

# Kognitive Robotik

HK WS 05/06

## Wahrnehmung (und Sensoren)

Hans-Dieter Burkhard  
Humboldt-Universität Berlin  
Institut für Informatik

Mit Dank

■ an Teilnehmer Proseminar  
WS02/03, speziell

Michael Hempel

Henryk Plötz

Hagen Strauss

an Mitarbeiter aus HU:

Jan Hoffmann

Joscha Bach

## Wahrnehmung

Diverse philosophische Definitionen:

*Perception is effortless and obvious*

*Means by which we become aware of the world  
and ourselves in the world*

*Experience is a result of world and selves*

*Despite ease, complex processes involved*

Psychophysischer Prozess, in dessen Verlauf ein Organismus aufgrund von äußereren und inneren Reizen eine anschauliche Repräsentation der Umwelt und des eigenen Körpers erarbeitet.

(Der Brockhaus multimedial, F. A. Brockhaus AG, 2001)

# Wahrnehmung

Der außer durch Empfindungen auch durch Gedächtnisinhalte, Interessen, Gefühle, Stimmungen, Erwartungen u.a. mitbestimmte physiopsychologische Prozeß der Gewinnung und Verarbeitung von Informationen aus äußereren und inneren Reizen; die auf - meist bewussten - Auffassen und Erkennen von Gegenständen und Vorgängen ruhende Wahrnehmung ermöglicht dem Individuum ein an seine Umwelt angepasstes Verhalten.

(Meyers Taschenlexikon, Meyers Lexikonredaktion, 1992)

Auf Maschinen übertragener Begriff:  
Wahrnehmung = Prozess der Signalverarbeitung zur  
Erstellung einer Repräsentation der Umwelt

# Wahrnehmung

„Rekonstruktion“ der Welt mit Hilfe von

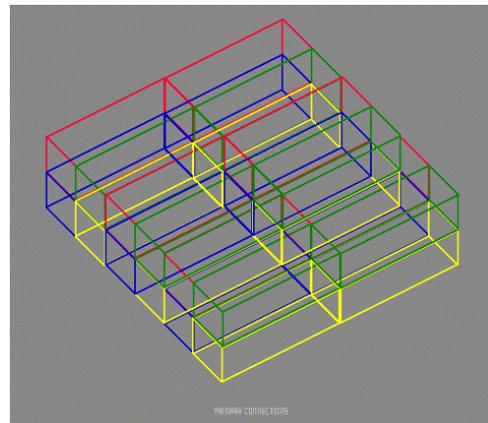
- Wissen über die Umwelt
- unvollständigen Sensordaten
- unzuverlässigen (verrauschten) Sensordaten
- unvollständigen Modellen

mit vernünftigem Aufwand

- bezüglich interessierender Fakten
- bezüglich Nutzen

## „Rekonstruktion“ der Welt

Wieviele Quader sind zu sehen?



## „Rekonstruktion“ der Welt

3D aus 2D



# Wahrnehmung

Beispiele:

- Navigation in bekannten Umgebungen
- Kartierung unbekannter Umgebungen

Wahrnehmung bezieht sich auf:

Zustände/Prozesse in der Umwelt

Eigenschaften/Veränderungen in der Umwelt

Dafür

„Signale/Reize“ messen mit Sensoren/Rezeptoren

Sensordaten aufbereiten und auswerten:

- Signalumwandlung in verarbeitbare Signale
- Interpretation als Information über die Umwelt

H.D.Burkhard, HU Berlin  
Winter-Semester 2005/06

Grundlage für Interpretation:  
Wissen über die Welt

7

# Wahrnehmung

Ziele:

Handlungen auswählen

- Kurzfristig: Sensor-Aktor-Kopplung für unmittelbare Reaktion („stimulus-response“)
- „Verhaltensweisen“ (vgl. auch Behaviorismus)
- Langfristig: Grundlage für Zielgerichtetes Handeln

Erfolg von Aktionen überwachen

Wissen über die Welt ausbauen (Lernen)

Wahrnehmung ist wesentlicher Bestandteil im  
„sense-think-act“-Zyklus

## Kombination von Informationen

Wahrnehmungen entstehen durch Kombination von

Informationen aus verschiedenen Sensoren

parallel empfangener Informationen

- z.B. eines Bildes

sequentiell empfangener Informationen

- z.B. einer Bewegung, eines gesprochenen Satzes

Wissen

## Signale/Reize

Vermitteln auf Grund ihrer Entstehung Informationen über die Umwelt

Werden über Sensoren/Rezeptoren aufgenommen

Können über Messgeräte quantifiziert werden

Müssen verarbeitet (interpretiert werden)

Können in direkter Kopplung mit Aktuatoren Handlungen auslösen

## Signale/Reize

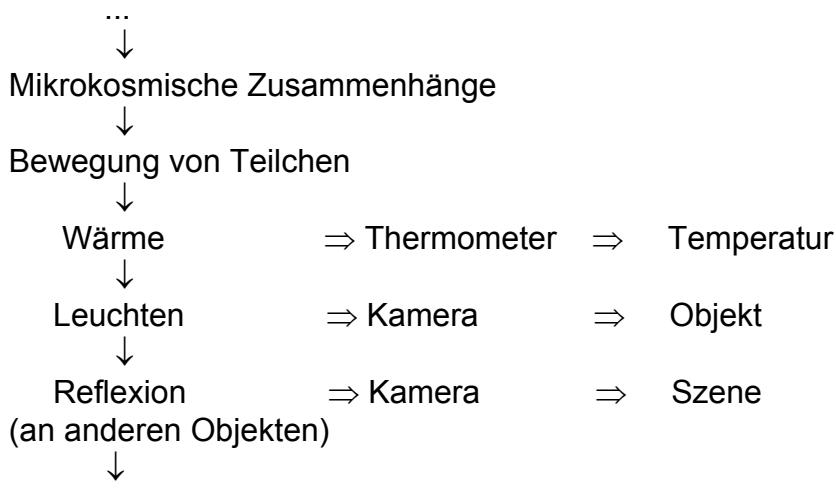
Oft interessiert nicht das Signal selbst, auch nicht seine unmittelbare Ursache, sondern die „Botschaft“

- Nicht Schallquelle sondern Ort der Entstehung
- Nicht Lichtreflexion, sondern Ort des reflektierenden Körpers

Meist interessiert der „Zustand der Welt“ und benötigt werden geeignete Signale/Sensoren für seine Bestimmung bzw. Messung, insbesondere auch für

