

Fazit Gyrodometrie

- Hoch plausible Ergänzung einfacher Odometrie
- Im deterministischen Fall auch genauso simpel
- Vorsicht bei echten Billig-Gyros (KURT): Bei Fahrt tritt unvorhersehbarer Salt-and-Pepper-Noise auf!
- Deterministische Gyrodometrie in der Literatur relativ selten aufgegriffen
- Kalman-Filterung von Odo+Gyro ist ein Standard

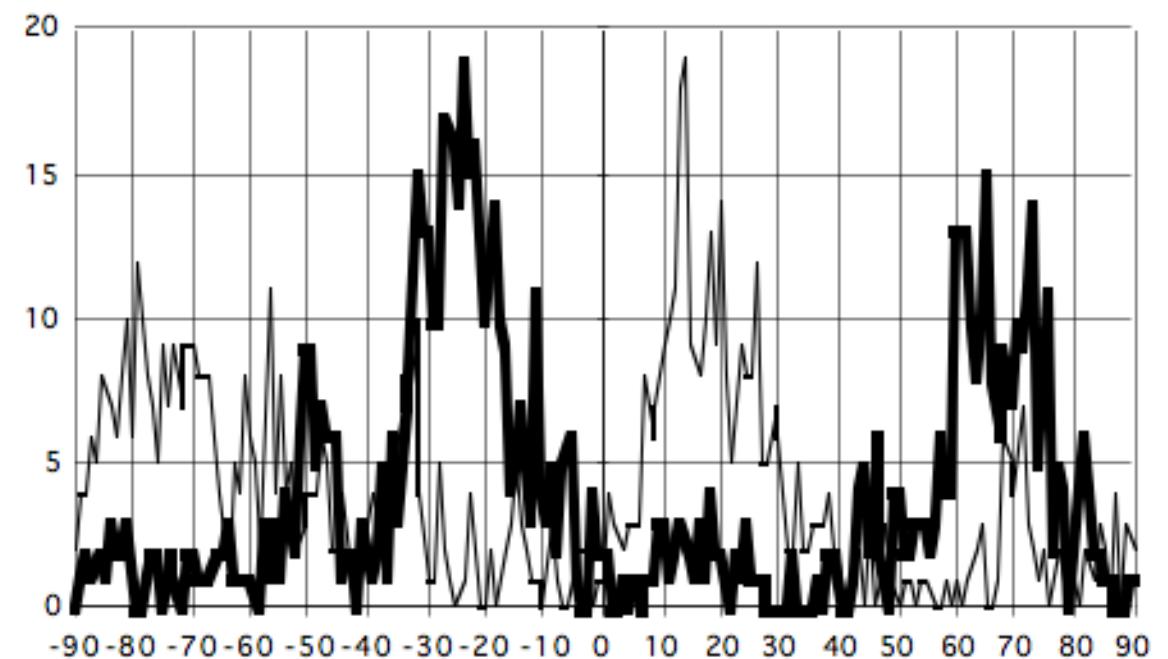
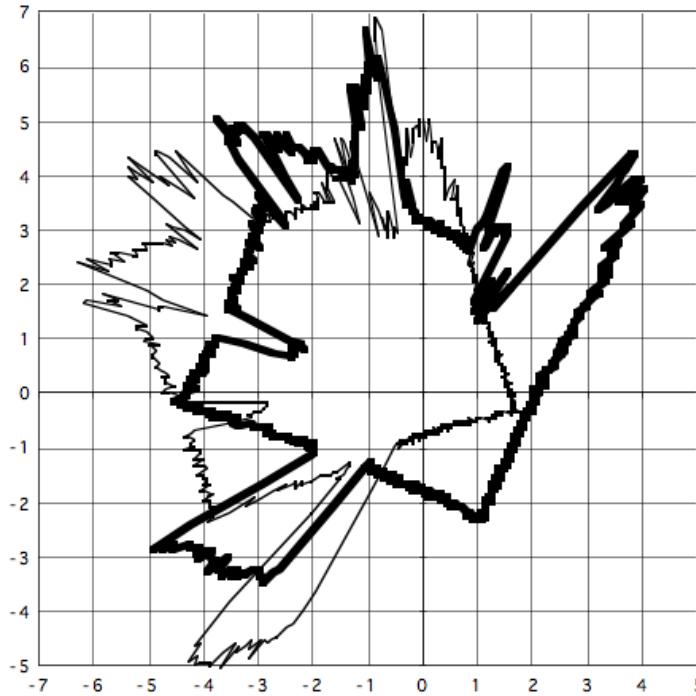
Orientierung durch Laser-Winkelhistogramme

[Weiß, Wetzler & v. Putkamer, 1994]

