

- Roboter benötigt Weltmodell, das die reale Welt auf innere Repräsentation abbildet
 - Information über Umweltbeschaffenheit
 - Sammlung von räumlichen Beziehungen

- Notwendige Informationen zur Aufgabenbewältigung
 - Navigation
 - Positionsbestimmung
 - Sensordatenverarbeitung

- Abstraktionsniveau
 - Sensordaten $\leftrightarrow$ Semantik
- Operationsraum des Roboters
 - 2D $\leftrightarrow$ 3D
- Umweltbedingungen des Roboters
 - Statisch $\leftrightarrow$ Dynamisch
- Anwendungsgebiet des Roboters
 - Strukturiert $\leftrightarrow$ Unstrukturiert
- Informationsgehalt

Abstraktionsniveau

Geometrische
Darstellung

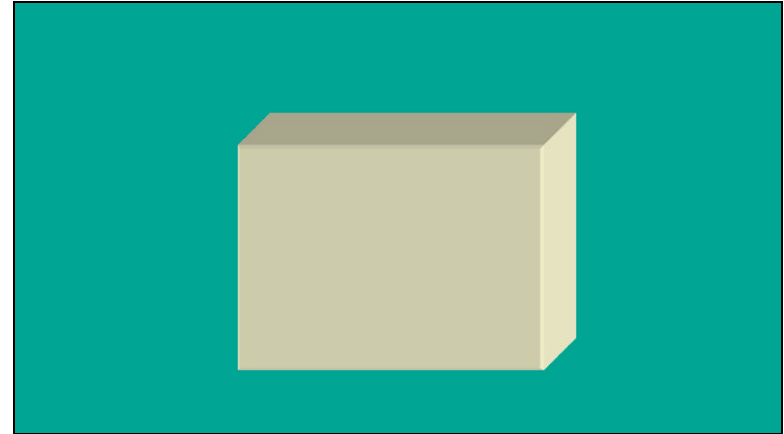
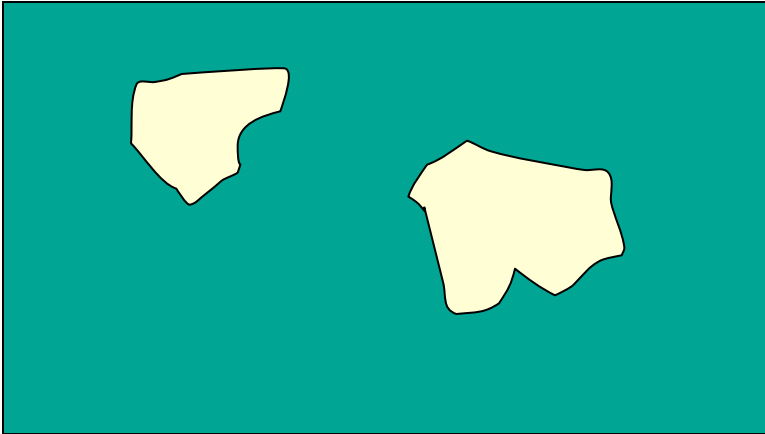
Topologische
Darstellung

Semantische
Darstellung

Ausdehnung und
Lage von Objekten

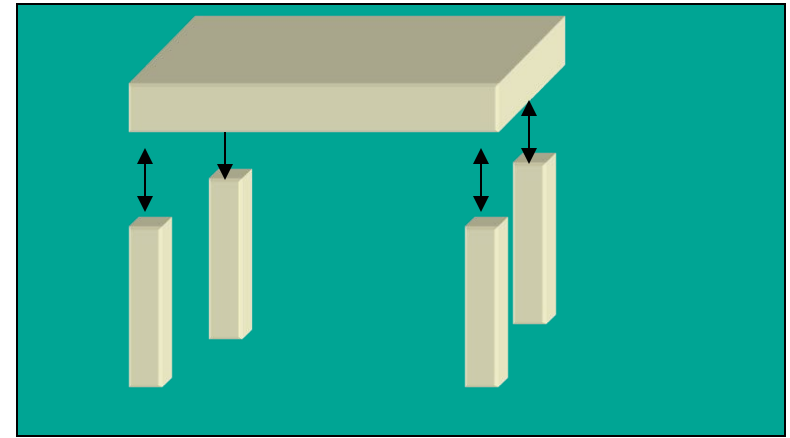
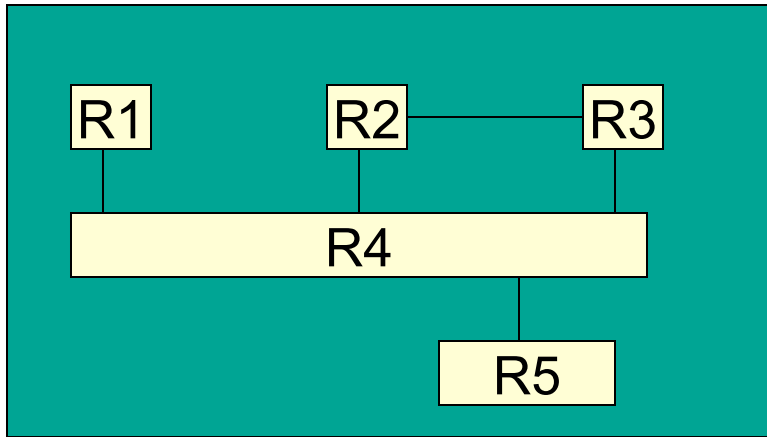
Erweitert um
Beziehung
zwischen Objekten
(Abstand)

Zus. Information
über Art und
Struktur der
Objekte



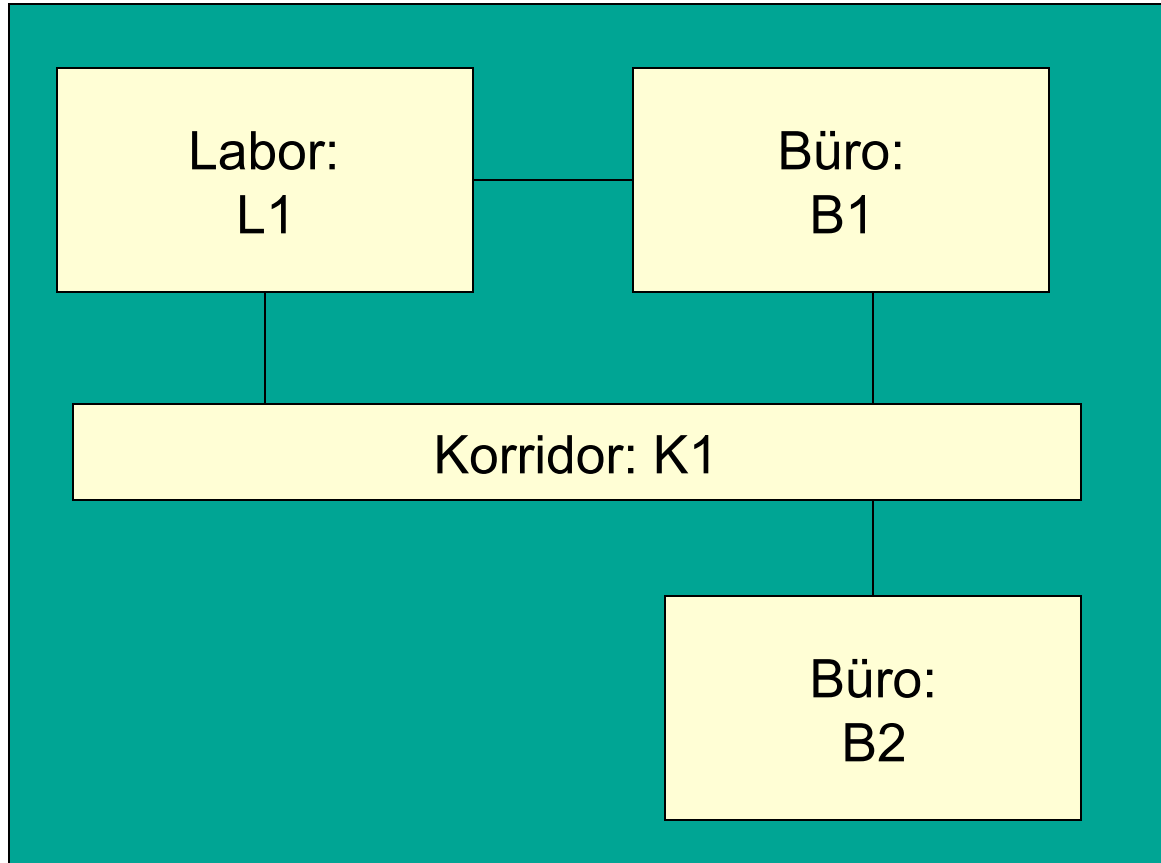
■ Anwendungen

- Bahnplanung feinkörnig
- Aktives Messen
- Objekterkennung (Basisobjekte)
- Fahren von P_1 nach P_2



■ Anwendungen

- Planung (Manipulationsplanung, mittlere Körnigkeit, Bahnplanung)
- „Fahre von Raum 1 nach Raum 5“



■ Anwendung

- Planung auf Aufgabenebene
- „Fahre durch alle Büros“

Operationsraum

2-dimensional

2 ½-
dimensional

3D-Szene

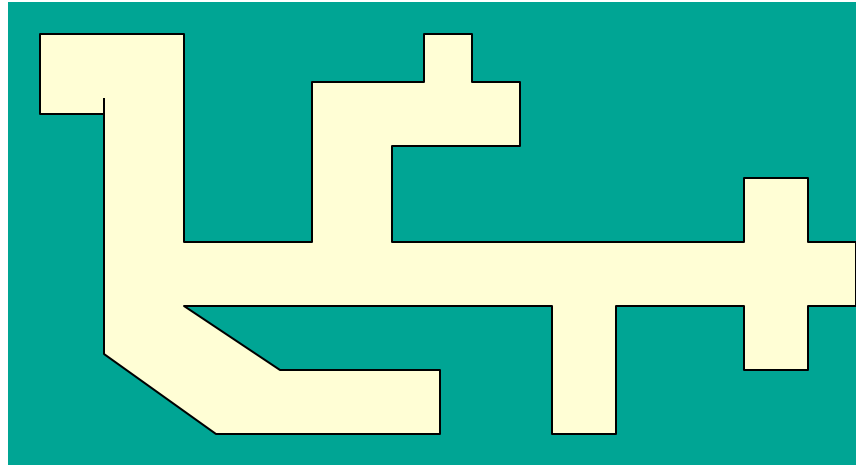
Alle Objekte auf x-
y-Ebene projiziert

Reduzierung auf
ebene Geometrien

Anheben ebener
Geometrien
senkrecht zur
Basisebene
„Sweeping“

Objekte der realen
Umwelt

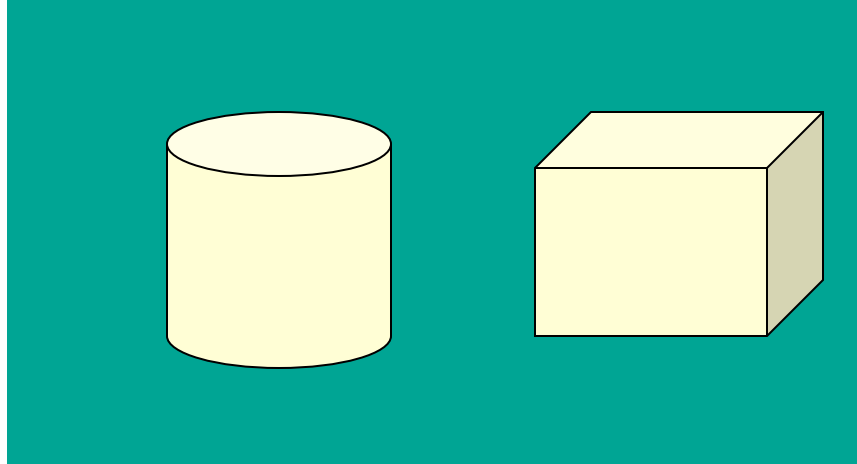
2-dimensionale Darstellung



■ Anwendung

- Bahnplanung mobiler Roboter
- Werkstückanalyse → Bahnplanungen einfach
- 2-D-Bearbeitung