- Raum und räumliche Beziehungen
- Zeit und zeitliche Abläufe

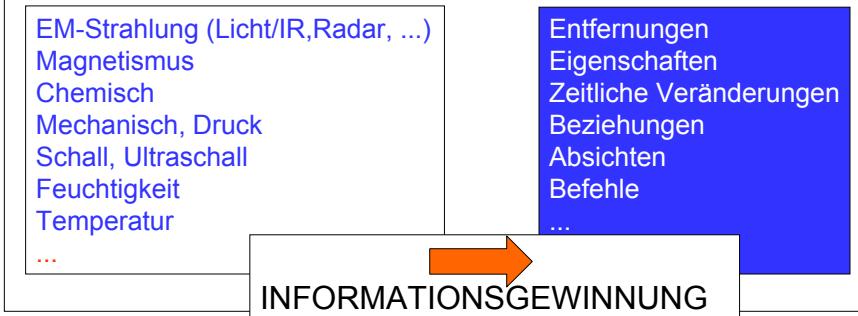
## Signale: Ursachen, Erfassung, Information



# Sensoren

## Charakteristische Signale der Außen-/Innenwelt

- empfangen
- messen, in interne (elektrische) Signal umwandeln
- (interessenbedingt) interpretieren



# Sensorische Fähigkeiten des Menschen

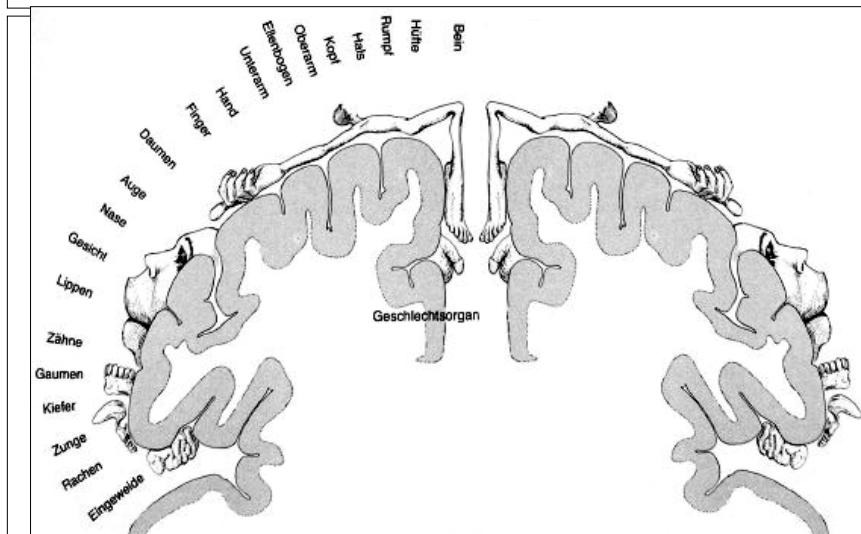
## Fünf (?) Sinne, Empfindungen

- Sehen
- Hören
- Riechen
- Schmecken
- Tasten
- Wärme
- Feuchtigkeit
- Schmerz
- Gleichgewicht
- Muskelspannung
- Hunger
- Durst
- ...

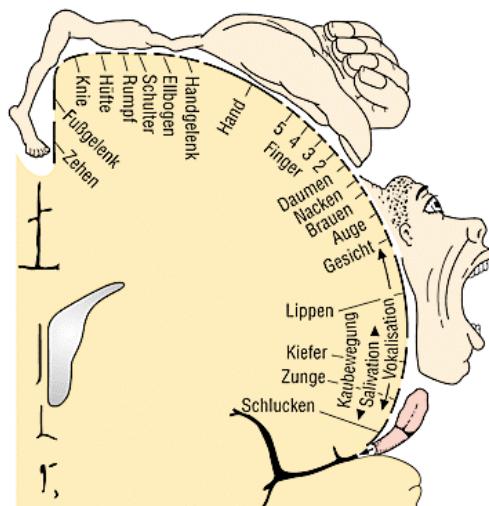
Auch aktives Erkunden:  
Provokieren von Signalen  
(Taschenlampe)

Erfassen sozialer  
Zusammenhänge

## Sensorischer Homunkulus



## Motorischer Homunkulus



## Sensorische Fähigkeiten des Menschen

Erweiterte Fähigkeiten über Messgeräte:  
Signale erfassen und in „ablesbare Form“  
umwandeln (Transformation von Signalen)

- Thermometer
- Tachometer
- Radarfalle
- ...

Skalierung auch für direkt erfassbare Signale

## Sensorische Fähigkeiten von Maschinen

Alles was messbar ist:

Druck, Temperatur, Magnetismus, Strömung, chemische  
Zusammensetzung, Gewicht, Spannung, Kapazität, Widerstand,  
Licht, Feuchtigkeit, Strahlung, Wellen, ...

Signalumwandlung

für rechentechnische Verarbeitung:

- Umformung in elektrische Signale
- Einwirkung auf elektrisch messbare Signale provozieren
- Veränderung ausgesandter Signale
- ...

light sensors: photocells, photodiodes, phototransistors, photo-electric tubes, CCDs, Nichols radiometer  
sound sensors: microphones, hydrophones, seismic sensors.  
temperature sensors: thermometers, thermocouples, temperature sensitive resistors (thermistors), bi-metal thermometers and thermostats  
heat sensors: bolometer, calorimeter  
radiation sensors: Geiger counter, dosimeter  
subatomic particle sensors: scintillometer, cloud chamber, bubble chamber  
electrical resistance sensors: ohmmeter, multimeter  
electrical current sensors: galvanometer, ammeter  
electrical voltage sensors: leaf electroscope, voltmeter  
electrical power sensors: watt hour meters  
magnetism sensors: magnetic compass, flux gate compass, magnetometer  
pressure sensors: barometer, barograph, pressure gauge, air speed indicator, rate of climb indicator, variometer  
gas/liquid flow sensors: anemometer, flow meter, gas meter, water meter  
motion sensors: radar gun, speedometer, tachometer, odometer  
orientation sensors: ring laser gyroscope  
mechanical sensors: position sensor, selsyn, switch, strain gauge  
proximity sensor- A type of distance sensor but less sophisticated.  
distance sensor- A combination of a photocell and laser LED.  
whisker sensor- A type of touch sensor and proximity sensor.

## Sensoren

### Interne Sensoren (Propriozeptive Sensoren)

- Ladezustand
- innere Temperatur
- Gelenk-/Radstellungen
- ....

### Externe Sensoren

- Farbe, Helligkeit
- äußere Temperatur
- äußerer Druck
- ....

