t$$

Daraus folgt:

$$\Delta l = \frac{4\pi\Omega R^2}{nc}$$

Optisches Gyroscope (cont.)



Optisches Gyroscope (cont.)