2 ½-dimensionale Darstellung



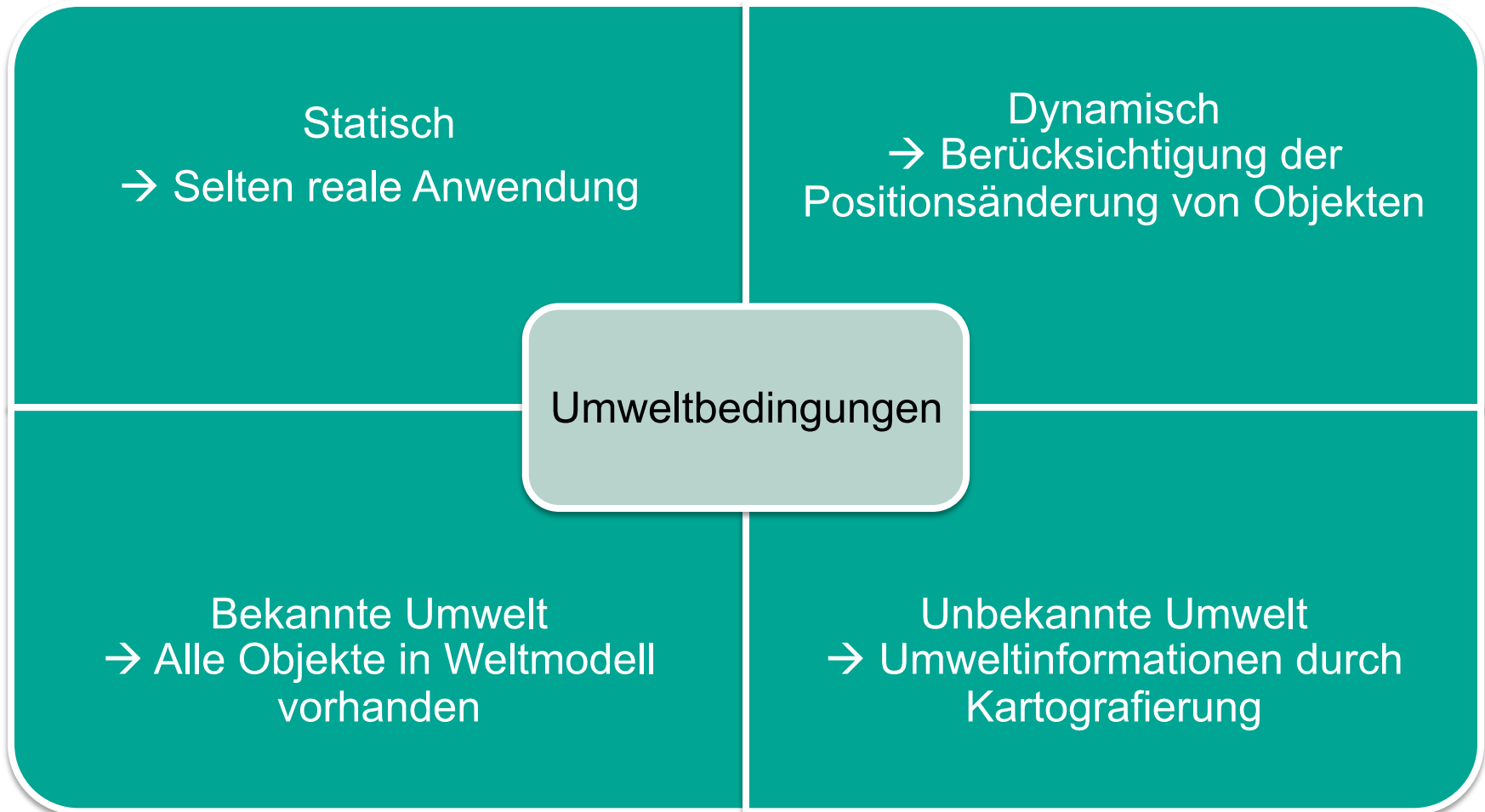
■ Anwendung

- Approximation unbekannter Objekte
- Niedrigere Komplexität als 3D
- Einfache 3D-Welten → Bahnplanung einfach

3-dimensionale Darstellung

- Komplexe Umweltmodellierung
- Realistische Modellierung
- Komplexe Sensorik
- Komplexe Planung





Anwendungsgebiet

Strukturiert

Wenige
verschiedene
Objekte

Gut wahrnehmbare
Bewegungsgrenzen,
Fahrflächen

Meist in
geschlossenen
Räumen

Unstrukturiert

Häufig im freien
Gelände

Wichtige
Fehlerquellen:
→ unebener,
rutschiger
Untergrund
→ fehlende
Landmarken

Informationsgehalt

Pfade

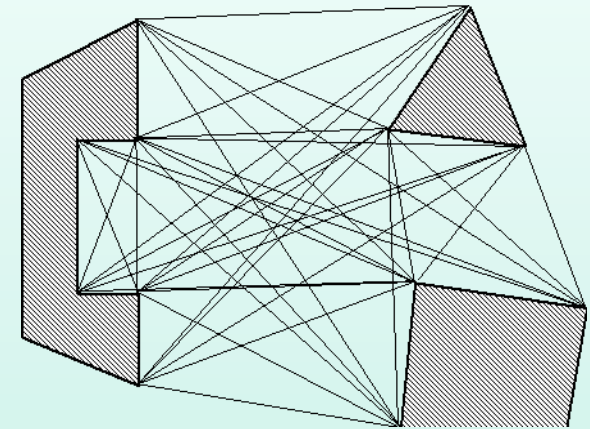
Freiraum

Objekte

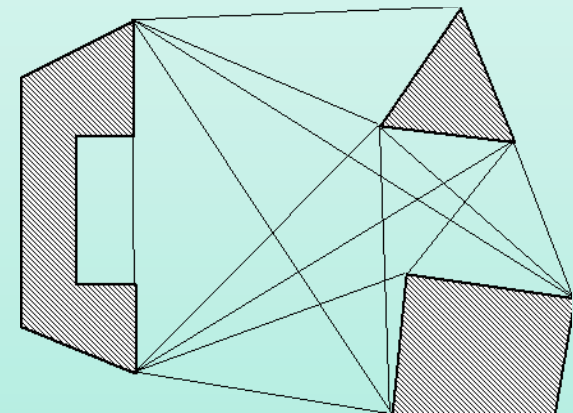
Gemischte
Modelle

- Normal: 2 bis 2 ½-dimensionalen Raum
- Polygonale Beschreibung der Objekte
- Pfad: lineare oder nichtlineare Verbindung zweier Punkte im Operationsraum
- Speicherung der Umwelt- und Planungsinformation
- Repräsentation als ungerichteter Graph

- Einfache Umweltdarstellung, partielle Modellierung
- Kollisionsfreie Bewegung nur auf gespeicherten Pfaden
- Sichtbarkeitsgraphen zur automatischen Generierung von Pfaden



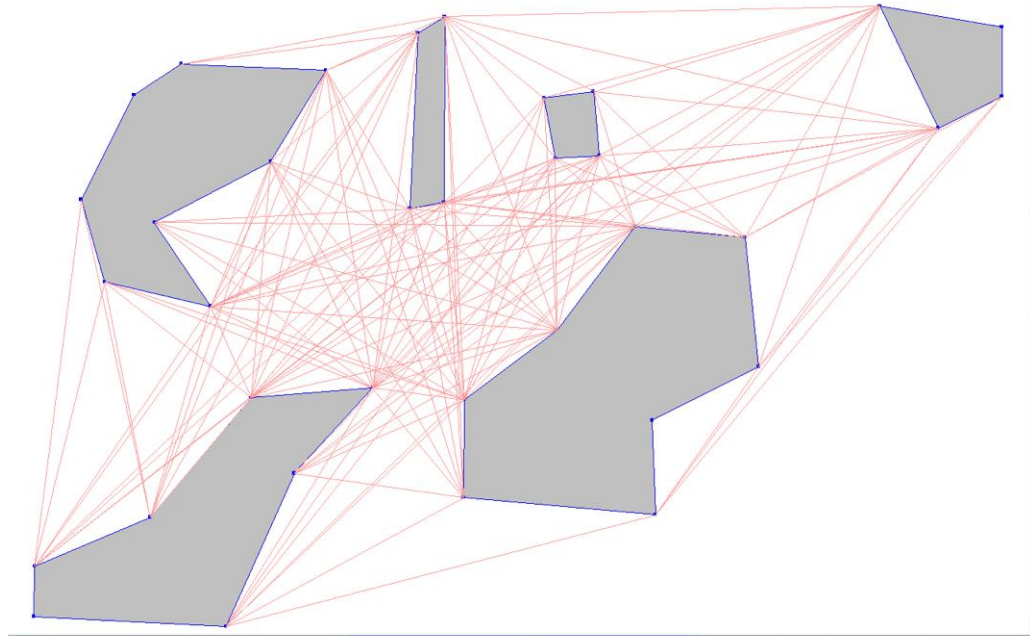
Sichtbarkeitsgraph



Tangentengraph

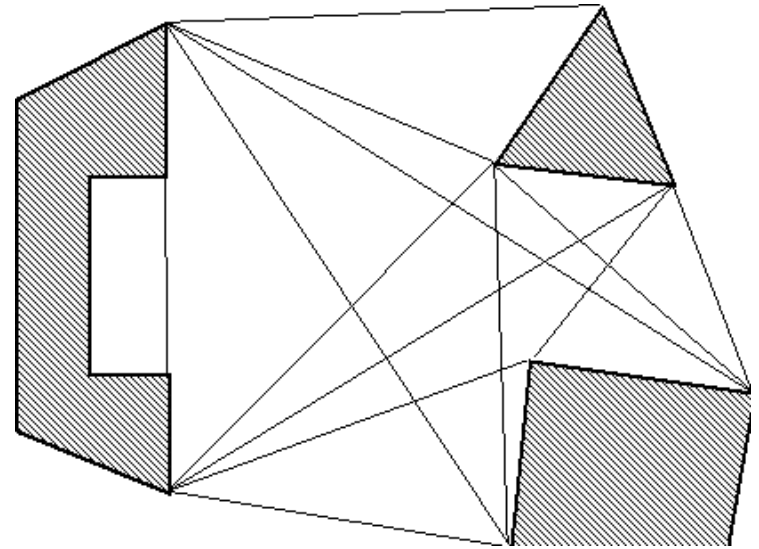
■ Sichtbarkeitsgraph

```
Obj := [Obj1, Obj2, ...]  
  
for i=1...#Obj  
  for j=1...#ObjPkte[i]  
    for k=i...#Obj  
      for l=1...#ObjPkte[k]  
        if (Sichtbarkeitstest(Obj[i].Pkte[j], Obj[k].Pkte[l]) == true)  
          NeuerPfad(i,j,k,l)
```



