

Der Bremer Autonome Rollstuhl: Grundlagen der Navigation, ihre Anwendung und das Sicherheitskonzept

**Bernd Krieg-Brückner,
Thomas Röfer, Rolf Müller,
Axel Lankenau, Oliver Meyer**

Bremer Institut für Sichere Systeme, TZI, FB3
Universität Bremen

Gliederung

Einführung

Taxonomie der Navigation

- Navigation in Gangsystemen
- Navigation im Raum

Anwendung auf den Rollstuhl

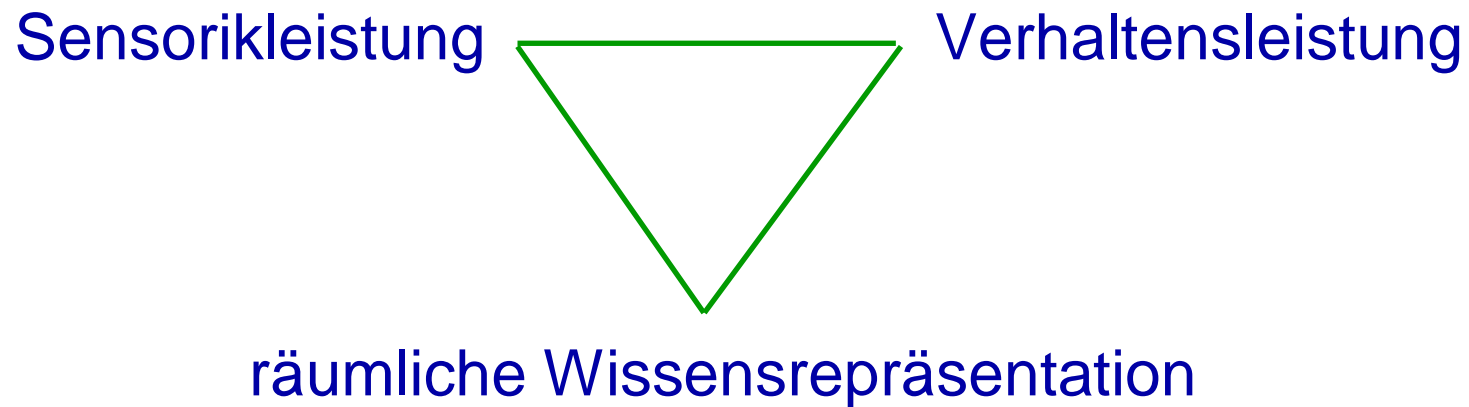
- Sensorik des Rollstuhls
- Grundverhalten
- Erkennung von Land- bzw. Wegmarken
- Routennavigation

Sichere Rehabilitationsrobotik

- Sicherheitsschicht zwischen Anwendung und Rollstuhl
- Realisierung des Sicherheitskonzepts mit formalen Methoden

Ausblick

Räumliches Wissen und Navigation



das Dreieck der Raumkognition

was ist gegeben? erwünscht? was soll analysiert bzw. synthetisiert werden?

Navigation in Netz von Gängen

Gänge (Passagen)

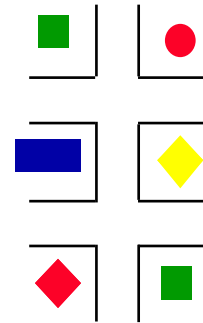
- Gänge, Tunnel, Korridore, Pfade, gebahnte Wege, Straßen

Basisverhalten

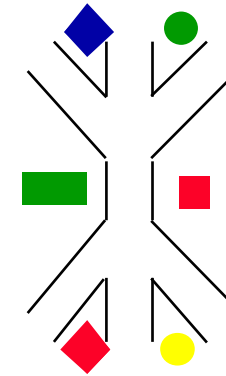
- Gangzentriertes Laufen / Fahren (z.B. auf Straße)
- Wandverfolgung links / rechts
- Einbiegen links / rechts, in bezeichnete Abzweigung

Abzweigen (taktische Entscheidung)

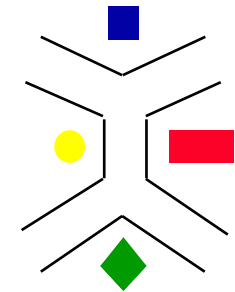
- links, rechts, geradeaus, n-ter Abzweig
- Abzweigung gekennzeichnet durch *Ansicht* bzw. Wegmarkenkonstellation



grid

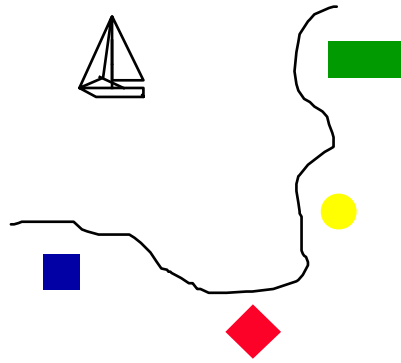


network

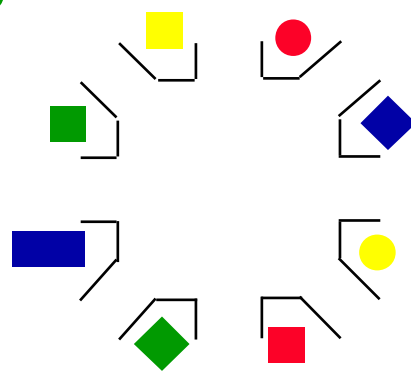


hexatown

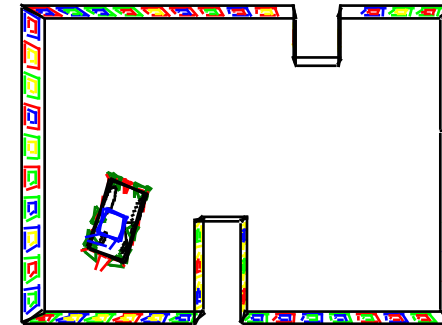
Navigation im Raum



Ozean



Marktplatz



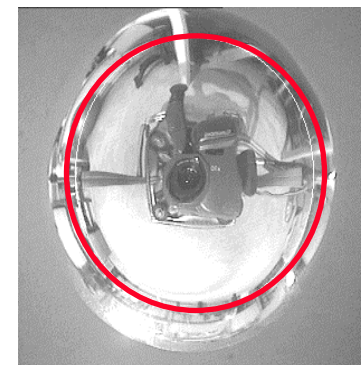
Büro

Außenraum und Innenraum: analog Vektornavigation

- bzgl. Kompaß-Richtung, Magnetfeld, etc.
- Pfadintegration (*dead reckoning*):
akkumulierte Eigenbewegung \rightarrow *homing vector*

Positionsnavigation (Triangulation)

- Ansicht = Landmarkenkonstellation (fix)
- Ansicht = Gestirnkonstellation (beweglich): z.B. Sonnenstand



Navigationstaktiken

Aufgabenorientierte Verhaltensweisen (*Beispiel: Biene*)

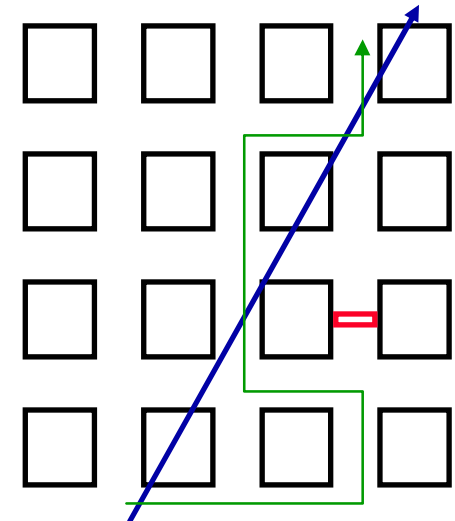
- Auffinden der Futterregion (übermittelter Ziel-Vektor)
- Futtersuche (erlernte Route, Landmarken)
- Rückkehr zur Nestregion ("homing vector" aus Pfadintegration)
- systematischer Suchflug
- Anflug an das Nest (Wiedererkennen einer (Rundum-) "Sicht")

Verkettung von spezialisierten Navigationstaktiken

- am Ziel Umschalten auf nächstes Verhalten

Überlagerung von Taktiken

- Erhöhung der Robustheit
- Trennung zur Analyse und Modellierung
- Kombination in Realität
(Sonnenkompaß, Lichtpolarisation, Magnetfeld)
- Taktik im Raum || Taktik in Gängen



Modellierung

Ortsbezeichner zur Lokalisation und taktischen Entscheid.