# Sensoren

## Passive Sensoren:

- Daten aufnehmen (sehen, riechen, ...)
  - energiesparend
  - ohne Einfluss auf Umgebung

## Aktive Sensoren:

- Signale aussenden, Reaktion messen  
(Licht, Schall, Röntgen, ...)
- Durchdringen vs. Reflexion (Echo)
  - robust
  - gezielt einsetzbar

# Weitere Sensor-Eigenschaften

- Geschwindigkeit (Mess-Dauer, Verfügbarkeit)
- Zuverlässigkeit/Genauigkeit
  - durchschnittliche bzw. maximale Abweichung
  - fehlende Messungen
- Robustheit bzgl. Störeinflüssen (Einsatzbereich)
- Kosten/Aufwand für Gerät und Installation
- Kosten/Aufwand für Messung
- Gewicht, Größe, Energiebedarf
- Einzelsensor vs. Sensorfeld
- Absolute vs. relative Messung (Zustand vs. Änderung)
- Direkter Kontakt vs. ohne Kontakt
- Skala (binär, diskret, kontinuierlich. Bereich)

# Sensor-Aktor-Kopplung

Aus Sicht der Sensoren:

Vom Sensor erzeugtes Signal steuert unmittelbar die Aktorik (evtl. über direkte physikalische Zusammenhänge außerhalb der Elektronik)

- Thermostat
- Airbag-Auslösung
- Braitenberg-Vehikel
- „Not-Aus“-Vorrichtungen
- ...

„Reflexe“: Stimulus-Response

Rückkopplung:

Direkte Einwirkung auf Verhalten (Regelkreis)

# Kommunikation

Sender (Aktorik):

- Erzeugen von Signalen mit dem Ziel eine Zustandsänderung beim Empfänger zu bewirken (Botschaft überbringen/Handlung hervorrufen)

Empfänger (Sensorik, Wahrnehmung):

- Interpretation empfangener Signale mit dem Ziel die Absicht des Senders zu verstehen

## Wahrnehmungsprozess

Wie gelingt es, einen Tisch aus unterschiedlicher Perspektive zu erkennen?

Wie gelingt es den Tische wahrzunehmen, obwohl er kaum zu sehen ist?



Wie machen das natürliche Intelligenzen?

Wie kann man das auf einer Maschine realisieren?

## Wahrnehmungsprozess

Aufnahme von Signalen mit verschiedenen Sensoren

Vorverarbeitungsschritte:

- Umformung
- Verstärkung/Selektion

Identifikation relevanter/interessanter Information

Integration von Informationen

Interpretation

## Wahrnehmungsprozess

Die einzelnen Informationen sind

- unzuverlässig
- unvollständig

Ihre Integration zu Wahrnehmungen erfordert

- Auswahl
- Ergänzung
- Veränderung

Sinnestäuschungen (speziell optische Täuschungen)  
weisen darauf hin

## Integration zu Wahrnehmungen

Erfassen räumlicher Beziehungen

Verdeckung

Bewegung

Licht/Schatten

Absolute Größe (Größe im Bild)

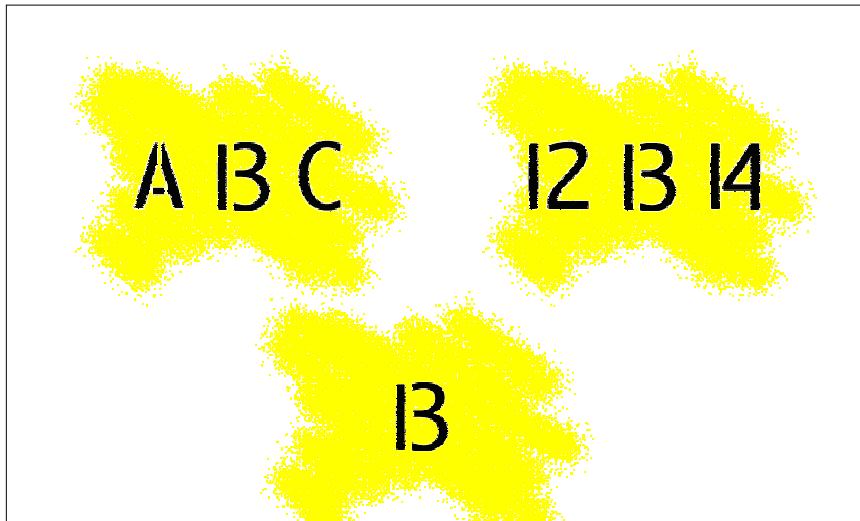
Relative Größe (Vergleich zu anderen Objekten)

Stereo-Sehen

Andere Sinne: Schall, Geruch, Temperatur, ...

Maschinell: Abstandsmessung (Laser, Sonar,...)

## Kontext-Abhangigkeit



## Integration zu Wahrnehmungen

Durch Bewegung werden Objekte sichtbar

Im maschinellen Sehen:

- Stereosehen durch bewegte Kamera

## Wahrnehmungsprozess

Rückkopplungen zwischen den einzelnen Prozess-Schritten

Diskrepanzen in der Weiterverarbeitung führen zu erneuter Auswertung

Messung verlängerter Verarbeitungszeiten im Gehirn bei inkonsistenten Zwischen-Ergebnissen



## Maschinelle Wahrnehmungsprozesse

Mehrstufige Verarbeitung

- Signalaufnahme
- Vorverarbeitung (z.B. Rauschunterdrückung)
- Einfache Muster identifizieren
- Kombination zu komplexeren Objekten
- Beziehungen zwischen Objekten
- Interpretation

# Maschinelle Wahrnehmungsprozesse

## Bildverarbeitung

Signale  
Vorverarbeitung  
Muster  
Objekte  
Beziehungen  
Interpretation

Kamera  
Filterung  
Linien, Formen, Figuren  
Gegenstände  
Nachbarschaften  
Szene

# Maschinelle Wahrnehmungsprozesse

## Sprachverarbeitung

Signale  
Vorverarbeitung  
Muster  
Objekte  
Beziehungen  
Interpretation

Mikrophon  
Filterung  
Laute, Silben  
Wörter  
Sätze, Text  
Botschaft

## Geschwindigkeit und Parallelität

Natur:

„langsame“ Prozessoren

Hochgradig parallel

Maschine (Computer)

Schnelle Prozessoren

Im wesentlichen sequentiell

## Wahrnehmungsprozess: Signalaufnahme

Unterschiedliche Sensoren arbeiten parallel

Natur:

- Sehen
- Hören
- Riechen
- ...