■ Applet: <http://www.geometrylab.de/VisGraph/index.html>

- Tangentengraph
- Gerichteter Graph
- Kanten sind Tangenten zu benachbarten Objekten
- Spezielle für Bahnplanung
- Jede kürzeste Route zwischen einem Start- und Zielpunkt ist Teilmenge des Tangentengraph



■ Tangentialalgorithmus

Verdoppele alle Kanten

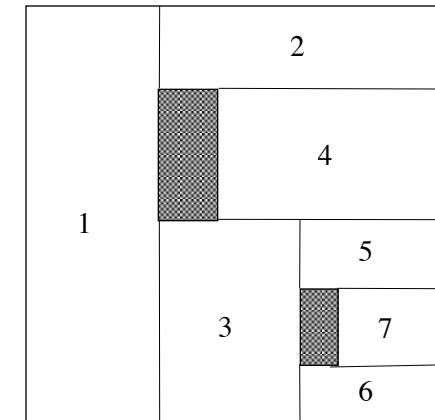
- Ungerichteter Graph $\rightarrow$ Gerichteter Graph

Für alle Bildpunkte aller Objekte:

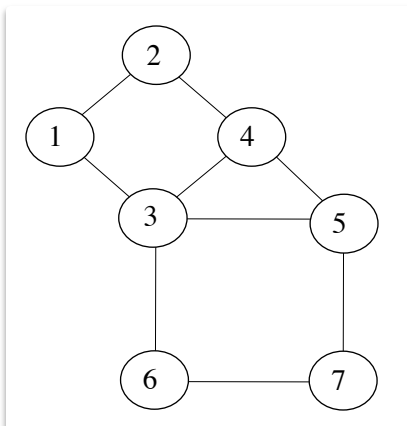
- Sortiere alle Kanten nach Zielobjekten

Wähle Kanten mit minimalem und maximalem Winkel

- Projektion der realen Welt in 2 - dim. Grundrissdarstellung
- Kollisionsfrei befahrbare Freiräume in geeignete Bereiche zerlegt
- Vorhandene Objekte und Hindernisse nicht berücksichtigt



Freiraummodell



Freiraumgraph:

Knoten: Freiraumbereiche

Kanten: Verbindung der Gebiete

■ Vorteile

- Geringere Komplexität der Wegplanung, reduzierter Zeit- und Rechenaufwand
- Fahrsicherheitsüberlegung deutlich vereinfacht
- Verbesserung der Anpassungsfähigkeit der Algorithmen an verschiedene Umwelten

Darstellungsformen der Freiflächen:

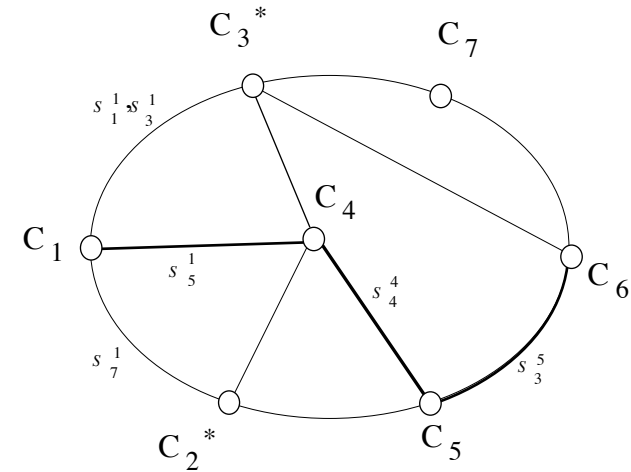
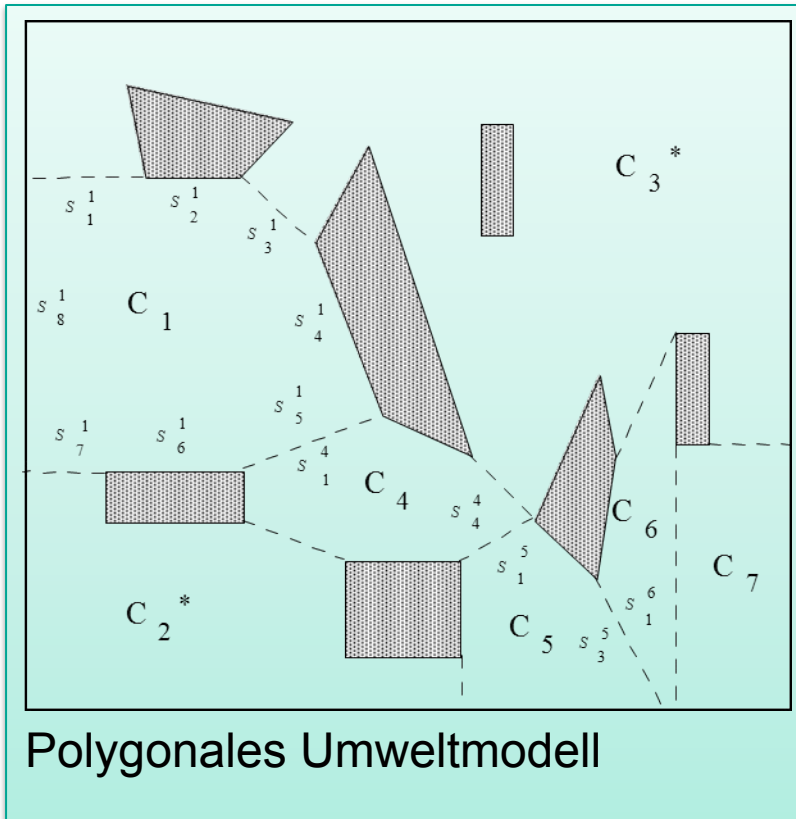
- konvexe Polygone
- allgemeine Kegel
- Kacheln

- Bahnplanung entspricht Graphensuche
- Startknoten entspricht Startfreiraumelement
- Endknoten entspricht Endfreiraumelement

- Optimierungsbedingungen
 - Fahrstrecke
 - Wegbreiten
- Algorithmen
 - Tiefensuche
 - Breitensuche
 - A*

Konvexe Polygone

■ Projektionsfläche als sortierte Liste aus Polygonsegmenten

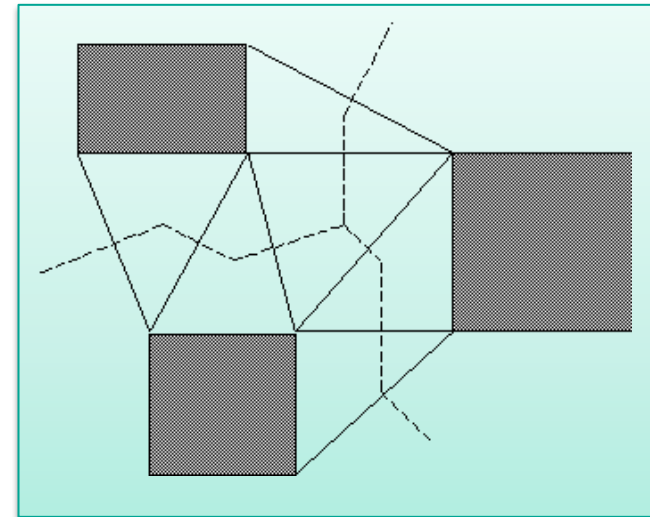


Verbindungsgraph

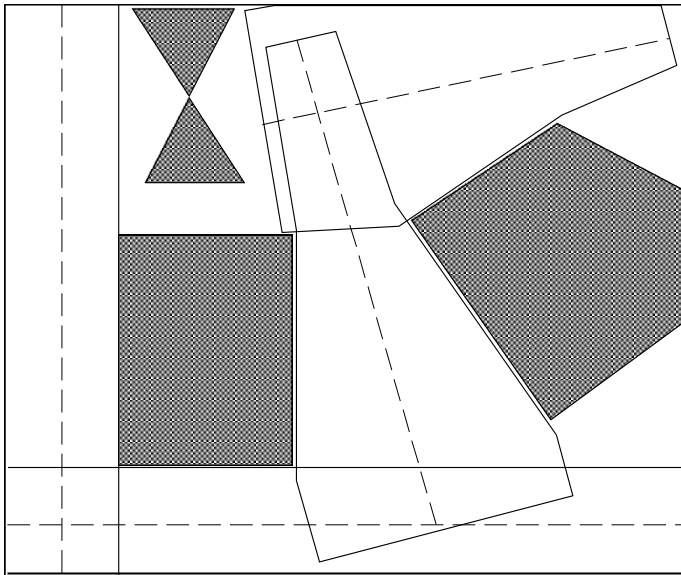
C - Zellen: bekannte Freiflächen
C* - Zellen: unbekannte Freiräume

→ Vorteil: verminderter Zeit- und
Rechenaufwand durch großflächige
Raumverteilung