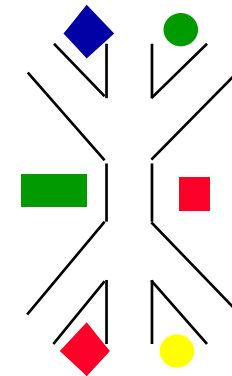
- z.B. "vor der Kirche links abbiegen" (Wegmarke, Abzweig)
- Vektor (lokales, globales Referenzsystem; topologisch, metrisch)
- An-Sicht als Landmarkenkonstellation

Route

- homogen: $\langle \text{Ortsbezeichner} \rangle$ mit fester Taktik
- heterogen: $\langle (\text{Taktik}, \text{Ortsbezeichner}) \rangle$

Ortsabstraktion

- aus derselben Richtung (*source aliasing*)
- in dieselbe Richtung (*target aliasing*)

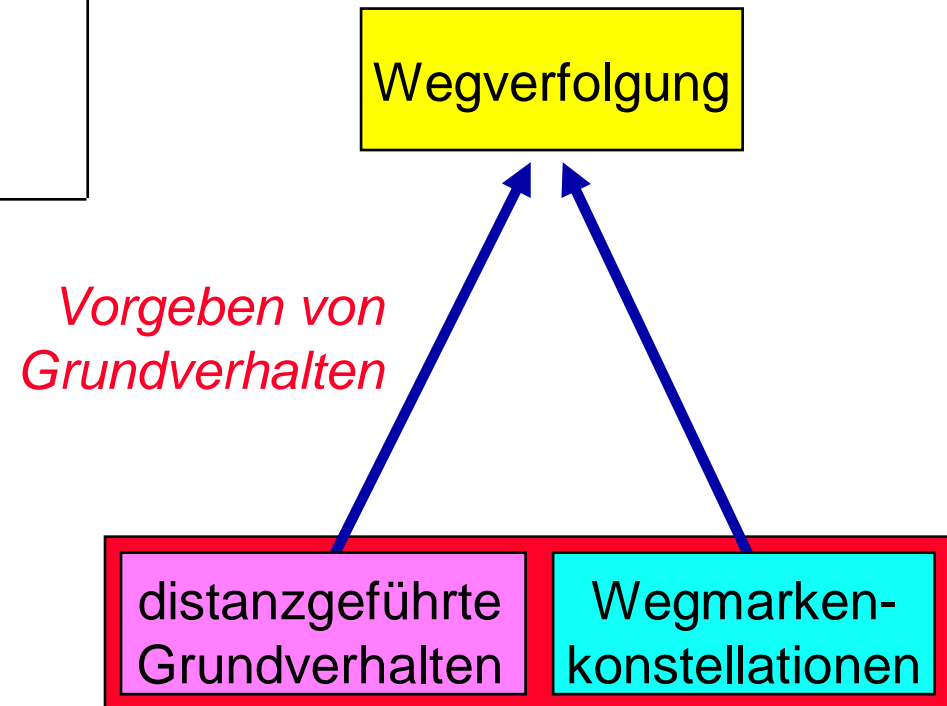
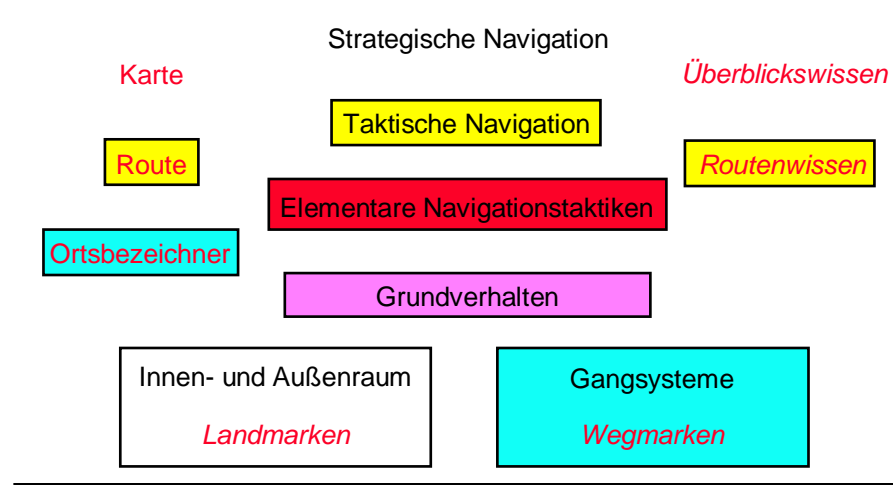


Routen-Karte ($\{(\text{Ort}, \text{Taktik}, \text{Ortsabstraktion})\}, \{\text{Ortsabstraktion}\}$)

Übersichts-Karte ($\{\text{Taktikabstraktion}\}, \{\text{Ortsabstraktion}\}$)

- Perspektive: *field perspective* — *observer perspective*
- Referenzsystem: lokale Karte (*local chart*) — globale Karte (*map*)

Anwendung auf Experimente mit dem Rollstuhl



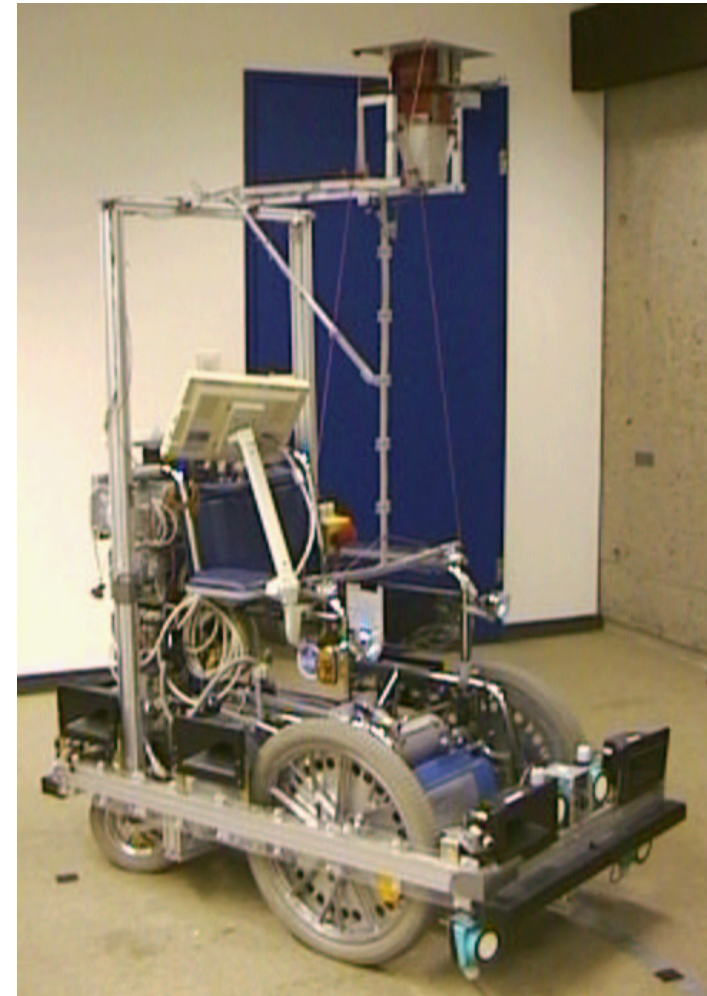
Der Bremer Autonome Rollstuhl

Erster Prototyp

- 134 cm x 72 cm
- Frontantrieb
- Hecklenkung
- PC + 5 Microcontroller an Bord

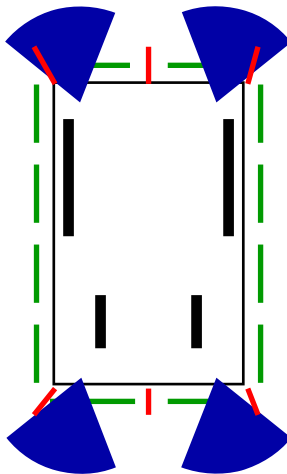
Sensoren

- 12 taktile Sensoren
- 6 Infrarotsensoren
- 8 Ultraschallsensoren mit großem Öffnungswinkel (80°)
- 8 Ultraschallsensoren mit kleinem Öffnungswinkel (7°)
- 1 Kamera
- Odometrie