Maschine:

- Kamera
- Entfernungsmesser
- GPS
- ...

## Wahrnehmungsprozess: Vorverarbeitung

### Natur:

- Aufbereitung (chemische/mechanische/... Prozesse)
- Weiterverarbeitung im Nervensystem

### Maschine

- Aufbereitung
- Weiterverarbeitung im Computer

- Verarbeitung auf „subsymbolischer Ebene“
- Identifikation von Mustern („Gestalten“)
- Vorauswahl „relevanter“ Information

## Wahrnehmungsprozess: Vorverarbeitung

Beispiel: Pixelweise Aufbereitung von Bildinformation

## Erkennen von Dächern

Einzelne Hinweise:

- Farbe
- Umriss

Kontext im Bild

- Nachbarschaften

Kontext der Situation

(„wo bin ich“)

## Erkennung von Dachformen

Linien aus den Bildern extrahieren

Linien charakterisiert durch Kontraste

## Erwartungen

Formen („Gestalten“)

Oberflächenerscheinung

Nachbarschaften

Aktuelle Situation

Kontexte

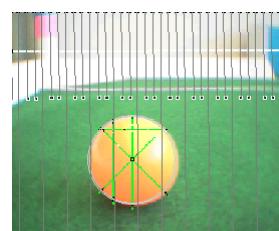
Erwartungen basieren auf Wissen

Erwartungen können auf verschiedenen Stufen  
des Wahrnehmungsprozesses eine Rolle spielen

## Erwartungen

Maschinelle Verarbeitung bzgl.

- Erkennen von Formen („Gestalten“): Gerade, Kreis,...
  - Oberflächenerscheinung
  - Nachbarschaften
  - Aktuelle Situation
  - Kontexte
- 
- Algorithmus: Kantenerkennung
  - Formenzuordnung
  - Körper-Zuordnung (z.B. Waltz-Algorithmus)



## Waltz-Algorithmus: Kantenbeschriftungen

„Vorwärtsmodell“:

Charakteristika bekannter Objekte ermitteln

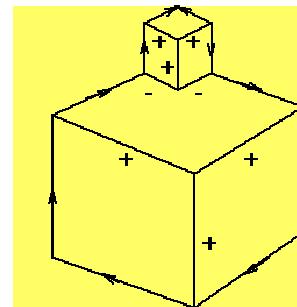
Bibliothek anlegen

Beispiel: Kantenbeschriftungen

Begrenzungslinien mit „→“

Konkave Innenlinien: mit „+“

Konvexe Innenlinien: mit „-“

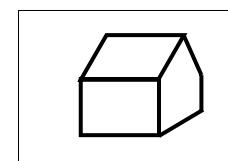


## Waltz-Algorithmus: Kantenbeschriftungen

„Rückwärtsmodell“:

Charakteristika eines neuen Objektes bestimmen

Neues Objekt durch Vergleich mit bekannten Objekten  
(Bibliothek) identifizieren



Beispiel: Kantenbeschriftungen

Kanten mit „→“, „+“ und „-“ beschriften

Problem: welche Beschriftungen sind zulässig.

(Constraint-Verfahren: Waltz-Algorithmus)

Objekt identifizieren

## 4 Typen von 3-Kanten-Schnittpunkten

(aufgrund gewisser Voraussetzungen)



Pfeil



Gabel



T-Stück



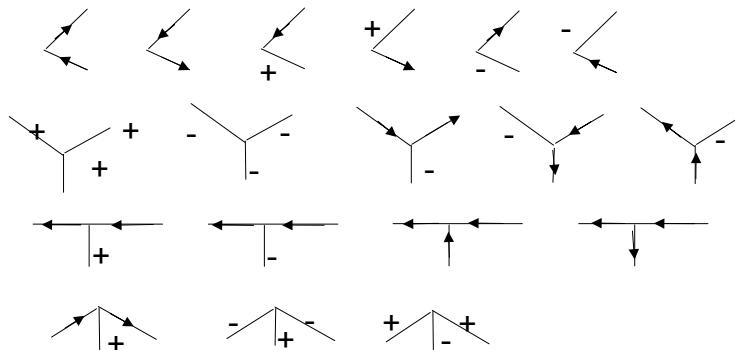
Ecke

## Beschriftete Schnittpunkte

Bei Kanten vier Möglichkeiten „ $\leftarrow$ “, „ $\rightarrow$ “, „ $-$ “ und „ $+$ “.

Folglich: insgesamt  $4^3 + 4^3 + 4^3 + 4^2 = 208$  Möglichkeiten.

Davon aber nur 18 physikalisch möglich (Constraints!)



## Erwartungsbasiertes Vorgehen

Einordnung und Identifikation von Informationen

Ergänzung fehlender Information

Fixierung auf erwarteten Kontext

Wie sind Erwartungen gespeichert? (z.B. Bibliothek)

Wie entstehen Erwartungen?

- Belehrung

- Erfahrung (neue Objekte lernen)

Erwartungen können zu Fehldeutungen führen

(optische Täuschungen)

## Beschränkung durch Erwartungen

Man kann (nur) wahrnehmen, was man erkennen kann

Maschine:

Kreis nur erkennbar mit entsprechenden Algorithmen

Mensch: Angeborenes Wissen + Erfahrungen

„wie geht die Büchse auf?“

Philosophische Probleme: Was ist überhaupt erkennbar  
(Sinne + Interpretation, Weltbild)

## Erwartungsbasiertes Vorgehen

Mehrdeutigkeiten auflösen  
bzw. „Voreinstellung“

Oben und unten werden unterschieden.

## Optische Täuschungen

Schatten-Interpretation (Erwartung!)  
Annahme: Licht kommt von oben

## Maschinelle Wahrnehmungsprozesse

Softwaretechnisches Problem:

Geeignete Datenstrukturen für  
Verwaltung, Koordination und Integration von  
Unterschiedlichen Datenquellen  
Unterschiedlichen Verarbeitungsstufen  
Unterschiedlichen „Hypothesen“

Lösungsversuche:

Blackboard-Systeme  
Multi-Agenten-Systeme (verteiltes Problemlösen)

## Wahrnehmungsprozess

Implementierung z.B. mit Blackboard-Systemen:

Blackboard-Systeme:

Methode zur Kopplung Wissensverarbeitender Systeme,  
entwickelt im Rahmen des HEARSAY-II-Projekts:

„cooperative interaction of communicating knowledge  
sources“ (Sprachverarbeitung)

Blackboard = Gemeinsamer Datenbereich + Steuerung  
Dient dem Nachrichten- und Ergebnisaustausch für  
koordinierte Arbeit der Modulen („Experten“).