■ primitives Verfahren :
Zerlegung in Dreiecke



- Grundidee: Kursnetz mit maximalem Abstand zu den Hindernissen



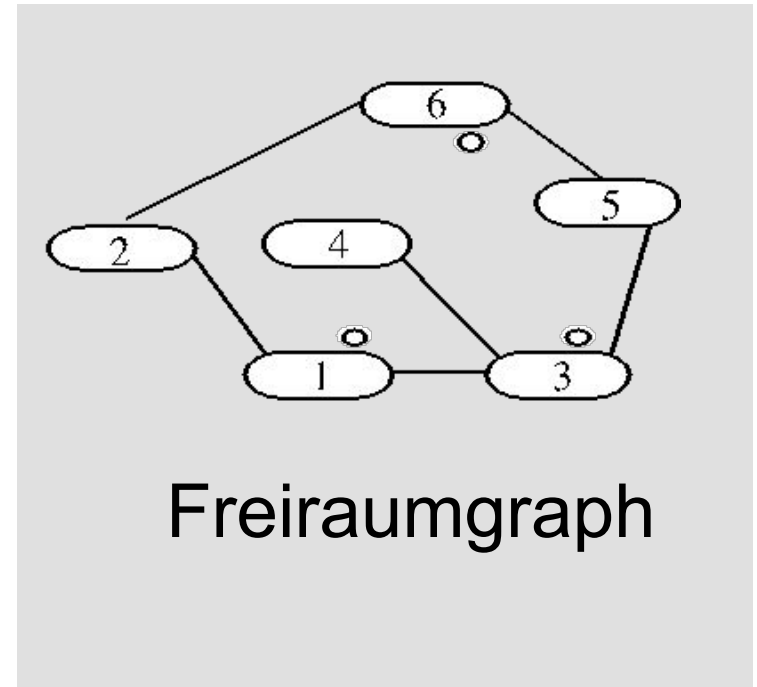
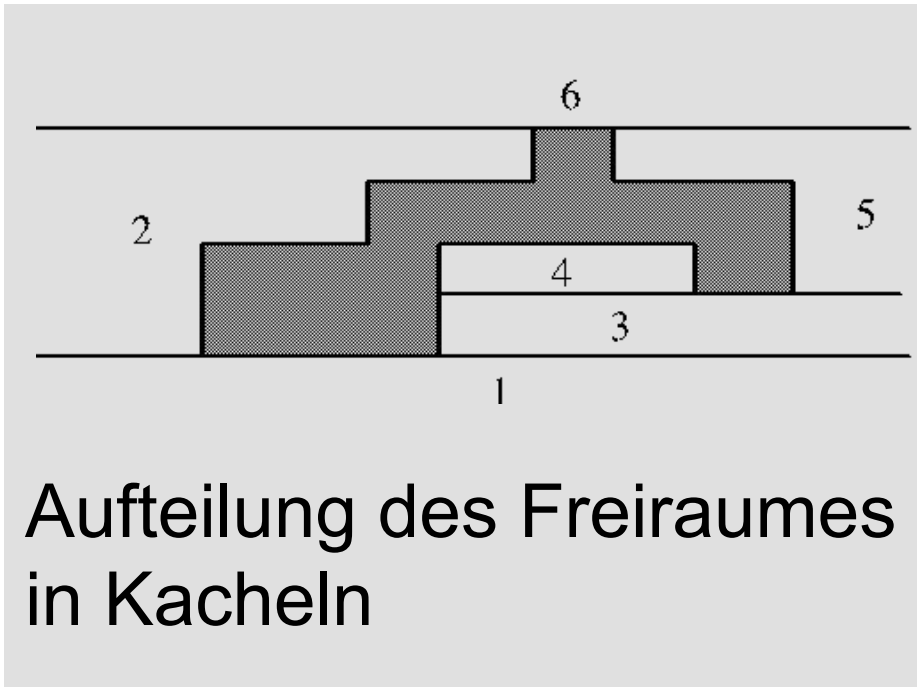
Verfahren:
paarweise Gruppierung von Kanten
falls Zwischenraum frei

Verwendung der Mittellinien
(Splines) zur Bahnplanung

- + Zusammenfassen großer Freiraumflächen
- Orientierung an Hindernissen (nur für statische Umgebung)

Kacheln

- Objektorientierte Datenstruktur
- Objekt = Menge von Linien



Aufteilung des Freiraumes
in Kacheln

Freiraumgraph

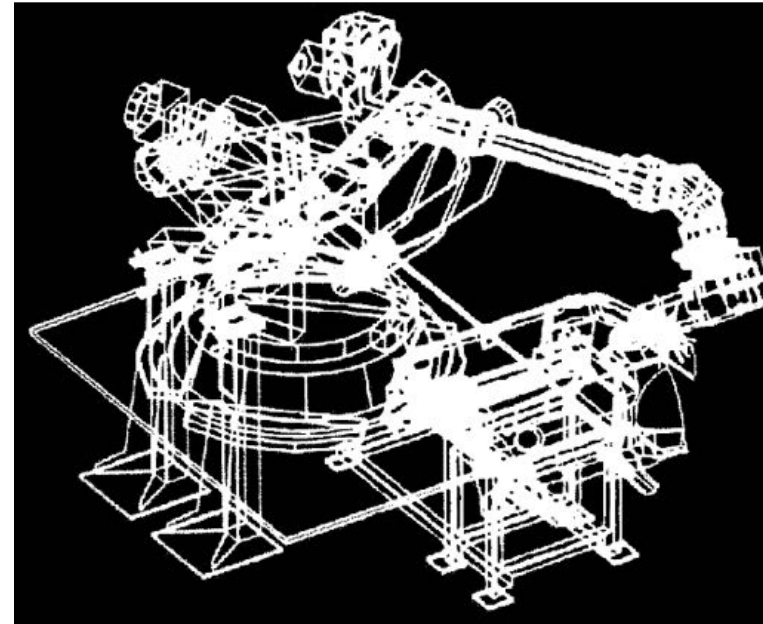
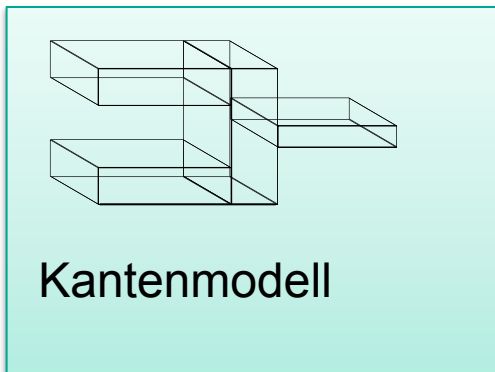
- Darstellung der Objekte der realen Umwelt (Türen, Wände, Hindernisse)
- 3- dim. Darstellung der Umgebung aus Sensorwahrnehmungen
- Projektion auf x-y - Ebene für Navigation bodengebundener Roboter ausreichend

Verschiedene Darstellungen

- Kantenmodelle
- Oberflächenmodelle
- Volumenmodelle

Kantenmodelle (wire frames)

- Ermittlung von markanten Punkten
- Verbinden durch geeignete Kanten auf Oberfläche des Objekts



Kantenmodell zur Simulation
von Schweißaufgaben

■ Nachbildung der Objektoberflächen

- Darstellung ebener Flächenelemente mit Polygonen

- gekrümmte Flächenelemente:

 - math. beschreibbar (Zylinder, Kegel, Torusfläche)

 - näherungsweise durch Freiformflächen (patches)

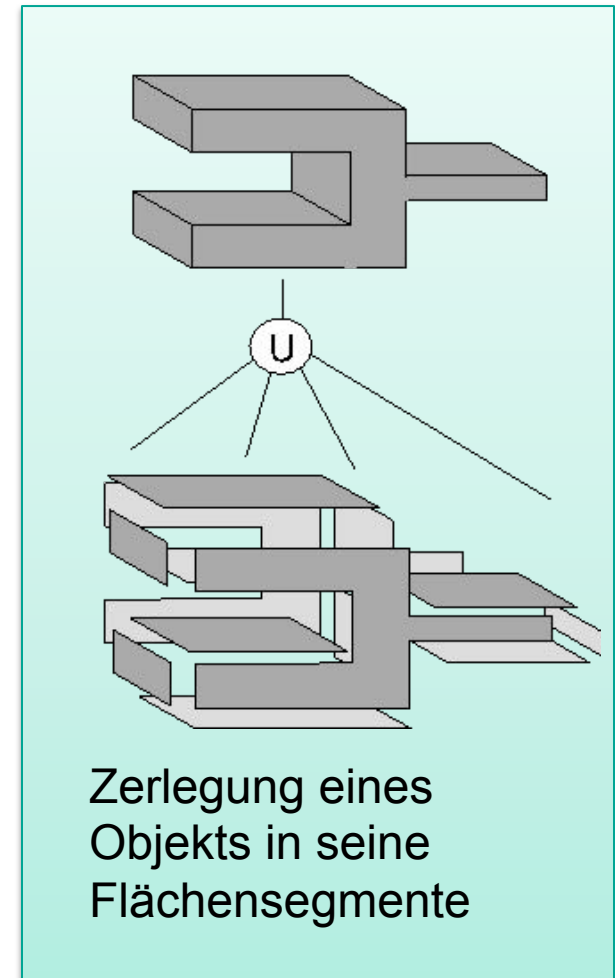
Volumenmodelle (solid model)

- Unterscheidung von Raumpunkten hinsichtlich ihrer Lage zum Objekt (innen- außenliegend)
- Repräsentationsmöglichkeiten:

- Begrenzungsflächenmethode
- Grundkörperdarstellung
- Cell Decomposition
- Volumenapproximation
- Einhüllende Quader
- Geradensegmente

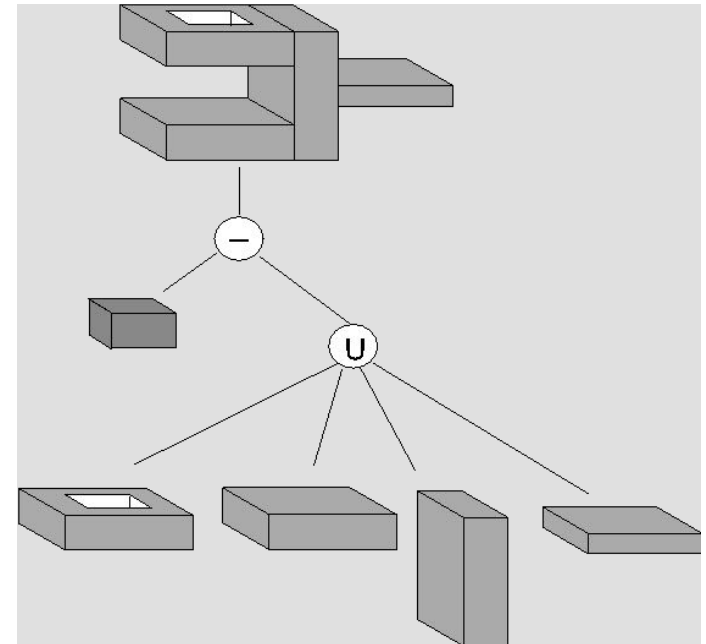
Begrenzungsflächenmethode

- Beschreibung des Körpers durch umgebende geom. Elemente (Flächen, Kanten, Punkte)
- festgelegter Richtungssinn
→ Volumen beschrieben durch Flächennormale

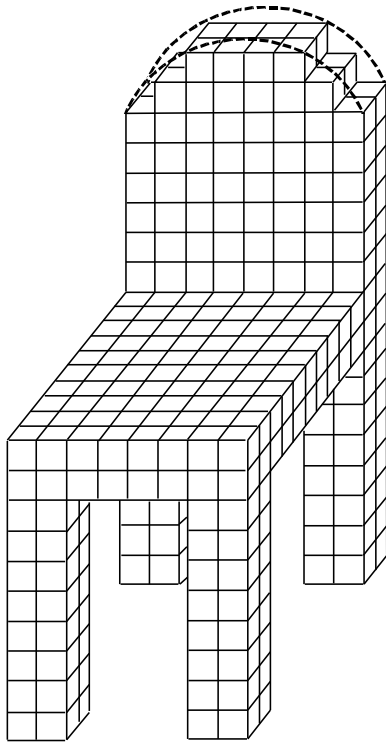


Grundkörperdarstellung

- Zusammensetzung von Körpern aus parametrierbaren Grundelementen
- relevante Parameter müssen bekannt oder gespeichert sein
- Transformationen zur Positionierung im Koordinatensystem, übliche boolsche Operatoren ($\cup, \cap, -$)
- Nachteil: hoher algorithmischer Aufwand