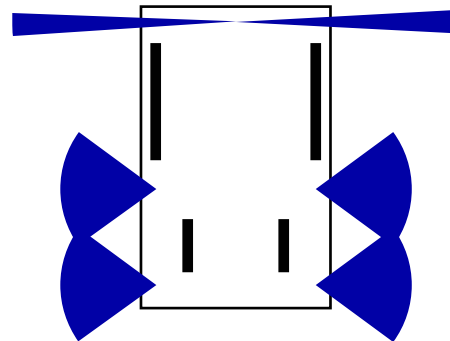


Sensorische Teilsysteme

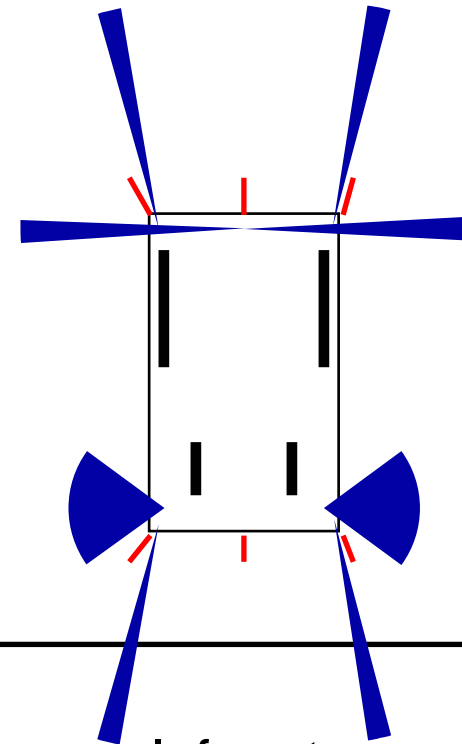
Kollisionsdetektion



Lenkungs-dämpfung



Navigation



| taktile Sensoren



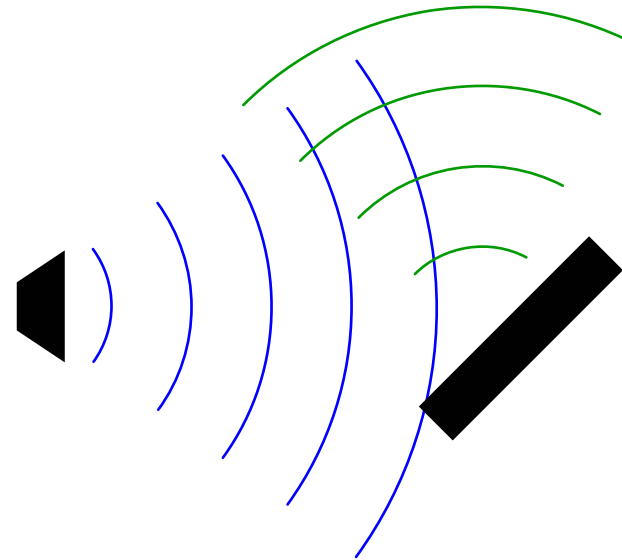
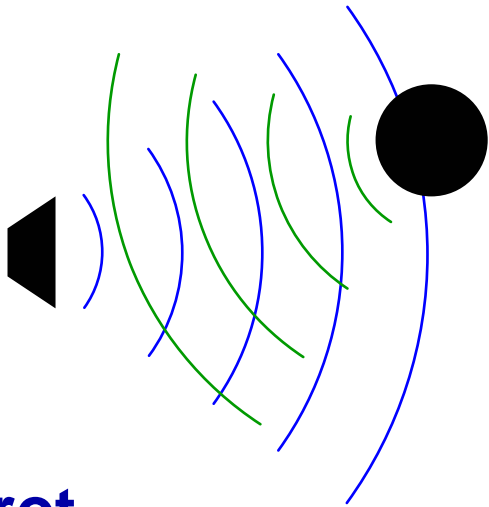
Ultraschall-sensoren

Infrarot-sensoren

Sensorikschwächen

Ultraschall

- Reflektionen: schräge, glatte Flächen
- Absorption: Weiche Oberflächen



Infrarot



- Entfernung überschätzt: dunkle, matte Oberflächen
- Entfernung unterschätzt: spiegelnde Oberflächen

Lokale Hinderniskarte

Kurzzeitgedächtnis

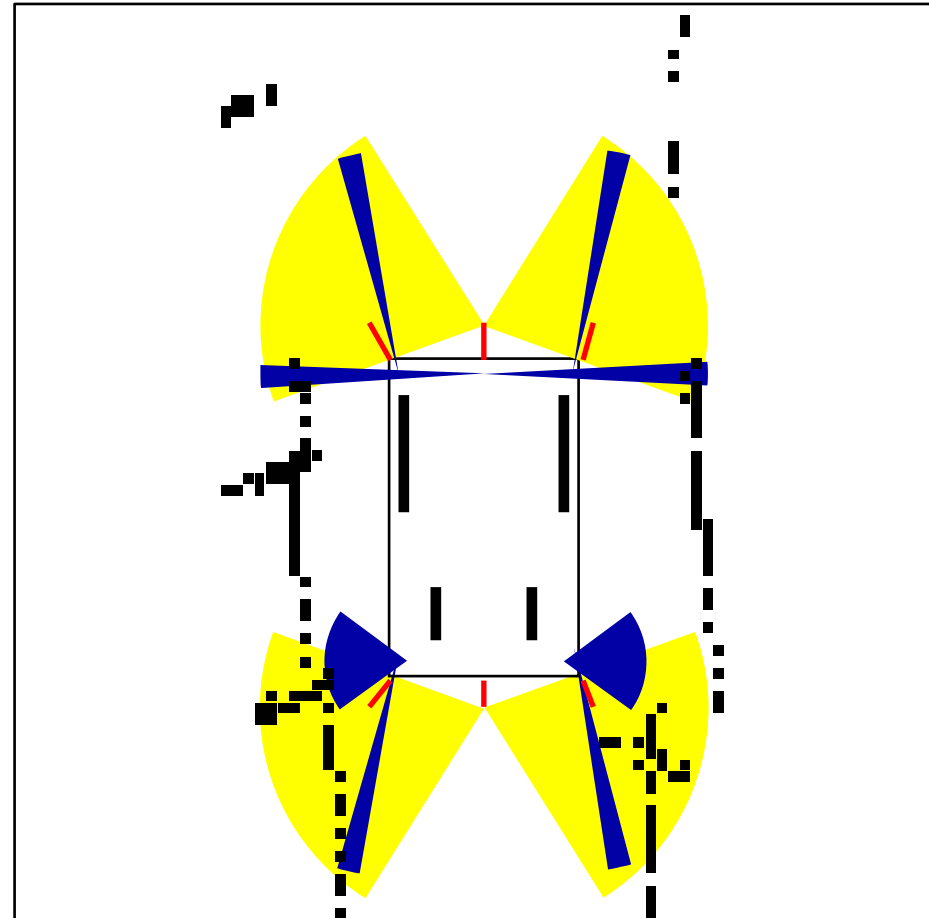
- Speichert die lokale Umgebung des Rollstuhls
- Größe 4 x 4 m²
- Einträge löschen nach 30 Sekunden → vergessen dynamischer Hindernisse

Eingabe

-  • 6 schmale und 2 breite Ultraschallsensoren
-  • 6 Infrarotsensoren

Ausgabe

-  • 4 “virtuelle Sensoren”



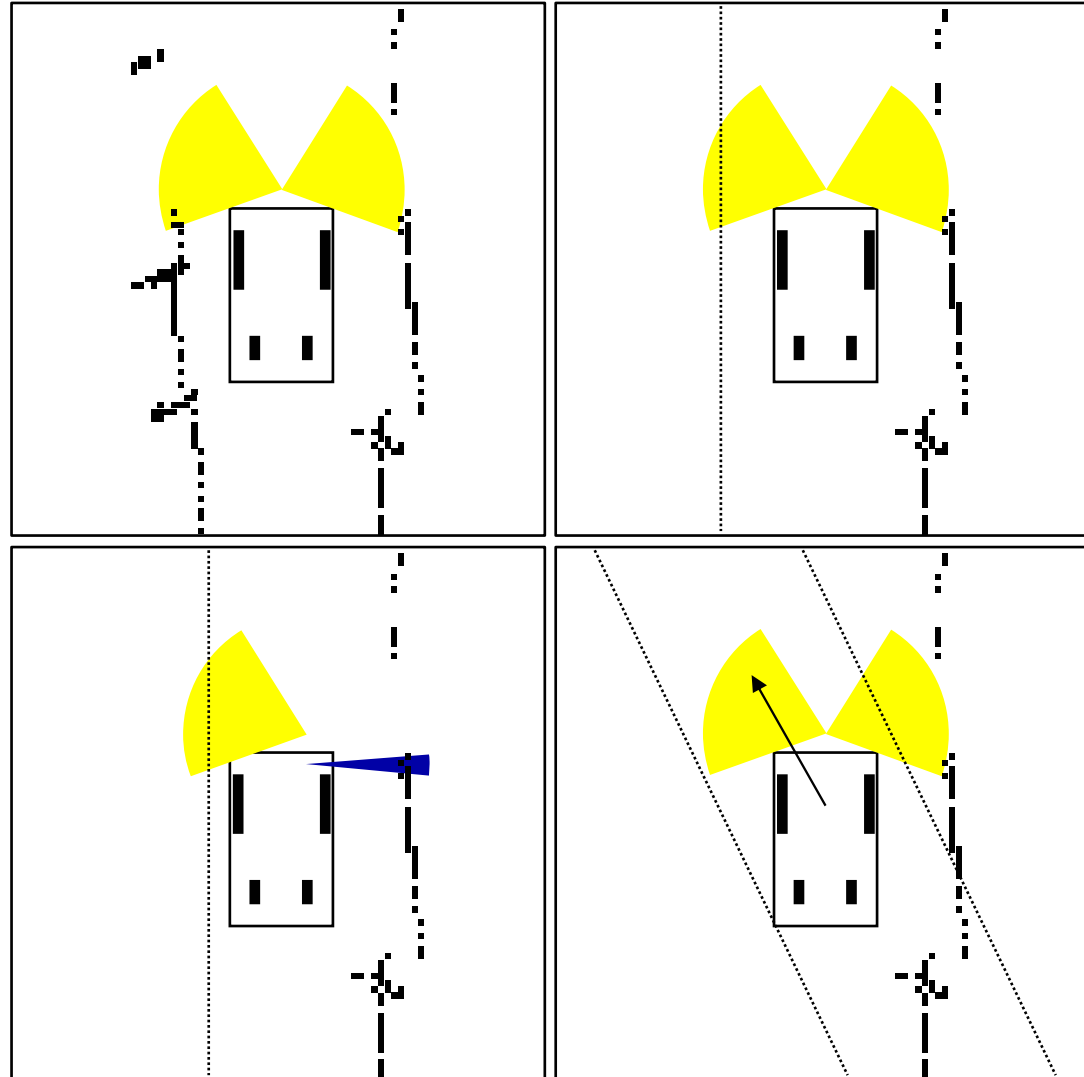
Grundverhalten

Verhalten

- Gangzentrierung
- Wandverfolgung links/rechts
- Einbiegen in die linke/rechte Tür
- Richtungsverfolgung vorwärts/rückwärts
- Anhalten