- Innerhalb und nahe bei Gebäuden dominieren Rechte Winkel von Wänden
- Ein Laserscan (kartesische Darstellung, idealisiert) enthält dann orthogonale „Hauptrichtungen“, zu denen viele Verbindungslienien benachbarter Messpunkte parallel sind
- Diese Richtungen sind bewegungs-invariant
- Folglich können sie zur Korrektur von Orientierungsfehlern verwendet werden
- Fusion dieser Orientierungsinformation mit anderen über Kalman-Filter oder über deterministisches Verfahren („Bei klaren Hauptrichtungen und hinreichend hoher Scan-Frequenz glaube der Information aus den Winkelhistogrammen!“)

Scans & ihre Winkelhistogramme

[Weiß, Wetzler &
v. Putkamer, 1994]



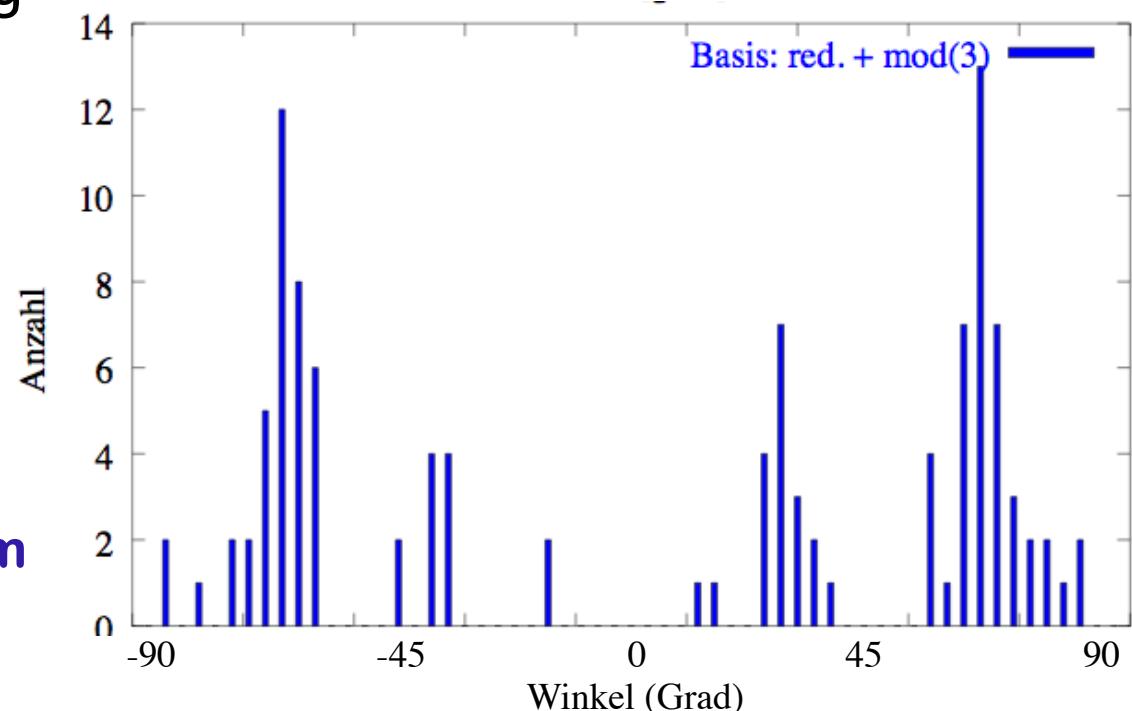
- Je Scan verbinde benachbarte Punkte mit Linie
- Mach Winkelhistogramm durch Zählen vorkommender Orientierungen in diskreten Winkeln geschätzt im globalen Bezugssyst.
- Korrigiere Orientierungsschätzung durch Matchen von Peaks

Diskrete Histogramme

Sammle vorgefundene Orientierungen auf in „Päckchen“ (*bins*) ähnlicher Winkel

- Große *bins*: Klare Häufung & hoher Diskretisierungsfehler
- Kleine *bins*: Schwammige Histogramme & hohe Orientierungsauflösung