- Zusammensetzung aus Einzelelementen
 - Zerlegung komplizierter Körper in einfache Teile
- „Kleben“ von Objektkomponenten, kein durchdringen
 - ↔ Grundkörpermethode



- *Spatial occupancy*
- Objektbeschreibung durch Würfel
- Zerlegung von großen, nur teilweise enthaltenen Würfeln in acht kleinere
- Solange durchführen, bis gewünschte Feinheit der Approximation erreicht

- Objektbeschreibung durch Quader unterschiedlicher Größe $\Leftrightarrow$ Volumenapproximation
- disjunkte Quader beschrieben durch Eckpunkte im kartesischen Koordinatensystem
- Feinheit der Approximation bestimmt durch Quaderanzahl

Erkennung bzw. Generierung von Geradensegmenten

Parametrische Umweltdarstellung aus Sensormessungen

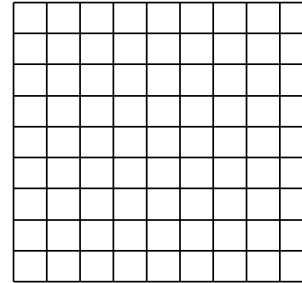
Zusammenfassen von Messwerten zu Regionen konstanter Entfernung, Darstellung als Geradensegmente

Erkennung von zylindrischen Hindernissen, konvexen und konkaven Ecken

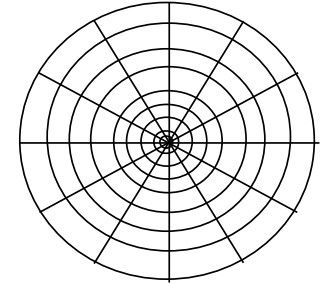
- In der Forschung am häufigsten eingesetzt
- Unterschied zu bisherigen Modellen: Erfassung von Freiräumen und Objekten
- wichtigste Methoden:

- Gitter- bzw. Rasterdarstellungen
- Methode des Konfigurationsraumes

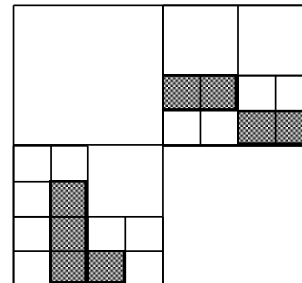
- Zwei bzw. dreidimensionale Rasterstruktur
- Annäherung der Form des Hindernisses durch Anzahl zugehöriger Zellen



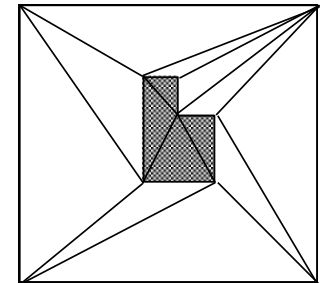
Quadratisches Gitter



Sphärisches Gitter



Hierarchisches Gitter



Beliebige Gitterstruktur

- Zweidimensionales Raster über Roboterumgebung
 - Quadratische Gitter
 - Eindeutige Positionsbeschreibung durch kartesisches Koordinatensystem
 - Sphärische Gitter
 - Zentriert auf Roboter
 - Parameter: Azimuth, Distanz
 - Vorteil: einfache Übertragung von Sensordaten (in sphärischen Koordinaten) in das Gitter

Gitterbasierte Ansätze aus der Multisensorfusion

- Besonders für verrauschte, ungenaue Sensordaten (z.B. Abstandsmessungen von Ultraschallsensoren)
- Systeme zur Umwelterkennung verwenden kein a - priori Wissen, weil
 - selten komplett statische Arbeitsumgebungen vorliegen
 - aus menschlicher Umweltbeobachtung schwer eine Karte zu erstellen ist
 - eine sehr detaillierte Beschreibung erforderlich wäre

- Grundvoraussetzung für Sensorwerteintragungen in ein Gitter: Roboterposition muß bekannt sein
- Vorverarbeitung der Sensorwerte zur Zuverlässigkeitserhöhung der Messwerte
- sinnvolle Messentfernung R_u :

$$R_u = \min(R_g, R_{\max})$$

R_g : Abstand des Sensors zum Boden

$R_{\max}$: maximale Messentfernung

Besetzungswahrscheinlichkeiten

- Dem Messwert wird abhängig von seiner Position innerhalb der Schallkeule eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet
- Wahrscheinlichkeit für leere Zelle innerhalb des Sonarkegels:

$$\begin{aligned}
 p_E(x, y, z) &= p(\text{Position}(x, y, z) \text{ ist frei}) \\
 &= f_E(\delta) f_E(\varphi)
 \end{aligned}$$

$$f_E(\delta) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\delta - R_{\min}}{R - \varepsilon - R_{\min}} \right)^2 & \text{für } \delta \in [R_{\min}, R - \varepsilon] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$f_E(\varphi) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{2\varphi^2}{\omega} \right)^2 & \text{für } \varphi \in \left[-\frac{\omega}{2}, \frac{\omega}{2} \right] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

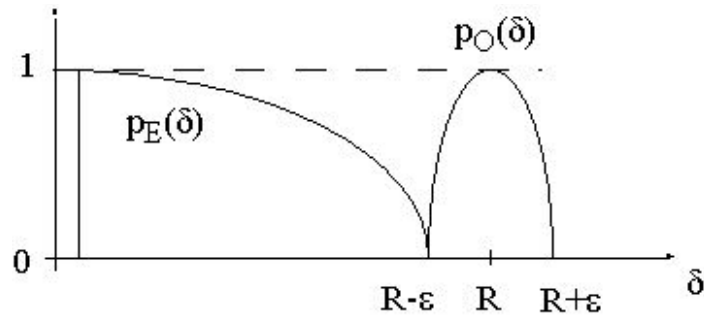
- Wahrscheinlichkeit für besetzte Zelle:

$$\begin{aligned}
 p_O(x, y, z) &= p(\text{Position}(x, y, z) \text{ ist besetzt}) \\
 &= f_O(\delta) f_O(\varphi)
 \end{aligned}$$

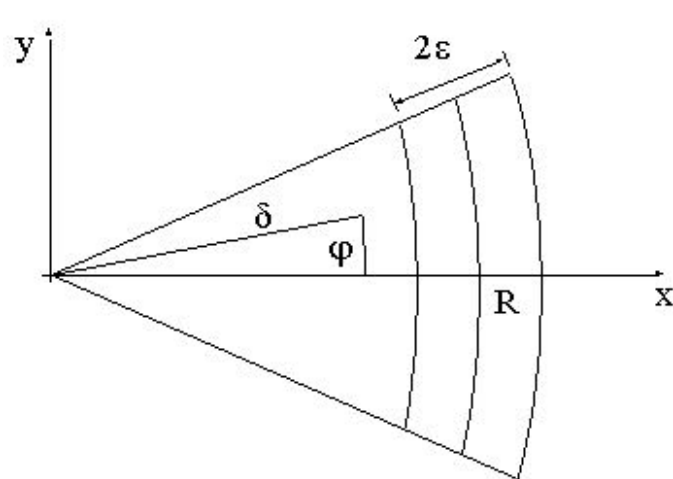
$$f_O(\delta) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\delta - R}{\varepsilon} \right)^2 & \text{für } \delta \in [R - \varepsilon, R + \varepsilon] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$f_O(\varphi) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{2\varphi^2}{\omega} \right)^2 & \text{für } \varphi \in \left[-\frac{\omega}{2}, \frac{\omega}{2} \right] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

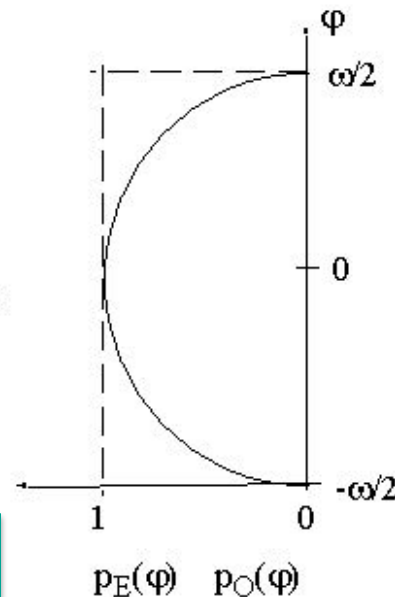
Besetzungswahrscheinlichkeiten



Abstandsbezogene
Wahrscheinlichkeitsverteilung



Projektion der Schallkeule



Winkelbezogene
Wahrscheinlichkeits-
verteilung

Vereinigung mehrerer Messungen bzw. Aktualisierung einer gespeicherten Karte

- Gliederung des Kartographierungsablaufs:
 - Initialisierung der Karte
 - Überlagerung der unbesetzten Bereiche
 - Überlagerung der besetzten Bereiche
 - Schwellwertprozedur zur Erstellung der endgültigen Karte
- Additionsformel bei Überlagerung der unbesetzten Bereiche:

$$p_E(Zelle_{neu}) = p_E(Zelle_{alt}) + p_E(Messung) - p_E(Zelle_{alt}) \times p_E(Messung)$$

- Überlagerung der besetzten Bereiche:

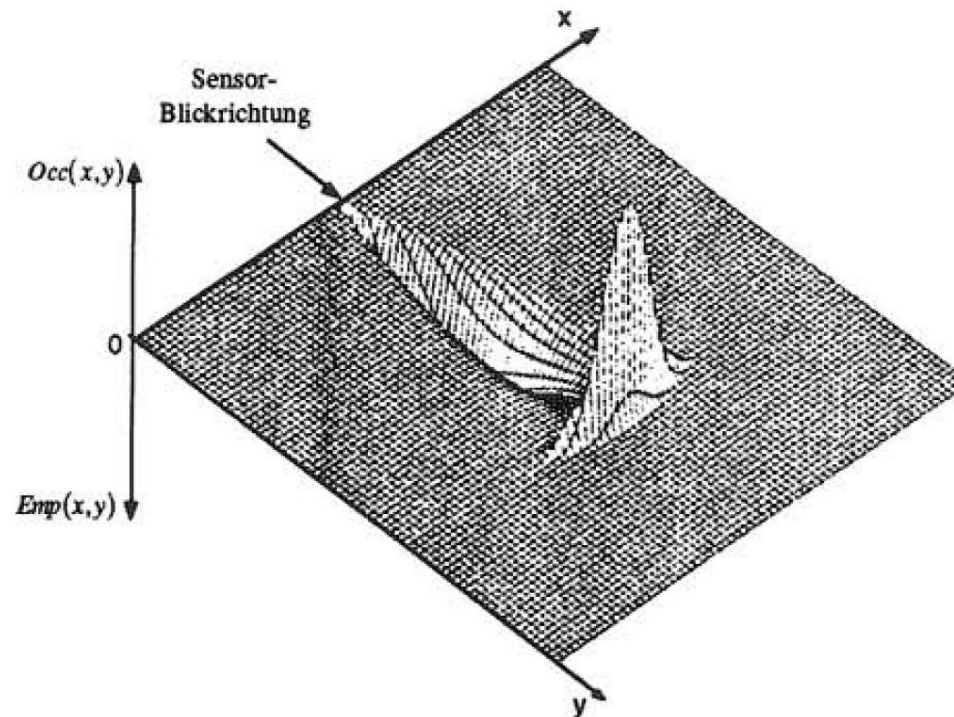
$$p_O(Zelle_{neu}) = p_O(Zelle_{alt}) + p_O(Messung) - p_O(Zelle_{alt}) \times p_O(Messung)$$