Arbeitsweise

- Vorwärts bis Kollision
- dann 50 cm zurück
- und wieder vorwärts



Semilokale 3D-Marken

Vorarbeiten

Bildsequenzen

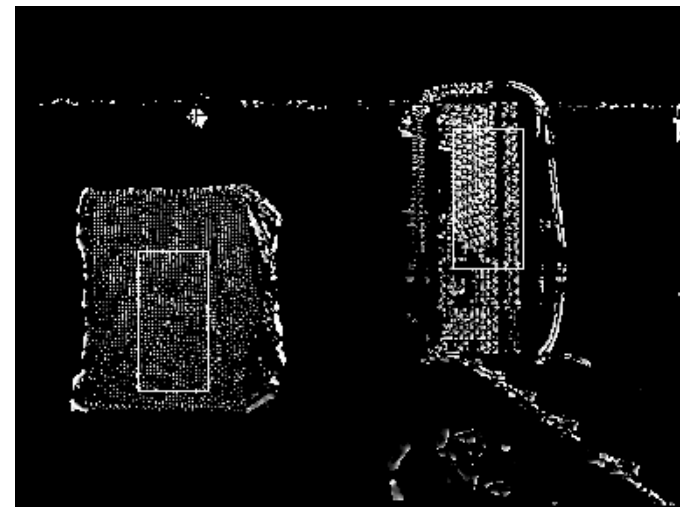
- kleine (semilokale) Bildregionen
- Normalenflußfeld
- Bewegungsrichtung der Kamera (FOE)

Aktuelle Arbeiten

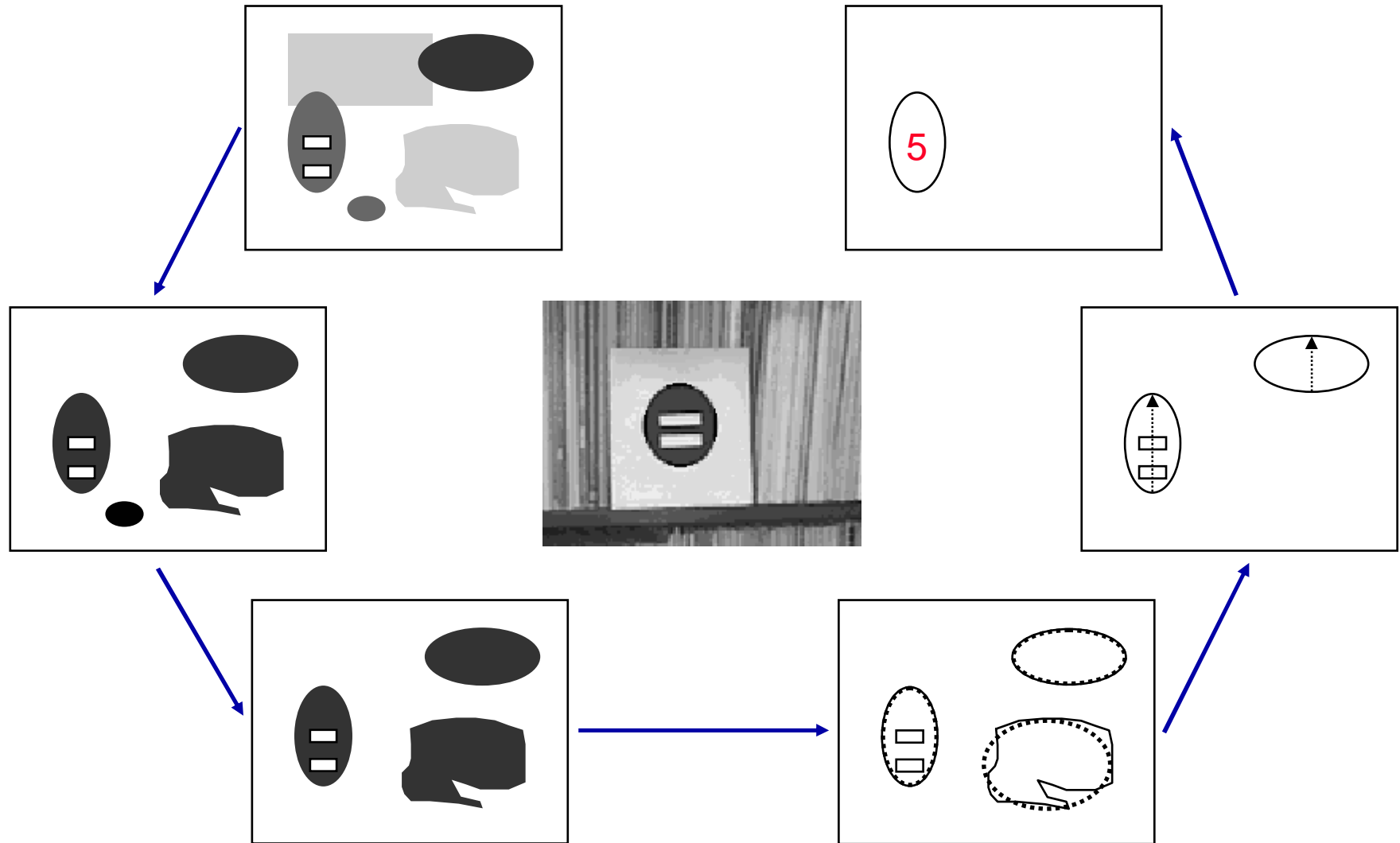
- Tiefenbestimmung
- Semilokale 3D-Strukturen
- 3D-Marken