## Wahrnehmungsprozess

Idee der Blackboardsysteme:

Aufgaben werden auf „Tafel“ geschrieben,  
von betroffenen Modulen gelesen/bearbeitet,  
Lösungen werden auf Tafel geschrieben,  
Interessenten lesen und verarbeiten.

Beispiel Spracherkennung (HEARSAY-II):

Die „Experten“ der einzelnen Verarbeitungsschichten  
(für Laute, Silben, Wörter, Sätze,...)  
bilden „Hypothesen“, die sie anderen „Experten“ mitteilen.  
Dabei können Hypothesen auch verworfen werden.

## Wahrnehmungsprozess

Implementierung von Blackboardsystemen:  
gemeinsamer Datenbereich  
Administrationsmethoden (Scheduling etc.)

Zentrale Datenstruktur (blackboard):  
unterteilt in Regionen (Niveaus)  
unabhängige Prozesse mit Lese-/Schreibzugriff  
auf gewisse Regionen der Datenstruktur

## Ergänzungen

Linien und Formen werden ergänzt

Meistens ist das sinnvoll

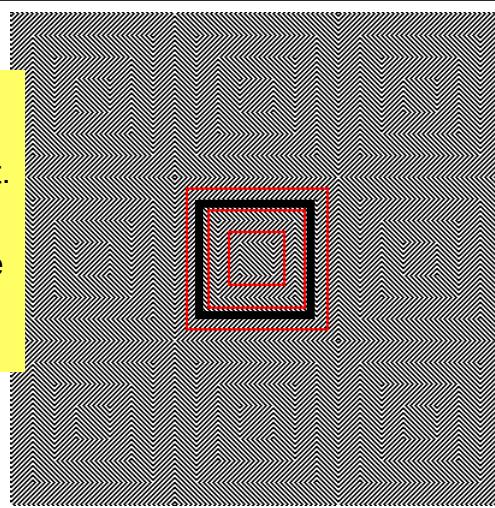


## Optische Täuschungen

Muster und Linien

Linien werden nicht als  
Geraden abgebildet,  
Winkel werden verändert.

Wahrnehmungsprozesse  
interpretieren.  
Manchmal aber falsch.



## Bewegungen

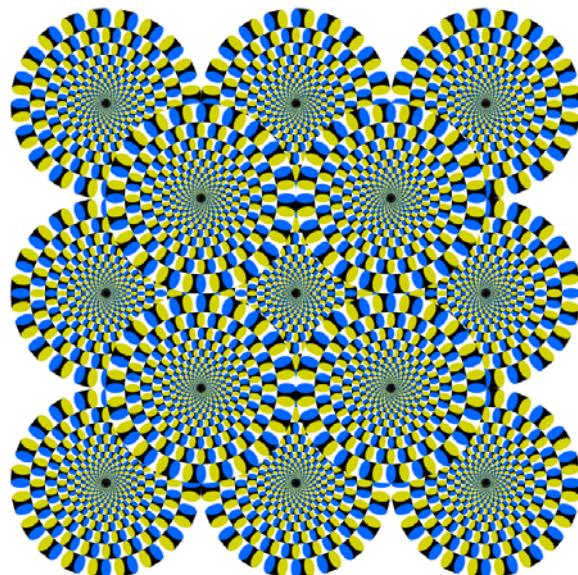
- können zu verfälschten Abbildern führen



-Menschen gleichen das meistens aus  
(und das kann manchmal falsch sein)

## Optische Täuschungen

Bewegungen?



# Optische Täuschungen

## Farben und Kontraste



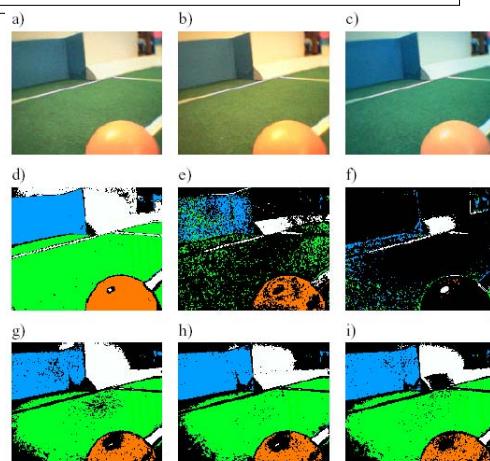
## Farben und Kontraste

Adaptation to changing lighting conditions.

a,b,c) Three images of the same scene, taken with different white balance modes of the camera.

d,e,f) The result of colorclassification based on a color table that was created by hand for image a)

g,h,i) The result of color classification based on a color table that was created automatically for each lighting condition.



Diplomarbeit Jüngel

# Optische Täuschungen

Bei Maschinen:

Wie beim natürlichen Sehen sind Ergänzungen, Auswählen und Interpretationen notwendig.

Diese können fehlerhaft sein:

- „Geisterbilder“
- Fehlende Objekte
- Falsche Zuordnung

# Aufmerksamkeit

Selektion von Information

Bewusstes/unbewusstes Wahrnehmen (Party-Effekt)

Rationalität: Auswahl relevanter Daten  
Auswahlprozesse können auf verschiedenen Stufen des Wahrnehmungsprozesses eine Rolle spielen

Maschinelle Verarbeitung z.B.

- selektive Auswahl von Bildinhalten
- Scanlinien unterschiedlicher Intensität,
- Farben bevorzugen: orange
- nur nach Ball suchen

## Aufmerksamkeit

Aufmerksamkeit bezogen auf Erwartungen

Unaufmerksamkeit für Unerwartetes:

Partielle Blindheit

(außer bei „heftigem Erscheinen“)

## Aufmerksamkeit

(Partielle) Blindheit bei maschinellem Sehen:

Generell:

Nur Formen und Objekte identifizierbar, die bekannt sind

- für die Algorithmen programmiert wurden
- die „gelernt“ wurden

In aktueller Situation:

Nur Formen und Objekte identifizierbar, für die ausreichend Ressourcen bereit gestellt werden