Vereinigung mehrerer Messungen bzw. Aktualisierung einer gespeicherten Karte

$$unbekannt = 0$$

$$Occ(x, y) \in (0, 1]$$

$$Emp(x, y) \in [-1, 0)$$

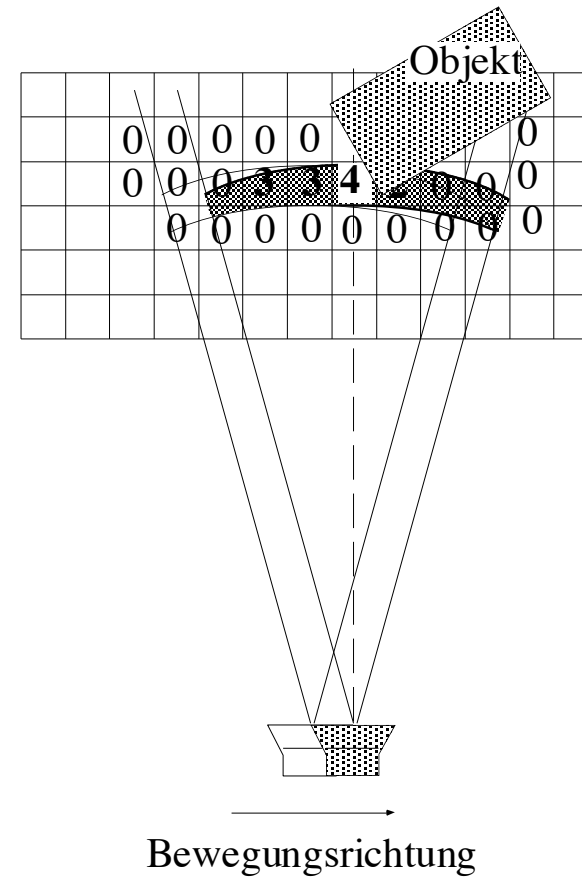
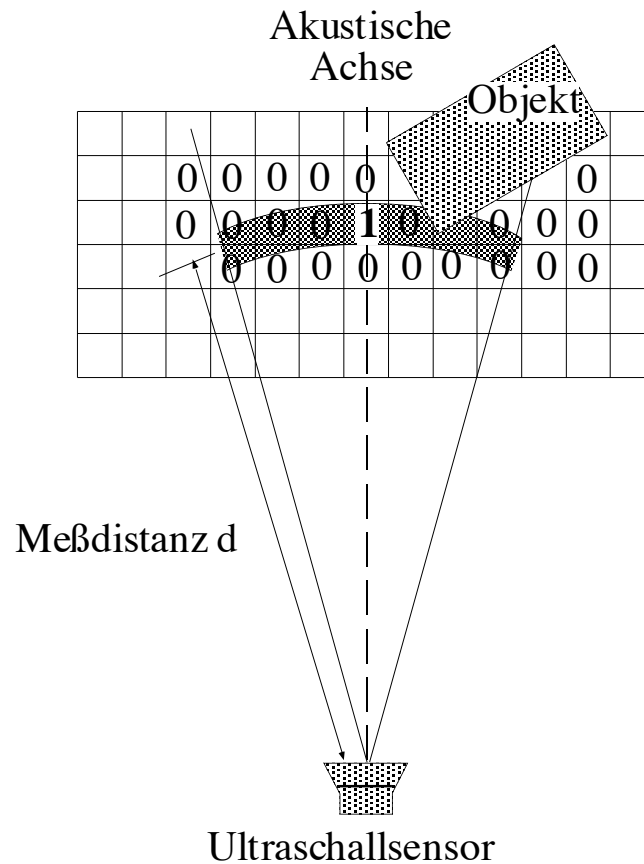


3D - Wahrscheinlichkeitsprofil einer Sensormessung

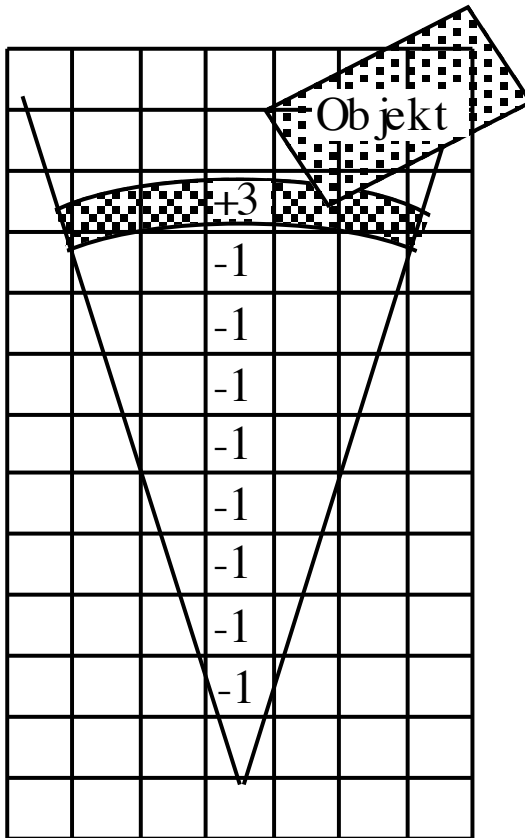
Wahrscheinlichkeitsgitter zur Echtzeitkartographierung

- Diskrete Belegungswerte zur Vereinfachung der Wahrscheinlichkeitsdichten aus dem Intervall $[0,15]$
- Hauptmotivation: geringer Rechenaufwand
- Methoden der Inkrementierung / Dekrementierung:
 - Inkrementieren des Belegungswertes einer Zelle mit eins, Inkrementieren der Zelle, die sich in der Messdistanz d auf der akustischen Achse befindet
 - Inkrementieren und Dekrementieren von Zellen auf der akustischen Achse, Inkrementieren des Belegungswertes der Zelle in Messdistanz d mit drei, Dekrementieren der Belegungswerte zwischen Zelle und Sensor mit eins.

Wahrscheinlichkeitsgitter zur Echtzeitkartographierung



Wahrscheinlichkeitsgitter zur Echtzeitkartographierung



- Keine Möglichkeit zur exakten Positionsbestimmung von Objekten
- Aber: ausreichende Genauigkeit zur Kollisionsvermeidung, Vorteil hierbei: Schnelligkeit des Verfahrens

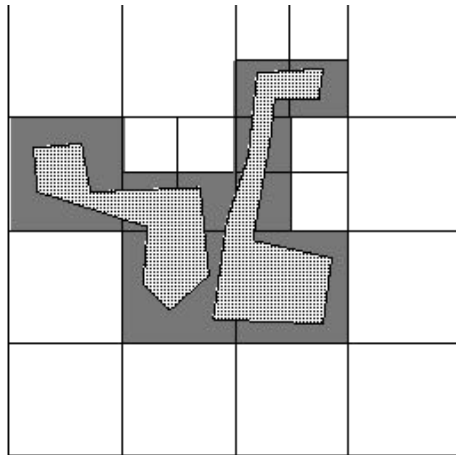
Inkrementierung und Dekrementierung
nach einer Messung

- Zerlegung der Roboterumgebung in gleichgroße Zellen
- Verfeinerung, wenn Hindernisse vorhanden sind in 4 (2-dim. „*Quadtree*“) bzw. 8 (3-dim. „*Octtree*“)
- Fortsetzung bis zur gewünschten Feinheit der Approximation

✚ Speichereffizient, schneller Zugriff

▬ Hoher Rechenaufwand zur Erstellung der Bäume
→ Ungeeignet für dynamische Umgebungen