Vorteile

- Effizient (echtzeitfähig)
- Robust gegenüber Rauschen



Künstliche Wegmarken





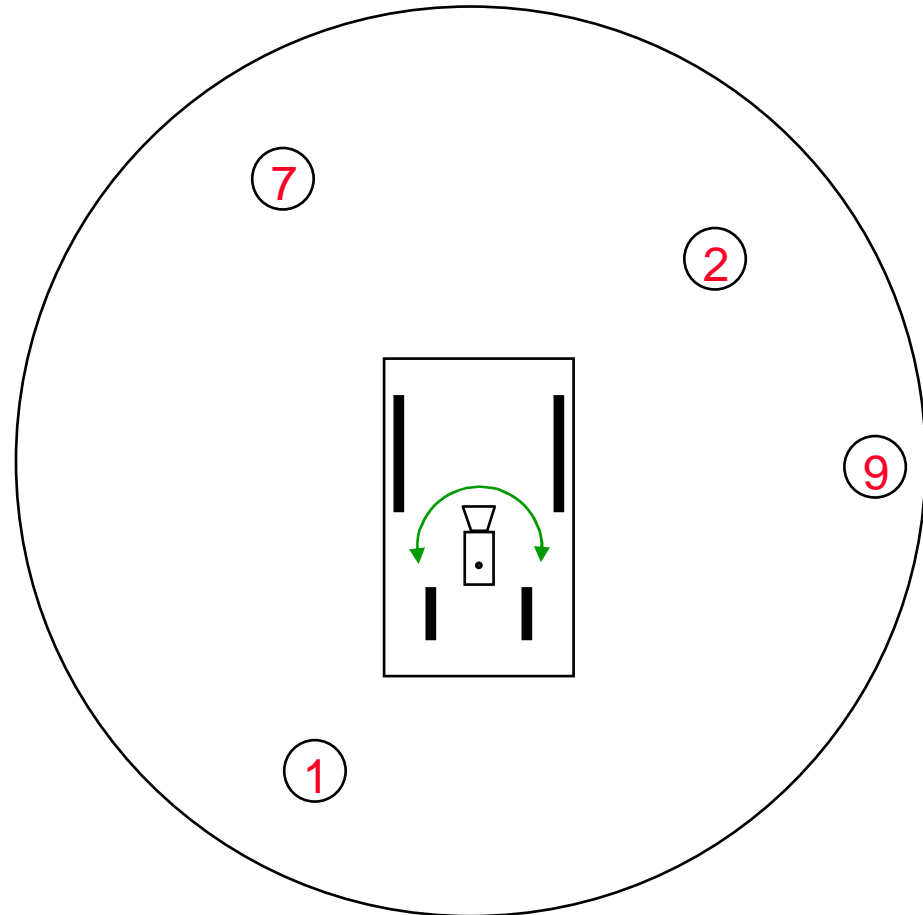
Lokale Wegmarkenkarte

Kurzzeitgedächtnis

- Speichert die Wegmarken in der lokalen Umgebung des Rollstuhls
- Radius 5 m

Symbole

-  • Wegmarke X
-  • Kamera auf dem Schwenkkopf





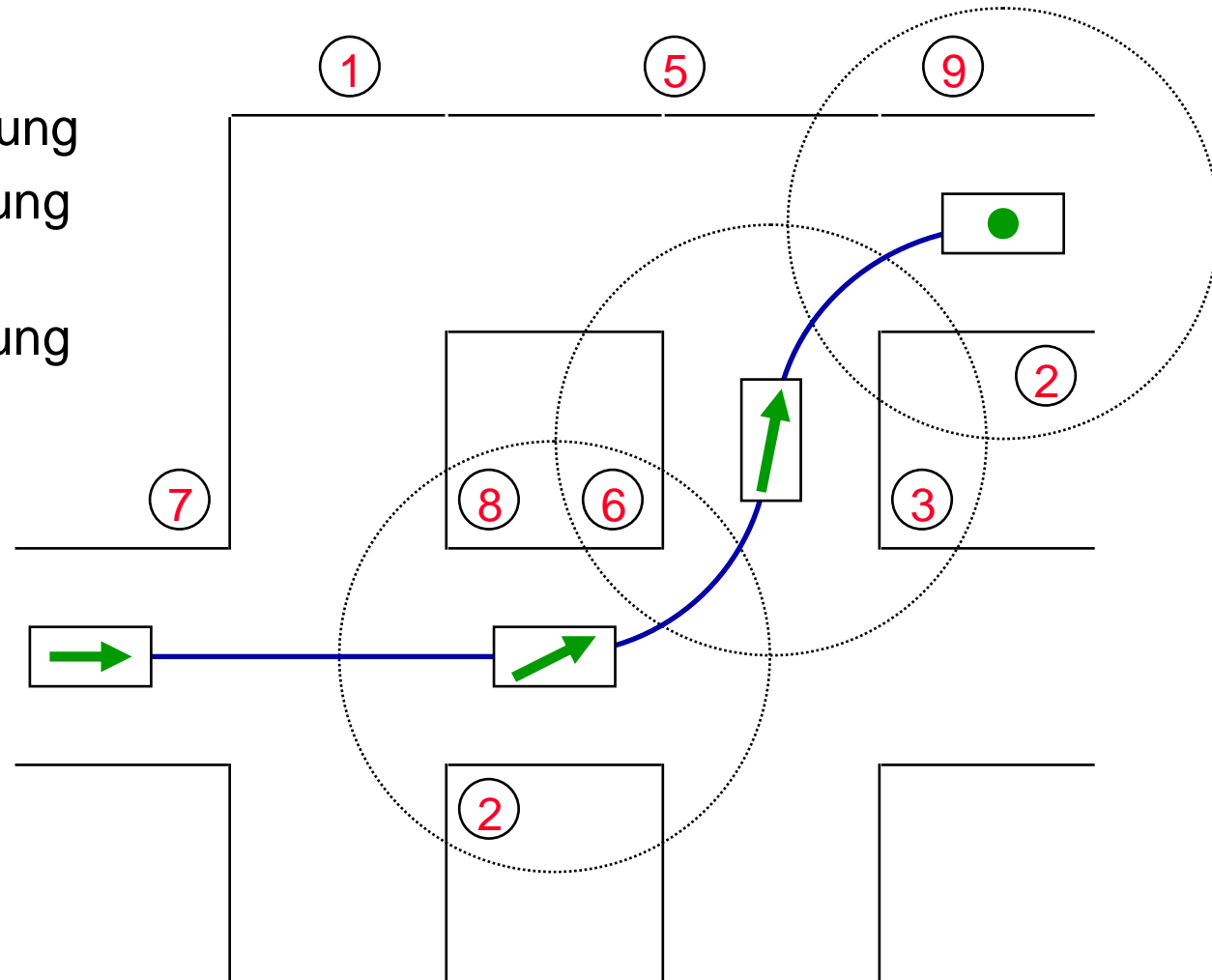
Lehren von Routen

Verhalten

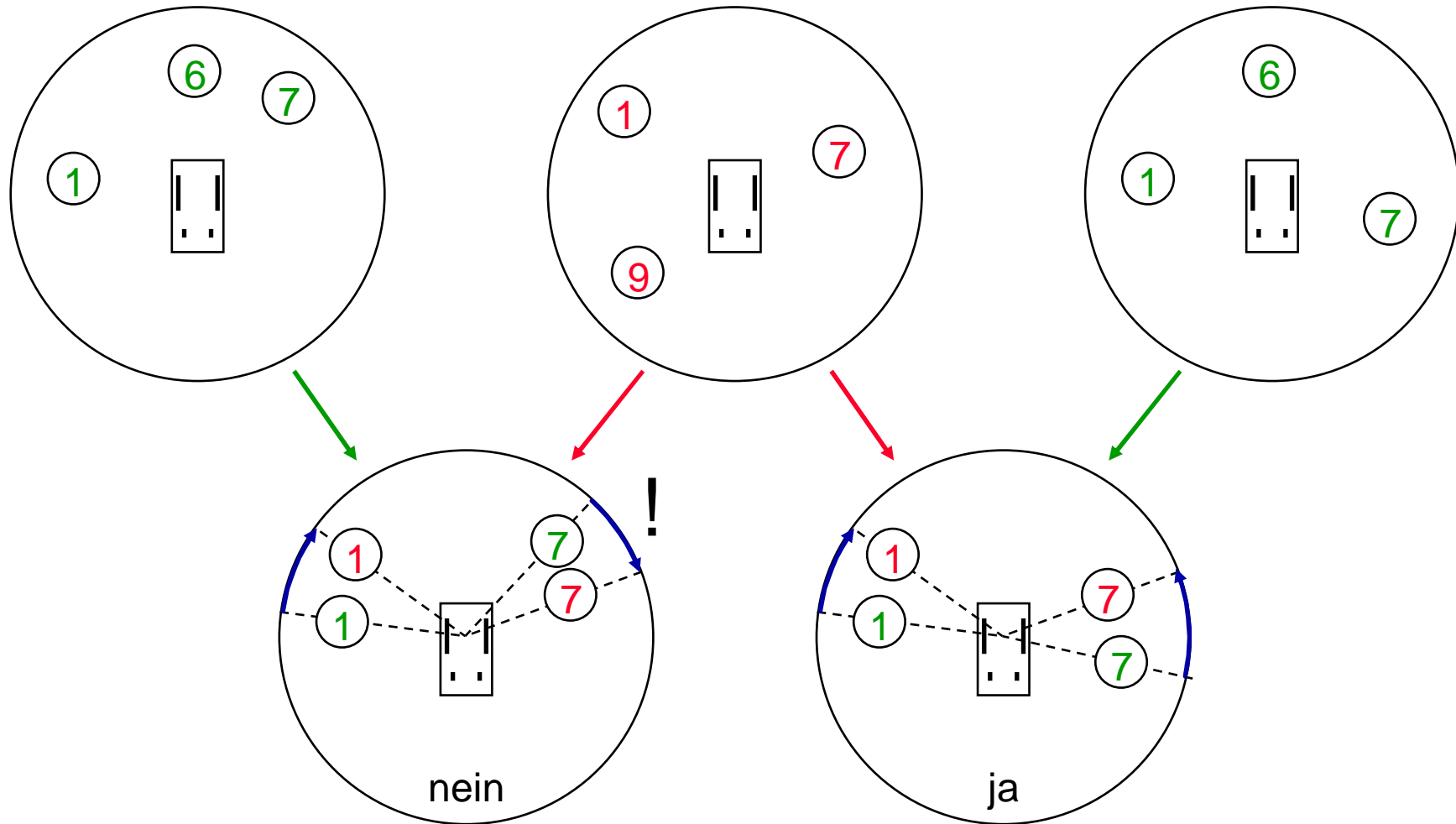
-  • Gangzentrierung
-  • Wandverfolgung links
-  • Wandverfolgung rechts
-  • Anhalten

Wegmarken

-  • Wegmarke X
-  • Wegmarkenkonstellation



Autonomes Weiterschalten von Verhalten



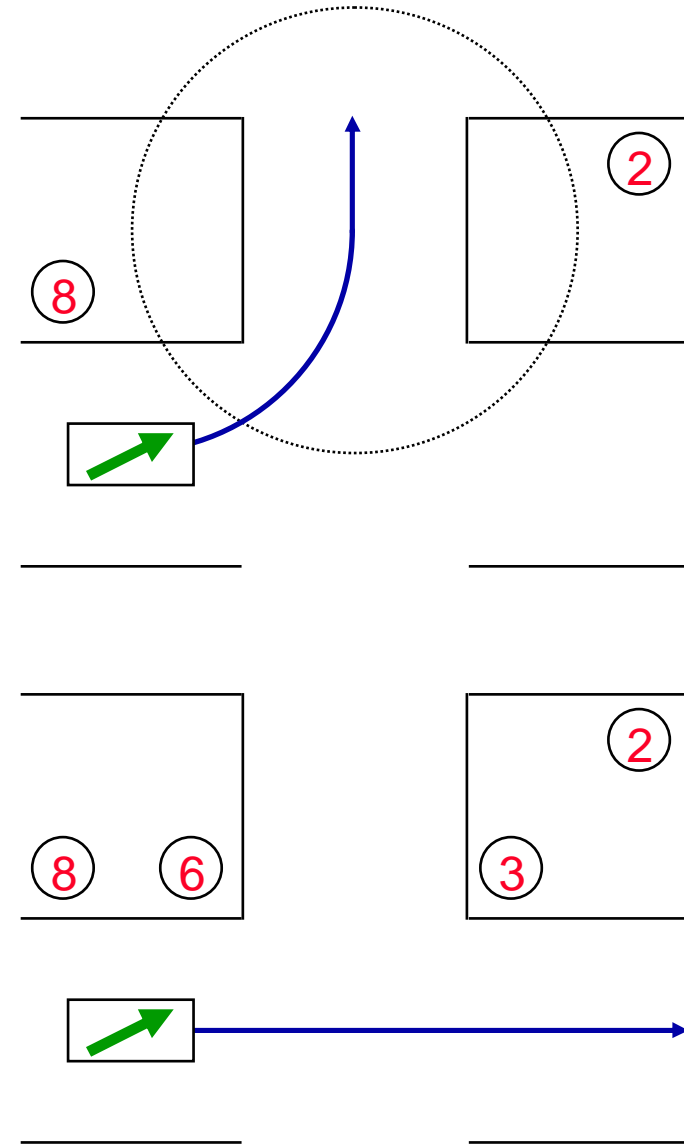
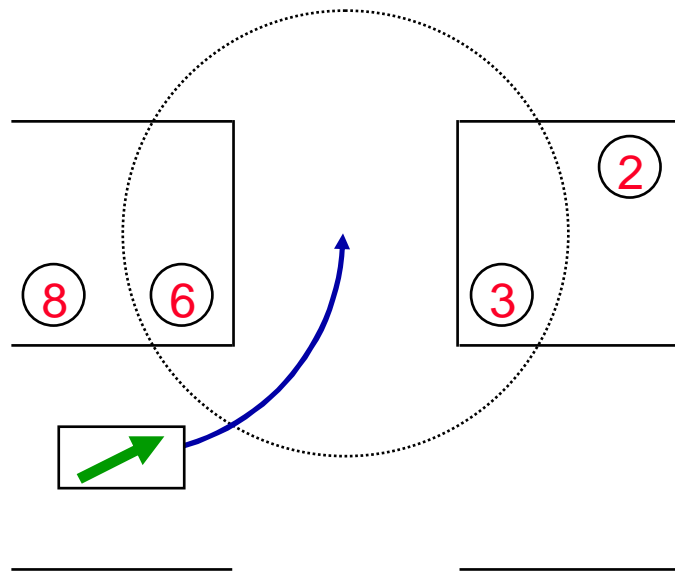
Fehler