## Sensormodelle

Sensormodell: „Vorwärtsmodell“

$s$  = Zustand der Welt

Beobachtung mittels Sensor (Sensordaten)

$$o = f_{\text{sensor}}(s)$$

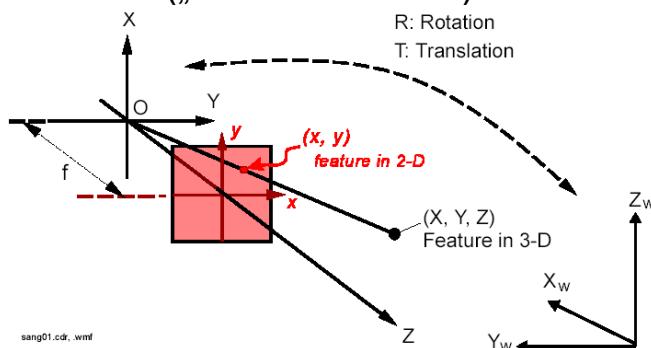
Beispiele:

Kameramodell (Linse, Brennpunkt, Bildebene)

Reflexionsmodell für Sonarmessung

## Sensormodelle

Projektionsmodell („Vorwärtsmodell“)



$X, Y, Z$  : Kamera-Koordinatensystem

$X_w, Y_w, Z_w$  : Welt-Koordinatensystem

$f$ : Brennweite

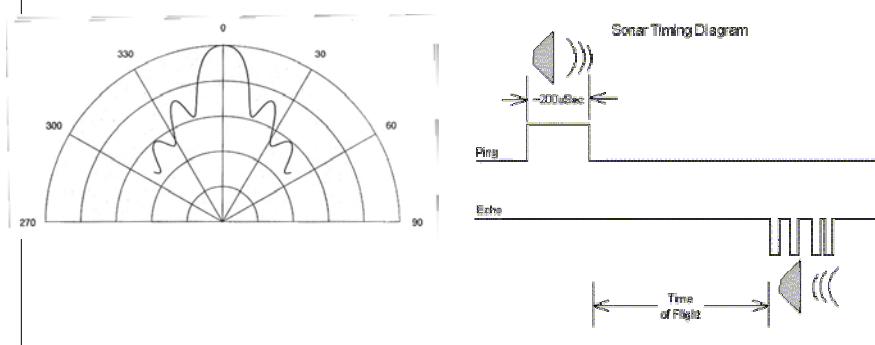
Die Bildkoordinaten  $(x, y)$  sind durch die Objektkoordinaten  $(X, Y, Z)$  eindeutig bestimmt.

## Sensormodelle

Sonar-Modell („Vorwärtsmodell“)

Schallausbreitung (ca. 330 m/sec)

Echo



## Sensormodelle

Beobachtungsmodell: „Rückwärtsmodell“:

Zustand ermitteln aus Beobachtungen

gewünscht:  $s = f^{-1}_{\text{sensor}}(o)$

Beispiele:

Räumliche Beziehungen aus Bild ermitteln

Räumliche Beziehungen (Abstand) aus Sonarmessung

## Sensormodelle

Probleme:

$f_{\text{sensor}}$  meist nicht eindeutig umkehrbar

Verrauschte Sensordaten

Beobachtungen erlauben nur Annahmen („beliefs“) über den wahren Zustand Z der Welt:

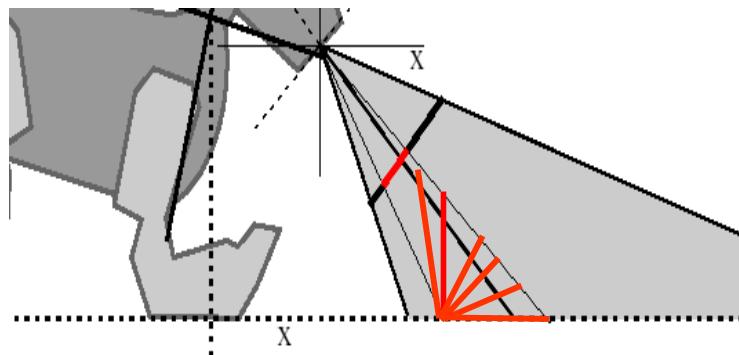
$$\text{Bel}(s) = \text{interpret}(o)$$

wobei  $\text{Bel}(s)$  möglichst nahe bei s sein soll

## Mehrdeutigkeiten

Beispiel: 2D-Abbilder der 3D-Realität

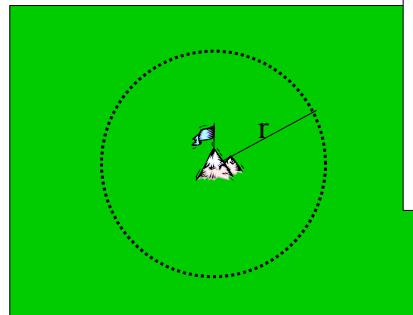
Umkehrung ist „schlecht gestelltes Problem“



## Mehrdeutigkeiten

Beispiel: 2D-Abbilder der 3D-Realität

Umkehrung ist „schlecht gestelltes Problem“



Wenn eine Landmarke in einer bestimmten Entfernung  $r$  gesehen wird, befindet sich der Beobachter auf einem Kreis um die Landmarke

## Mehrdeutigkeiten

Verbesserungen im Vision-Bereich:

Stereo-Bilder

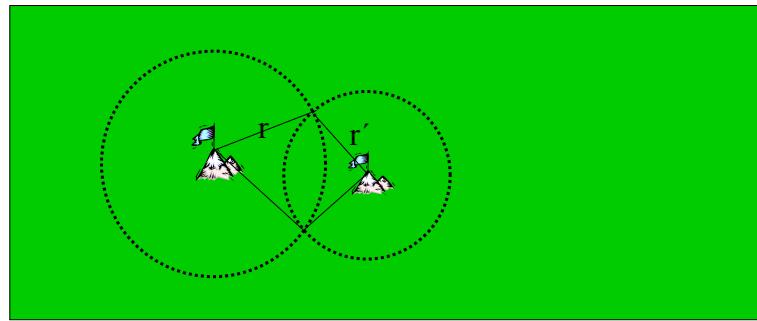
Redundanzen nutzen

Weltwissen ausnutzen (Interpretation), z.B. über

- Absolute Größe von Objekten
- Größenverhältnisse zwischen Objekten
- Relative Positionen von Objekten, Verdeckung
- Beleuchtung usw.

# Mehrdeutigkeiten auflösen

Die Entfernungen zu zwei Landmarken bestimmen die Position des Beobachters bis auf zwei Möglichkeiten. Bei drei Landmarken ist die Position eindeutig bestimmt.