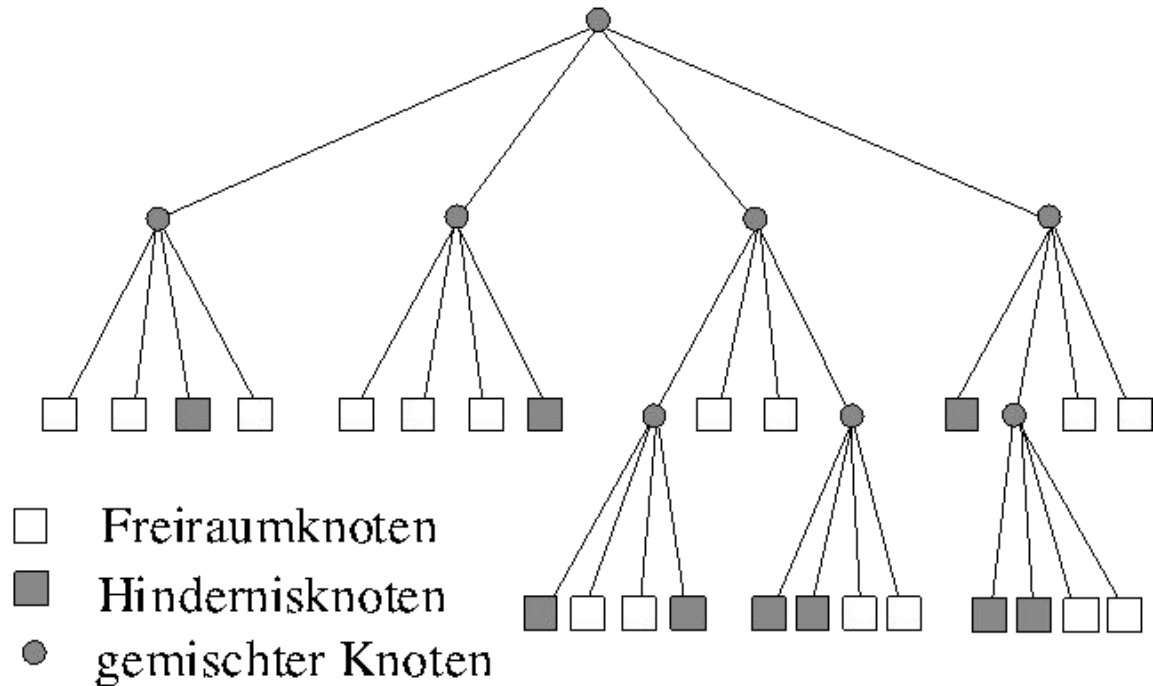
Hierarchische Zerlegung



-  Hindernisregion
-  Freiraum
-  Hindernis

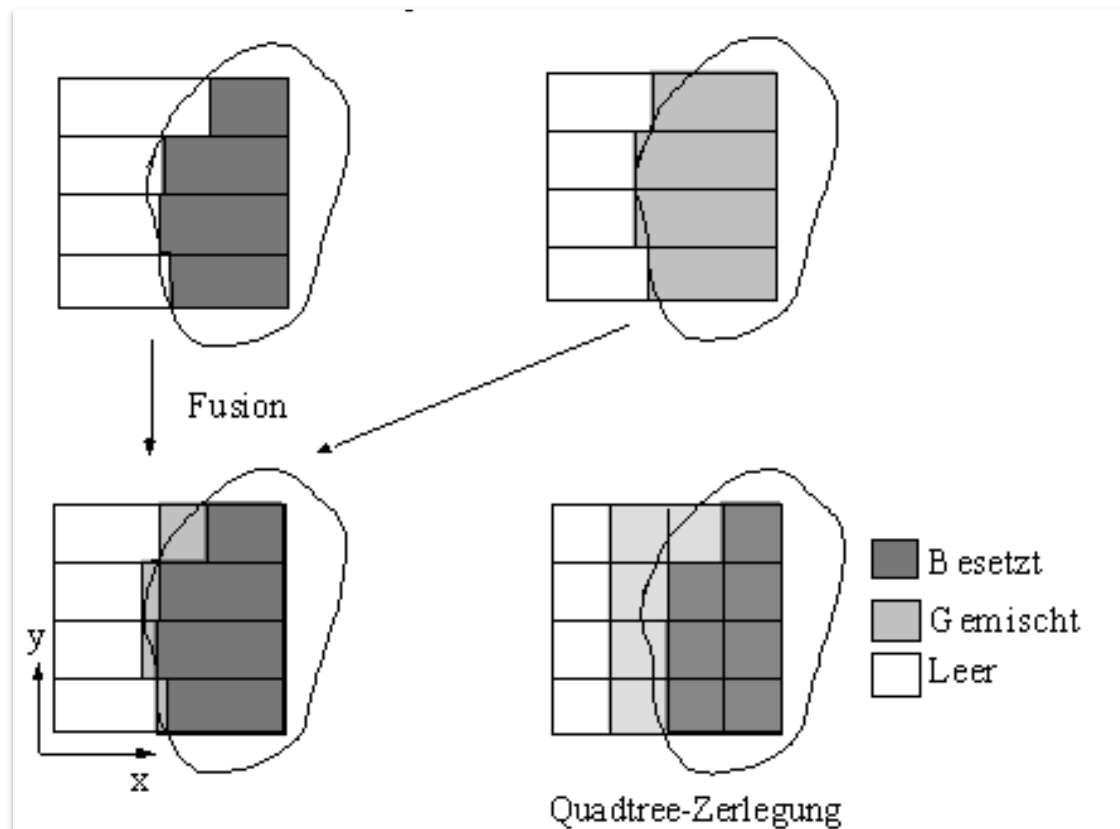
3	2
0	1

Reihenfolge zur Baumerstellung

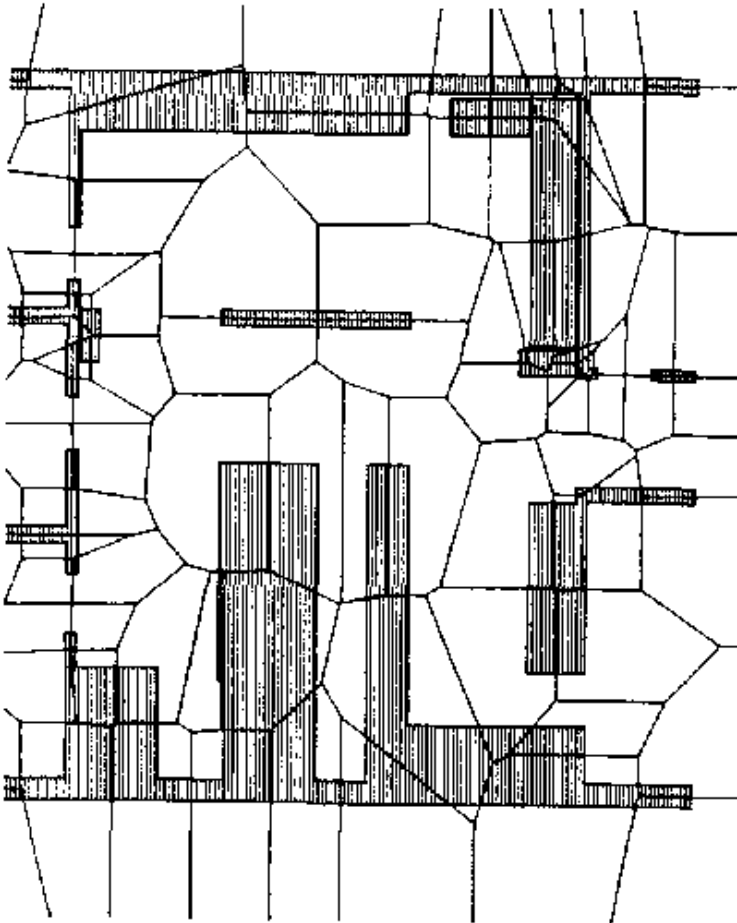


Zerlegung der Umwelt mittels Quadtree

- Vermeidung blinder Erzeugung großer Mengen von Zellen $\Leftrightarrow$ Quadtree

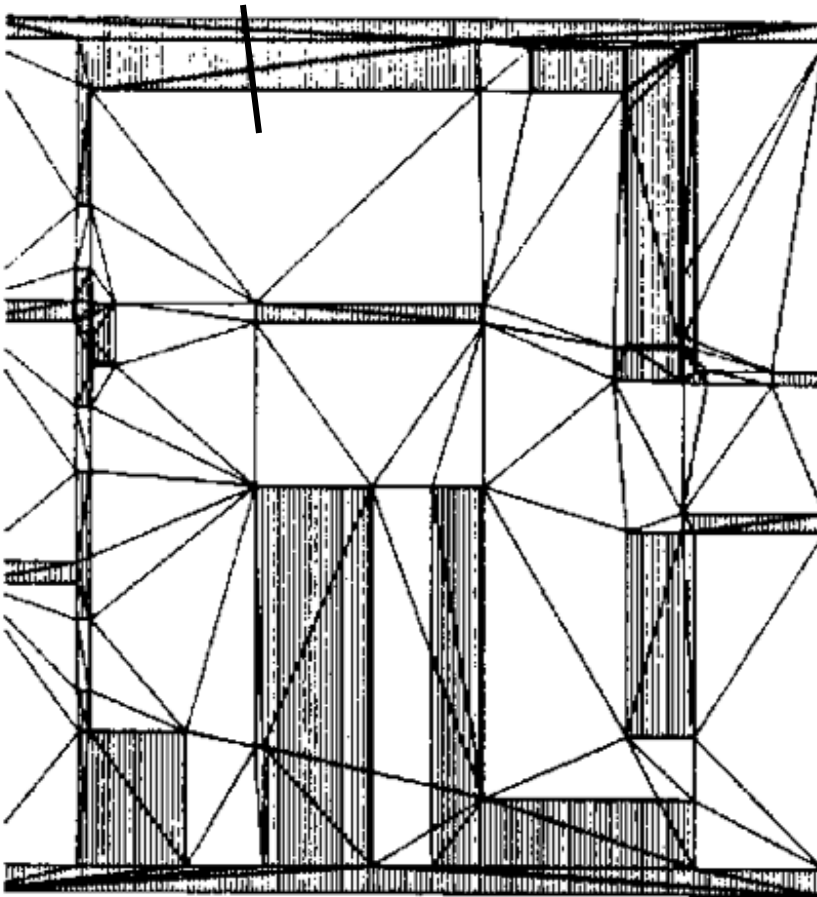


Zerlegung in Dreiecke

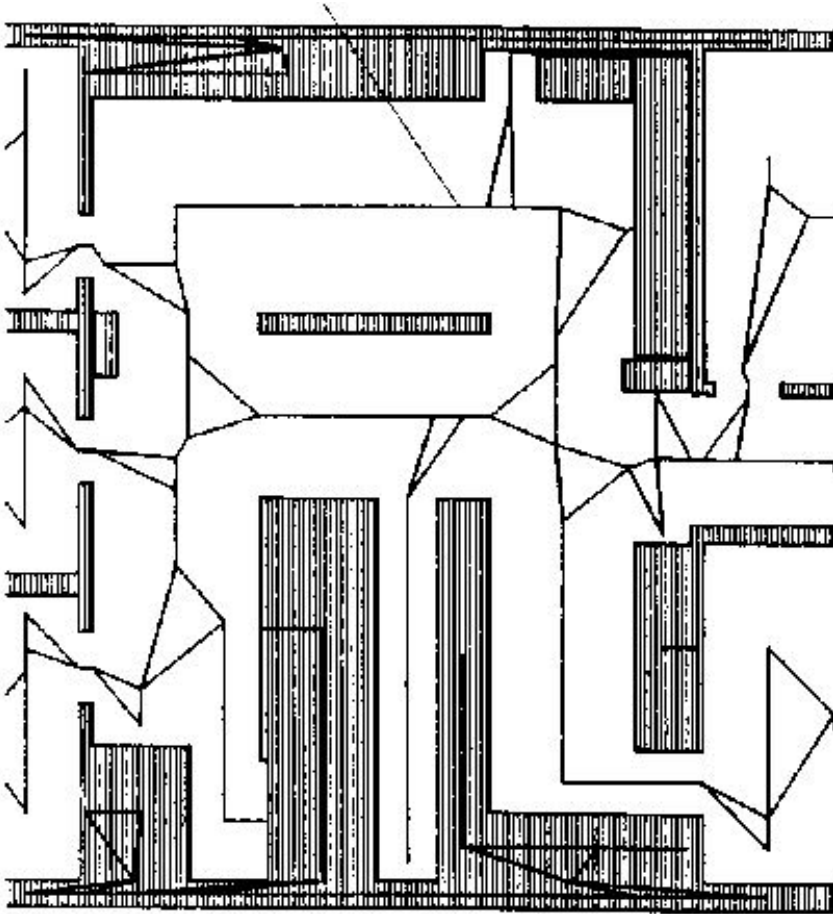


- Ausgangspunkt:
Voronoi -Diagramm
- Einteilungsgrundlage:
mittlerer Abstand der
Hinderniseckpunkte