Mögliche Fehler

- Keine Wegmarke wird gefunden
- Verhalten wird fehlerhaft ausgeführt

Beenden fehlerhafter Verhalten

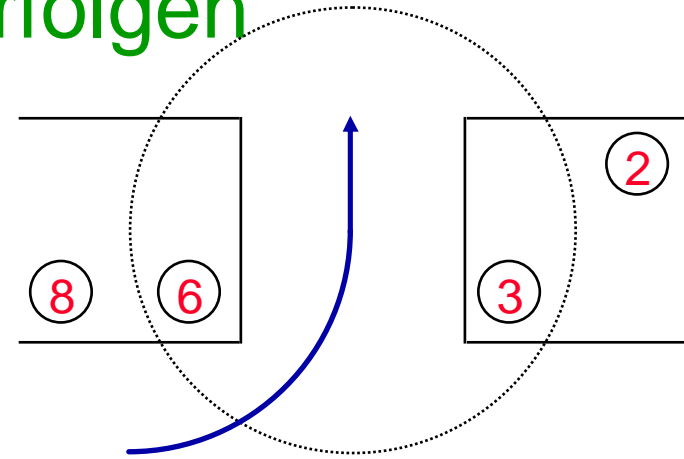
- Verhalten dauert zu lange
- Andere Wegmarken gefunden



Route zurückverfolgen

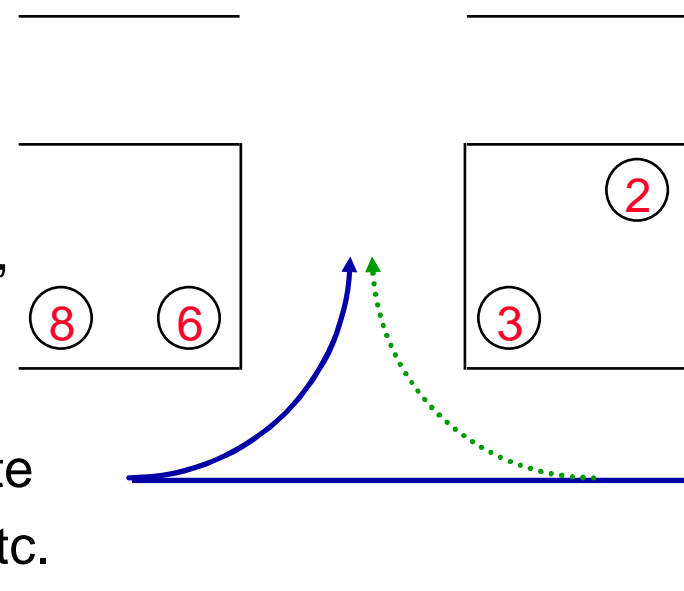
Methode

- Keine inversen Verhalten
- Speichern der Odometriepositionen während der Verhaltensaufführung
- Rückgängig machen durch Zurückverfolgen entlang gespeicherter Positionen
- mit "Richtungsverfolgung rückwärts"-Verhalten






Taktik

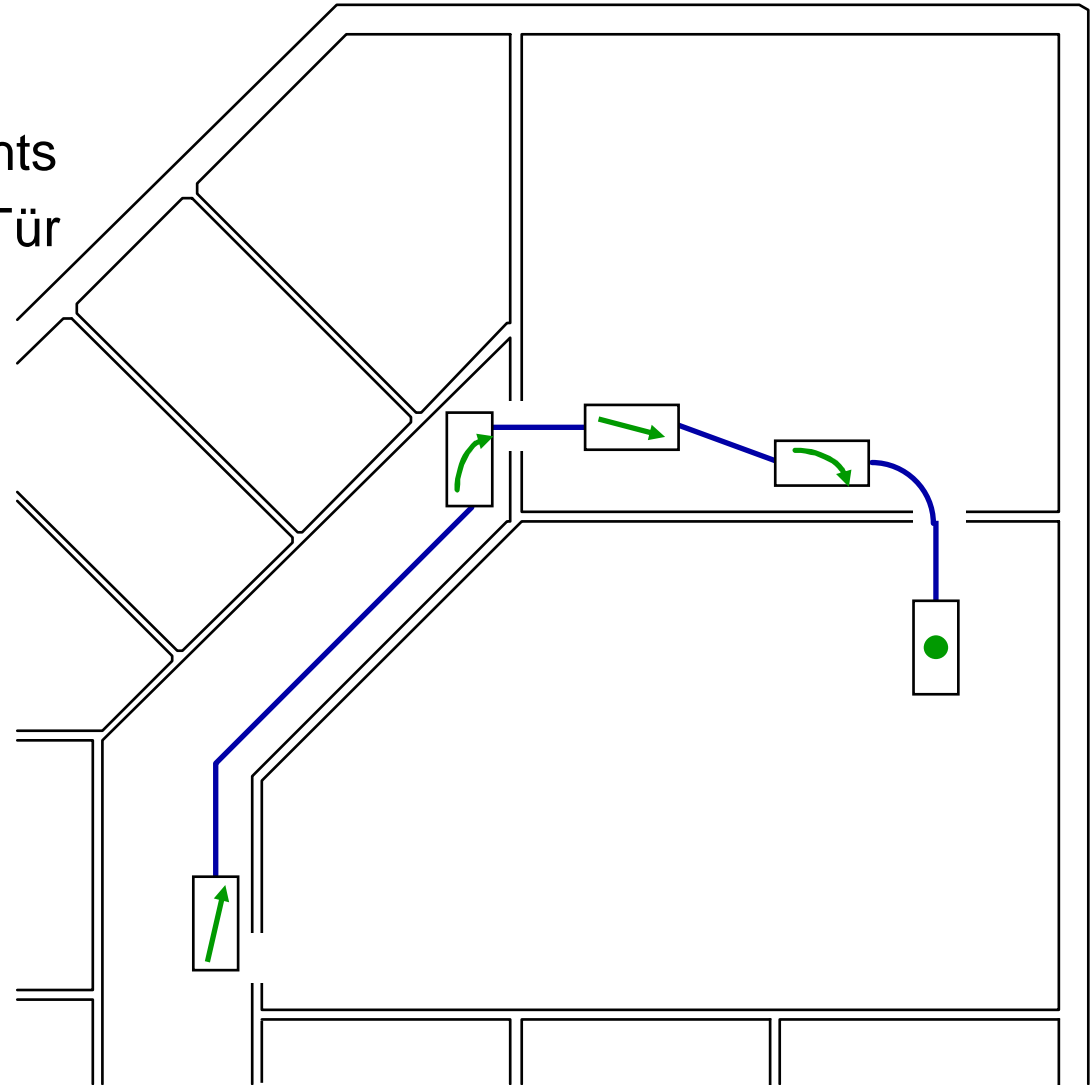
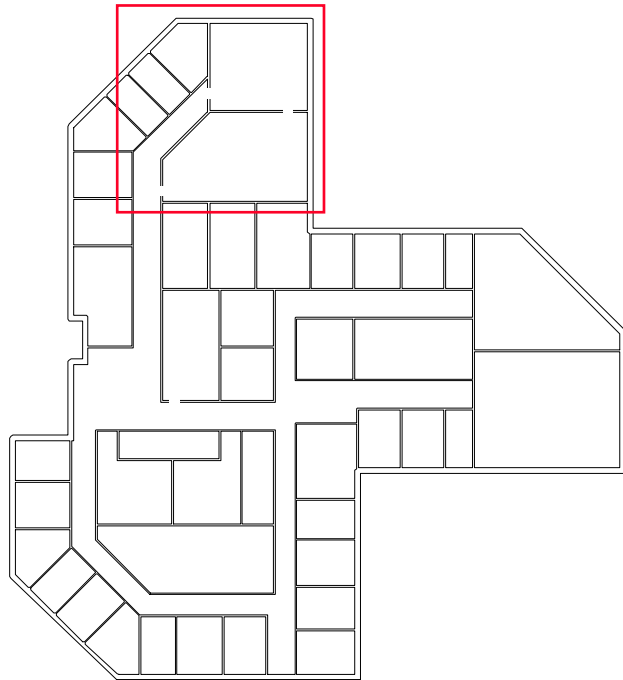
- Zurückverfolgen des letzten Segments, Suche nach Wegmarken
- Wiederholen des letzten Segments
- Zurückverfolgen der letzten 2 Segmente
- Wiederholen der letzten 2 Segmente etc.