# Störungen

## Fehlerhafte Echos bei Sonarsensoren

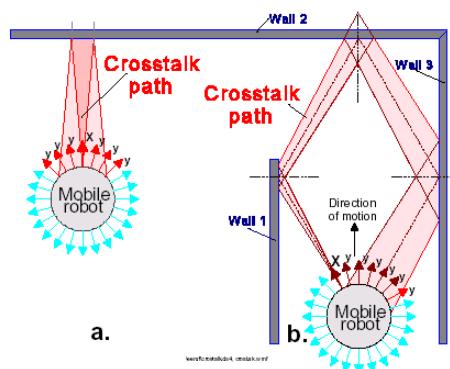
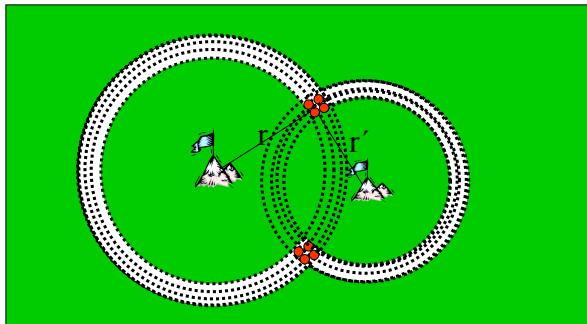


Figure 4.1: Crosstalk is a phenomenon in which one sonar picks up the echo from another. One can distinguish between a. direct crosstalk and b. indirect crosstalk.

# Verrauschte Messungen

Bei verrauschten Messungen  
(Ungenauigkeiten der Entfernungen  $r$  und  $r'$ )  
ist auch die Positionsbestimmung unzuverlässig.



# Modellierung verrauschter Sensordaten

Probabilistische Sensormodelle:

$$P(o | s)$$

Probabilistische belief-Modelle

$$\text{Bel}(s) = P(s | o)$$

Bayessche Formel

Verbesserung durch Redundanzen: Mehrere  
Sensoren/Messungen ausnutzen

Bayessche Modellierung

## Bayessche Modellierung

s: Zustand der Welt mit a-priori-Wahrscheinlichkeit  $p(s)$

$o_1, \dots, o_n$  Sensormessungen mit bedingten  
Wahrscheinlichkeiten  $P(o_1|s), \dots, P(o_n|s)$

a-posteriori-Wahrscheinlichkeit

für Zustand s nach Messung von  $o_1, \dots, o_n$  :

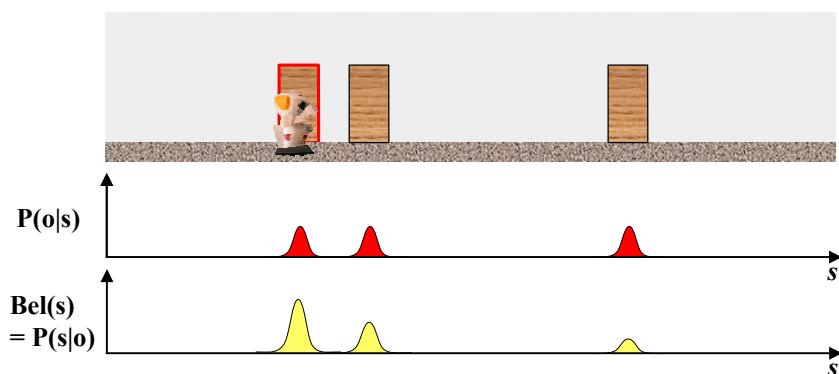
$$P(s|o_1, \dots, o_n) = \alpha \cdot P(o_1, \dots, o_n|s) \cdot P(s)$$

bei bedingter Unabhängigkeit der Messungen:

$$= \alpha \cdot P(o_1|s) \cdot \dots \cdot P(o_n|s) \cdot P(s)$$

( $\alpha$  ist Normierungsfaktor für Gesamtwahrscheinlichkeit 1 )

## Bayessche Modellierung



## Bayessche Modellierung: Dynamische Welt

Zustandsvariable: S, Zustand: s

Zustandsübergänge:  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_t$  (nicht beobachtbar)

Beobachtungsvariable: O, Beobachtung: o („Evidenzen“)

Allgemeines Übergangsmodell:

$$P(S_{t+1} | S_1, S_2, S_3, \dots, S_t)$$

Markov-Annahme:

$$P(S_{t+1} | S_1, S_2, S_3, \dots, S_t) = P(S_{t+1} | S_t)$$

Allgemeines Beobachtungsmodell:

$$P(O_{t+1} | S_1, S_2, S_3, \dots, S_{t+1}, O_1, O_2, O_3, \dots, O_t)$$

Sensormodell (durch Vereinfachung):

$$P(O_{t+1} | S_1, S_2, S_3, \dots, S_{t+1}, O_1, O_2, O_3, \dots, O_t) = P(O_{t+1} | S_{t+1})$$

## Bayessche Modellierung: Dynamische Welt

$$Bel(S_{t+1}) = P(S_{t+1} | o_1, \dots, o_{t+1}) = P(S_{t+1} | o_1, \dots, o_t, o_{t+1})$$

Bayes:  $= \alpha P(o_{t+1} | S_{t+1}, o_1, \dots, o_t) P(S_{t+1} | o_1, \dots, o_t)$

Markov:  $= \alpha P(o_{t+1} | S_{t+1}) P(S_{t+1} | o_1, \dots, o_t)$

Konditionierung über  $s_t$ :

$$= \alpha P(o_{t+1} | S_{t+1}) \sum_{st} P(S_{t+1} | s_t, o_1, \dots, o_t) P(s_t | o_1, \dots, o_t)$$

$$= \alpha P(o_{t+1} | S_{t+1}) \sum_{st} P(S_{t+1} | s_t) P(s_t | o_1, \dots, o_t) \quad (\text{Markov})$$

$$= \alpha P(o_{t+1} | S_{t+1}) \sum_{st} P(S_{t+1} | s_t) Bel(s_t)$$

Rekursion mittels Übergangsmodell und Sensormodell:

$$Bel(S_{t+1}) = \alpha P(o_{t+1} | S_{t+1}) \sum_{st} P(S_{t+1} | s_t) Bel(s_t)$$

# Integration

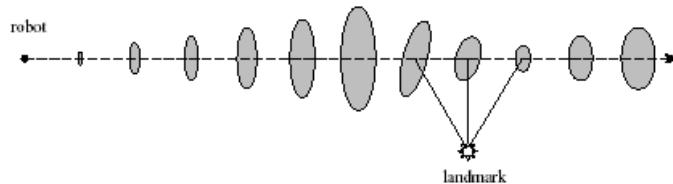
Verbindung („Fusion“, „Integration“) von Informationen,  
z.B. von

Odometrie

(Sensor-Messung der eigenen Bewegung)