Flächenelement

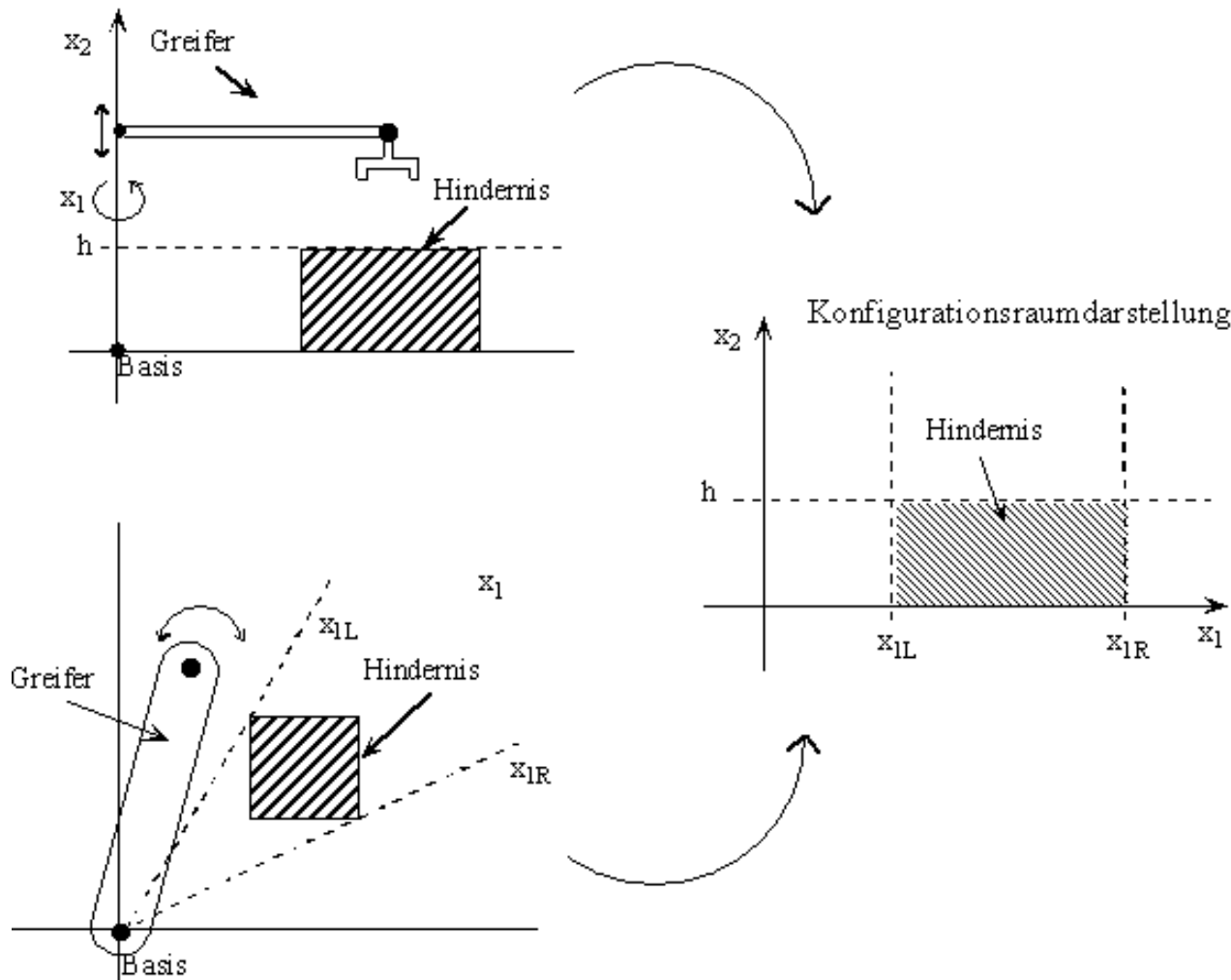


- Exakte Polygone, Hindernisse und Freiraum dazwischen darstellbar
- Dreiecksfläche besetzt, teilweise besetzt oder frei



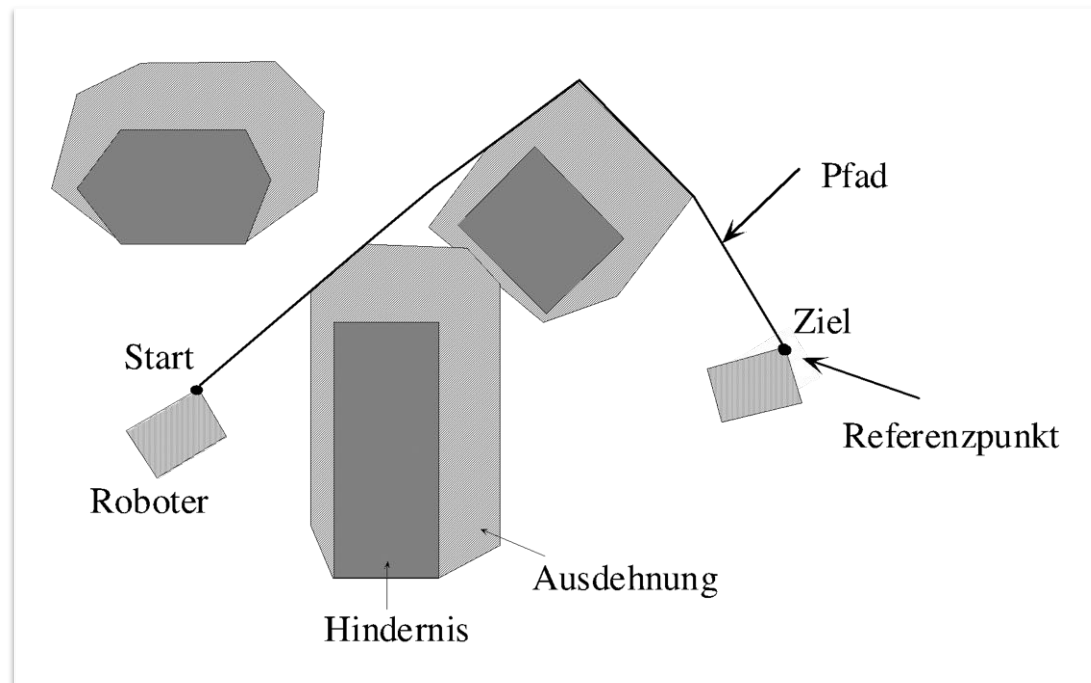
- Bewegungskanäle leicht zu finden
- Deutlich kleinere Anzahl raumbeschreibender Elemente als bei Rasterkarte

Konfigurationsraum



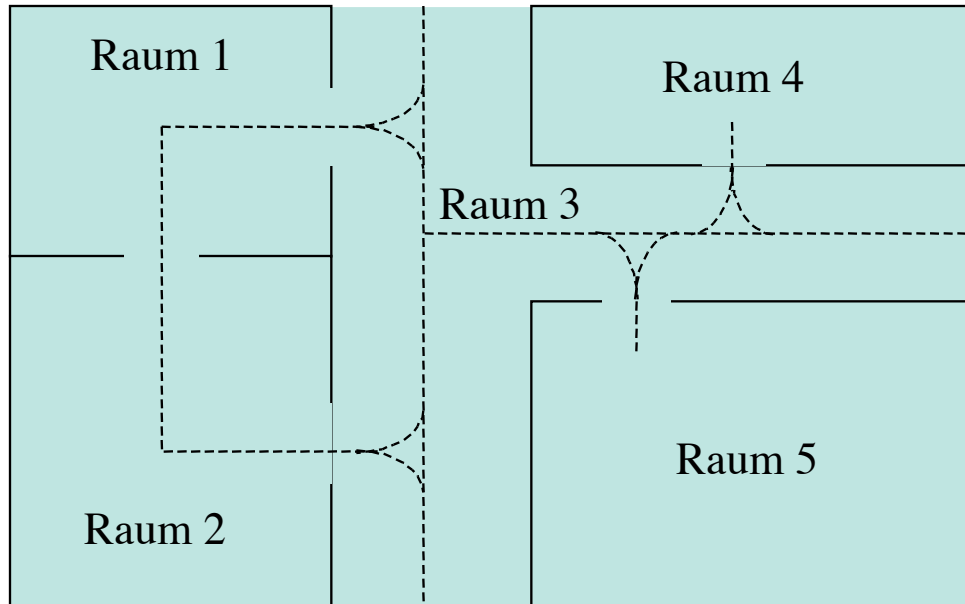
- Dimensionszahl entspricht Anzahl der Freiheitsgrade des Robotersystems
- hoher Rechenaufwand und großer Speicherbedarf

- Vereinfachte Darstellung: Reduktion beschreibender Geometrien auf Referenzpunkt
- „Aufblähen“ der Objekte

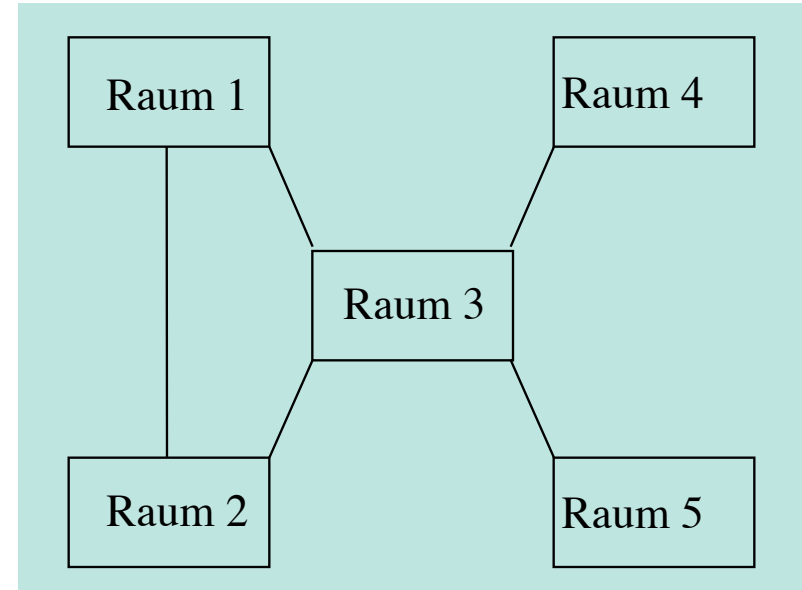


- Anordnung von Objekten und Umwelt relativ zueinander gespeichert
 - Beziehungen: links, rechts, verbunden, etc.
- Abgeleitet aus geometrischen Modellen:
Pfade z.B. aus *Voronoi*-Diagrammen und Potentialfeldern
- Darstellung als Graph- oder Baumstruktur
- Kurzfristige Verwendung anderer Modelle bei unerwarteten Hindernissen

Topologische Modelle II



Grundriss mit Fahrtrouten



Zugehöriger Graph,
Erreichbarkeit von Räumen

- Besondere Bedeutung im Rahmen der Mensch-Maschine-Kommunikation
- belegte Fläche als Objekt klassifiziert (z.B. Schrank, Stuhl), eingeordnet in topologische Beschreibung
- Objekteigenschaften verwertbar (z.B. geöffnete/ geschlossene Tür)

- Zugehörig zu semantischen Umweltbeschreibungen u.a.
 - Funktion eines Objektes, z.B. mobiler Roboter
 - Landmarken, die der Orientierung und Positionierung dienen
 - Geometrische Objekte, die stationär (z.B. Pfeiler),
quasistationär (z.B. Schrank) oder dynamisch (z.B. Papierkorb)
sein können
 - Topologische Umweltdarstellungen
 - Bewegungssequenzen, z.B. Fahrsequenz vom Fahrstuhl zur
Ladestation
 - Positionen