Beispielroute





Verhalten

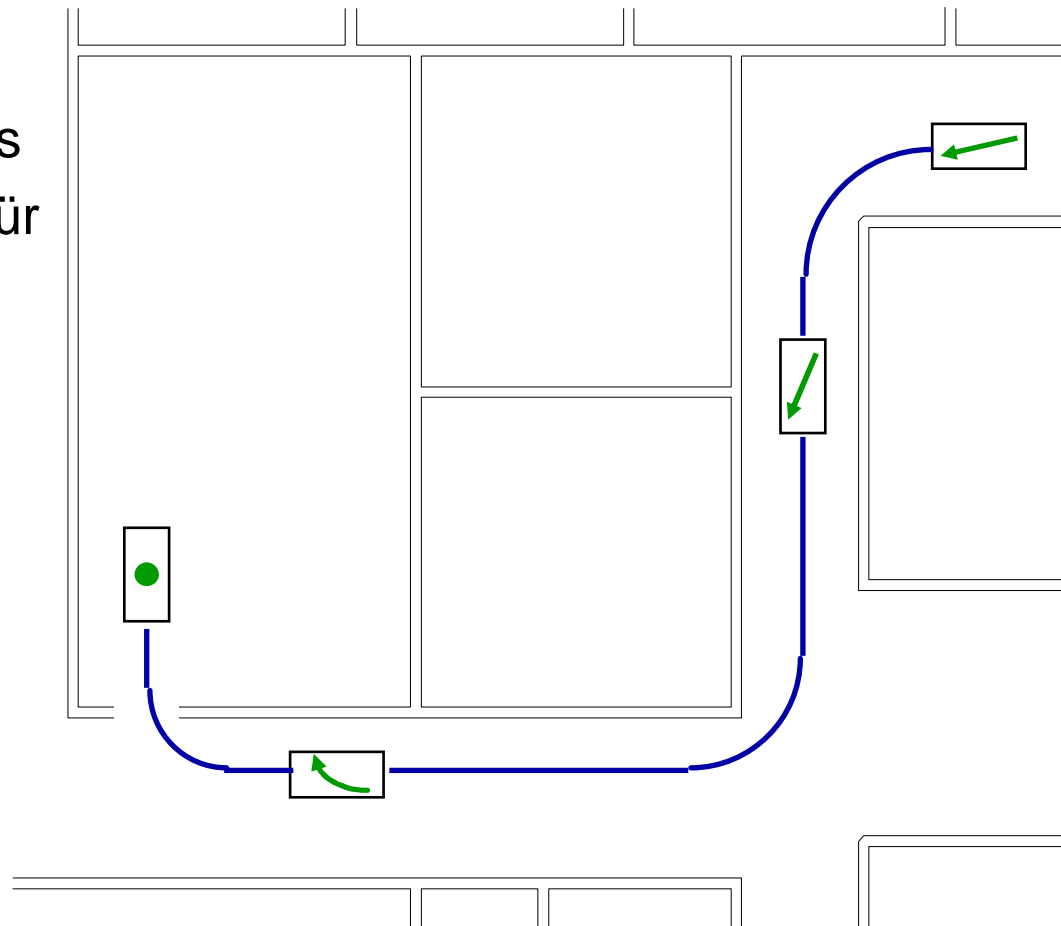
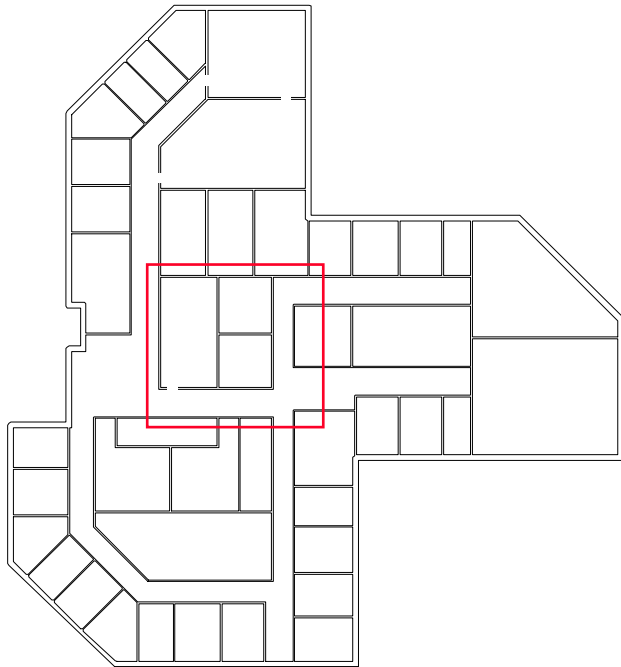
-  • Wandverfolgung rechts
-  • Einbiegen in rechte Tür
-  • Anhalten



Beispielroute

Verhalten

-  • Wandverfolgung links
-  • Wandverfolgung rechts
-  • Einbiegen in rechte Tür
-  • Anhalten



Der Bremer Autonome Rollstuhl (2. Prototyp)



Technische Daten:

- Meyra Modell "Genius 1.522"
- 6 km/h Höchstgeschwindigkeit
- Steuerung: Serielle Schnittstelle

Sensorik:

- 27 Nomad US-Sensoren
- (bis zu 16 Nomad IR-Sensoren)
- Interne Sensorik

Rechnerausstattung:

- Industrie-PC (Pentium 133)
- QNX (Realzeit-Betriebssystem)
- Vernetzung weiterer PCs

Sicherheitskonzept

Sicherheit in der Rehabilitationsrobotik

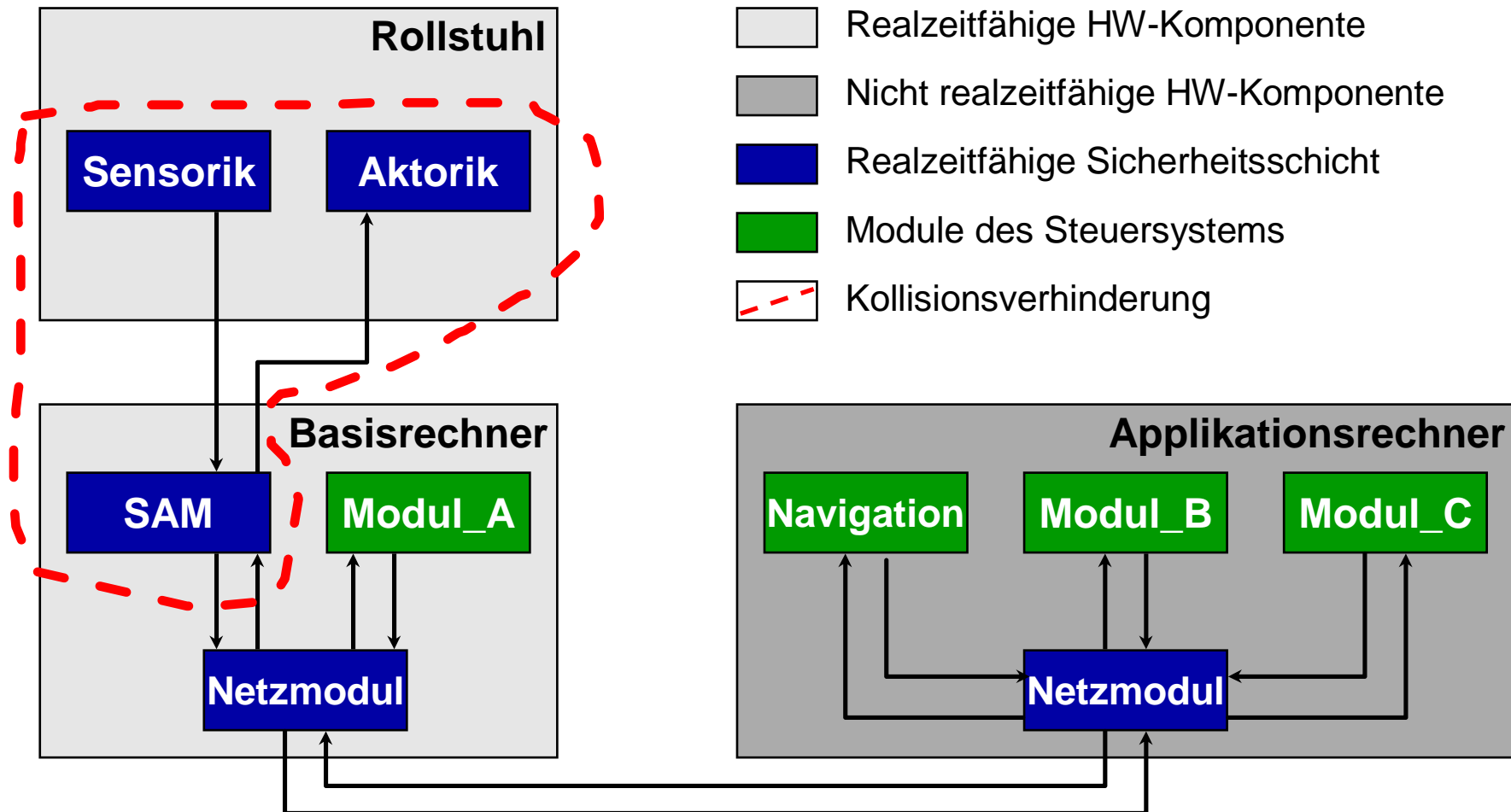


- Steigende unmittelbare Abhängigkeit des Menschen vom System
- Beweisbar korrektes Verhalten erhöht Akzeptanz