Umgebungsinformation

(Sensor-Messung der Umgebung)

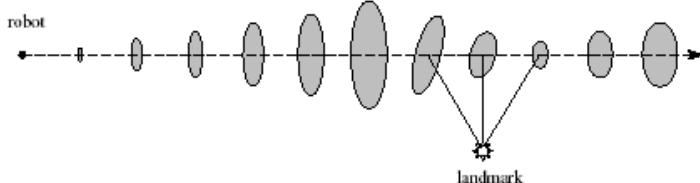


# Integration

Odometrie-basierte Hypothesen über Aufenthaltsort  
verschlechtern sich mit der Zeit

(Bahn-Abweichungen, insbesondere bzgl. Richtung,  
Bodenbeschaffenheit)

Verbesserung durch Beobachtungen



Verfahren: Kalman-Filter, Partikelfilter,... (SPÄTER)

# Integration

Redundanzen ausnutzen

Oft stehen vielfältige Informationen zur Verfügung  
(Beispiel: Beziehungen von Objekten im Raum)

Oft sind diese Informationen unsicher

Die einzelnen Informationen allein sind nicht ausreichend,  
aber ihre Kombination ergibt oft hinreichend gute  
Resultate.

# Redundanzen

Techniken:

Voting-Verfahren (Bsp.: Hough-Transformation)

CSP: Constraint Satisfaction Probleme

Bayessche Netze (Belief-Netze)

Abhängigkeiten zwischen den Daten ausnutzen (Modellwissen):

Interessierende Variablen  $v_1, \dots, v_n$

CSP: Zusammenhänge als Constraints  $C_1, \dots, C_k$  formulieren

Bayessche Netze: Zusammenhänge als bedingte Wahrscheinlichkeiten  
formulieren

Gesamtlösung muss alle Constraints/Wahrscheinlichkeiten erfüllen

Rückschlüsse auf unbekannte Werte möglich

Verminderung von Unsicherheiten möglich

## Redundanzen

Beispiel:

für einzelne Objekte  $o_i$ : Entfernungsmessung  $d(o_i)$

für einzelne Objekte  $o_i$ : Größe im Bild  $g(o_i)$

Beziehungen zwischen Objekten  $o_i, o_j$  :  $R_m(o_i, o_j)$

Zusammenhänge als Constraints  $C_1, \dots, C_k$  formulieren

z.B.  $\text{verdeckt}(o_i, o_j) \rightarrow d(o_i) < d(o_j)$

$g(o_i) = \alpha d(o_i)$  für objekt-abhängiges  $\alpha$

Damit z.B. Werte für Distanzmessungen einschränken und ggf. verbessern/korrigieren

## Wahrnehmungsprozess

Erstellung eines Weltmodells

Strukturierung des Prozesses:

vertikal:

Wahrnehmungsprozess über verschiedene Ebenen  
(Vorverarbeitung, Zwischenresultate, ...)

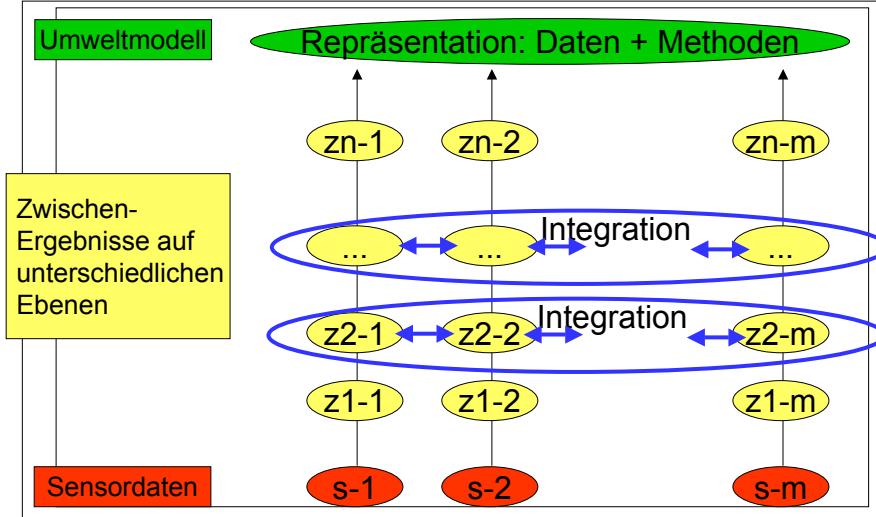
Horizontal:

Integration von Daten aus unterschiedlichen Quellen  
bzw. von Daten unterschiedlicher Art

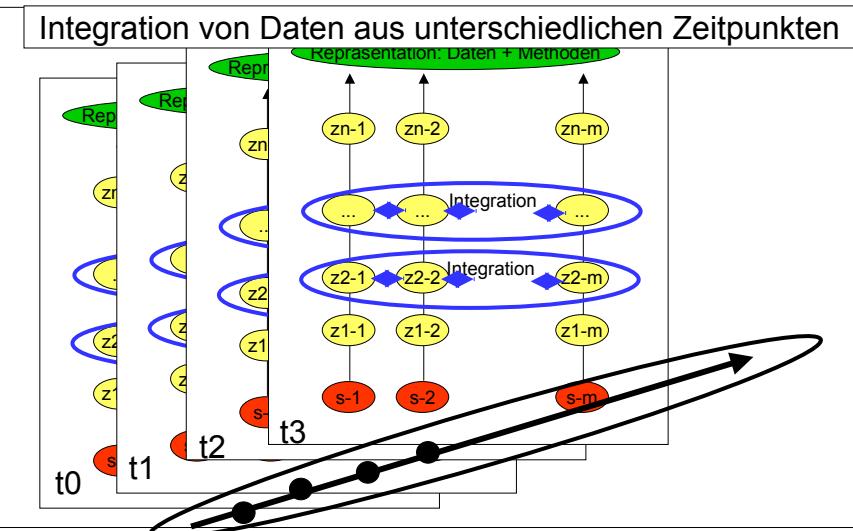
Zeitlich:

Integration von Daten aus unterschiedlichen Zeitpunkten

## Schema: Wahrnehmungsprozess



## Schema: Wahrnehmungsprozess



## Hilfsmittel für die Wahrnehmung

Hilfsmittel in der Umwelt:

Orientierungspunkte schaffen („Landmarken“)

Verkehrslenkungseinrichtungen

Markierungen, Symbole

Referenzsymbole (z.B. für Farben)

„Interne“ Hilfsmittel:

Karten

Pläne

Routen