Resultierender Sicherheitsbegriff

- Nichteintritt eines *katastrophalen Systemzustands*
 - *Keine Kollision*
 - *Umsetzung der Anforderungen des Benutzers*

Basissystem *Sicherer Rollstuhl*



Realisierung mit *Formalen Methoden*

Bedrohungsanalyse per Fehlerbaum

- Systematische Hierarchisierung der Bedrohungen (Vollständigkeit)
- Abstraktion von Spezifika der Problemstellung

Formulierung von Sicherheitsbedingungen

Formale Spezifikation von Sicherheitsmechanismen

Formale Verifikation (durch Model-Checking)

- Implementierter Fehlerbaum überwacht System
- System “signalisiert” Fehler

Bedrohungsanalyse per Fehlerbaum

Fehlerbaum für mobiles Robotiksystem

Sicherheitsanforderungen des Gesamtsystems nicht erfüllt

- | 1 *Kollision* (auf Sensorhöhe)
- | 2 Zusammenstoß (nicht auf Sensorhöhe) #
- | 3 Absturz #
- | 4 Systemgefährdende Umweltveränderungen #
- | 5 *Steuersystem-Sicherheitsanforderungen nicht erfüllt*
- | 6 Betriebsparametergrenzen werden verletzt

Verfeinerungen mit Bezug auf Problemstellung

Vollständige systematische Hierarchisierung

Bedrohungsanalyse per Fehlerbaum

Teilfehlerbaum (Beispiel *Kollision*)

1 Kollision (auf Sensorhöhe)

| 1.1 Passive Kollision #

| 1.2 Aktive Kollision

| | 1.2.1 Fataler Sensorikfehler

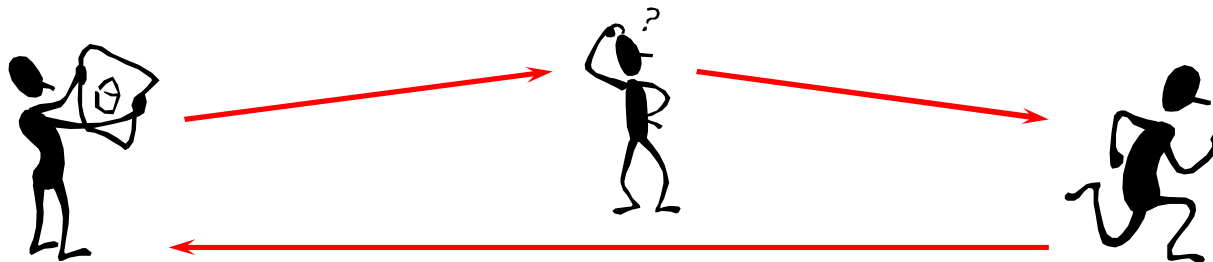
| | 1.2.2 Fataler Aktorikfehler

| | 1.2.3 Sensorik/Aktorik-Modul-Fehler

| | 1.2.4 Fataler Übertragungsfehler (Basissystem)

| | 1.2.5 Basisrechnerausfall nicht erkannt

+ 1.2.6 Hindernis im Kollisionsbereich



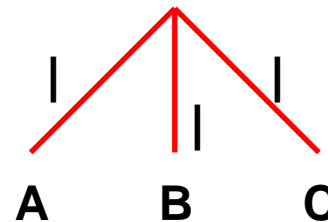
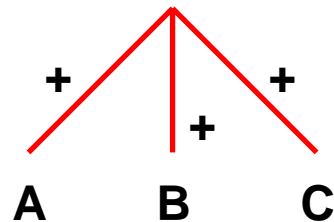
Formulierung von Sicherheitsbedingungen

Häufig Negation von Bedrohungen an Blättern

- Fehlerbaum:
 - 1.2.2 Fataler Aktorikfehler beim Bremsen
 - + 1.2.2.1 Ist folgt bei Bremsung nicht Soll.
 - | 1.2.2.2 Fehler wird nicht erkannt.
 - | 1.2.2.3 Notbremssystem versagt #
- Sicherheitsbedingung:
 - Es wird erkannt, ob die notwendige Geschwindigkeitsreduktion erreicht wurde.*

Sicherheitsmechanismen garantieren Bedingungen

“Angriffspunkt” abhängig von Verknüpfung



Spezifikation von Sicherheitsmechanismen

Formale Beschreibung (in CSP)

- Klare Spezifikation des Systemverhaltens
- Erlaubt anschließende formale Verifikation

Abhängig von Sicherheitsbedingung(en)

- Nicht unbedingt gegen Bedrohungen an Blättern des Fehlerbaums
- Evtl. wirksam zur Einhaltung mehrerer Sicherheitsbedingungen

Strategie: Prävention vs. Behandlung

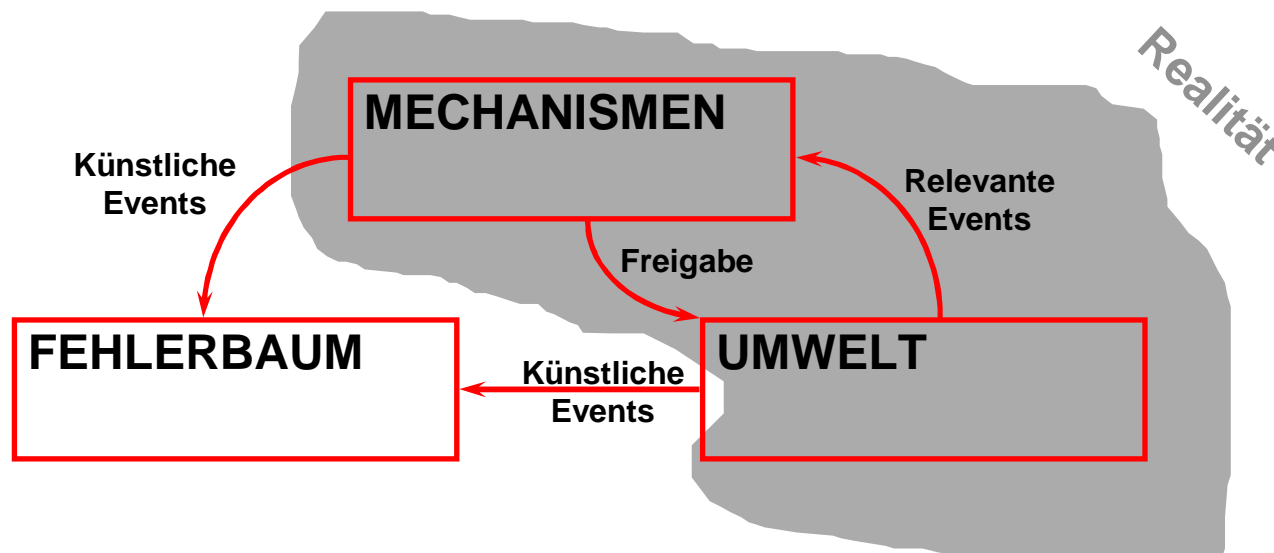
- Kollision auf Netzwerk *präventiv* durch Frame-Protokoll verhindert
- Virtuelle Sensoren auf lokaler Hinderniskarte *behandeln* Meßfehler

Hindern das System daran, fatale Fehler zu begehen

- Fehlverhalten wird blockiert
- Garantie der aufgestellten Sicherheitsbedingungen

Formale Verifikation durch Model-Checking

Implementierter Fehlerbaum als Kontrollinstanz



Formale Verifikation durch Model-Checking

Resultierende Modellierung des Systems

- (SAFEMs [| reale E. |] UMWELT) [| künstl. E. |] FEHLERBAUM
- Berücksichtigung der Zeit in Form diskreter Schritte

Zu verifizierende Systemeigenschaften

- Oberste Fehlerbaumbedrohung tritt niemals ein
- “Liveness”
- Spezielle Sicherheits- und Funktionalitätseigenschaften
 - *Realzeitbedingungen werden eingehalten*
 - *Gegenseitiger Ausschluß beim Zugriff auf gemeinsame Daten*

Formale Methoden in der Robotik

Strukturierte Bedrohungsanalyse mit Fehlerbaum

- Streben nach Vollständigkeit verbessert Systementwurf
- Erkenntnisse oberer Hierarchieebenen übertragbar
- Automatische Ableitung der Sicherheitsbedingungen möglich

Implementierter Fehlerbaum

- Generischer Ansatz für beliebige (eingebettete) Systeme
- Dient sowohl Model-Checking als auch automatisiertem Testen

Unterstützung von Robotikanwendungen

- Sicherheitsgarantien möglich
- Erhöhung des Marktpotentials durch größeres Vertrauen

Ausblick

Taxonomie der Navigation

- Psychologische Experimente
- Validierung der Modellierung

Anwendung auf den Rollstuhl

- Fahrassistent, Steuerung mit Fahrhebel / Spracheingabe
- Navigation in Gangsystemen
- Navigation in Räumen (mit Andocken)
- → Navigation in Gebäuden, z.B. mit Spracheingabe
- Navigation im Freien

Sichere Rehabilitationsrobotik

- Sichere Grundverhalten
- Automatisiertes Testen in der Robotik