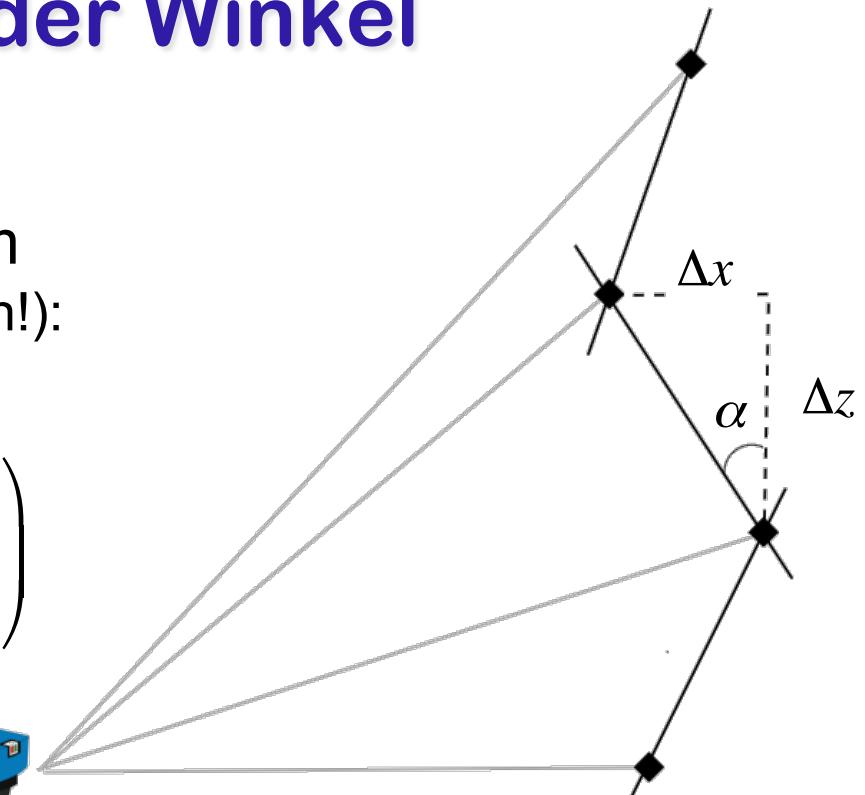
180° Winkelhistogramm
mit *bin size* 3°



Berechnung der Winkel

Für Winkel α_i an Punkt (x_i, z_i) gilt
bzgl. globalem (x, z) -Bezugssystem
(Winkel 0 an z-Achse, α im Uhrzeigersinn!):

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{\Delta x_i}{\Delta z_i}\right) = \arctan\left(\frac{x_{i+1} - x_i}{z_{i+1} - z_i}\right)$$



Warum ist das so:

Weil (s. Koordinatensysteme, aber Roboterkoordinatensystem!):

- $\tan(\alpha) = \sin(\alpha)/\cos(\alpha) = \text{Gegenkathete}/\text{Ankathete} = \Delta x_i/\Delta z_i$
- $\alpha = \arctan(\Delta x_i/\Delta z_i)$

Ermitteln der Winkelverschiebung

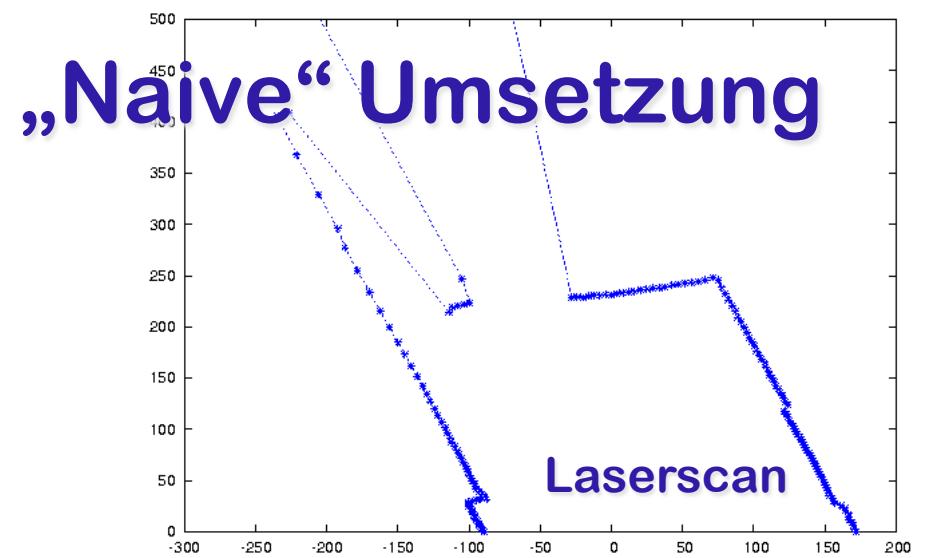
Seien \mathcal{H}, \mathcal{G} Histogramme (identische Diskretisierung),
 $\mathcal{G}(j)$ Füllung des j -ten *bins*.

Kreuzkorrelation
$$K_i(\mathcal{H}, \mathcal{G}) = \sum_{j=1}^n \mathcal{H}(j) \cdot \mathcal{G}((j + i) \bmod(n + 1))$$

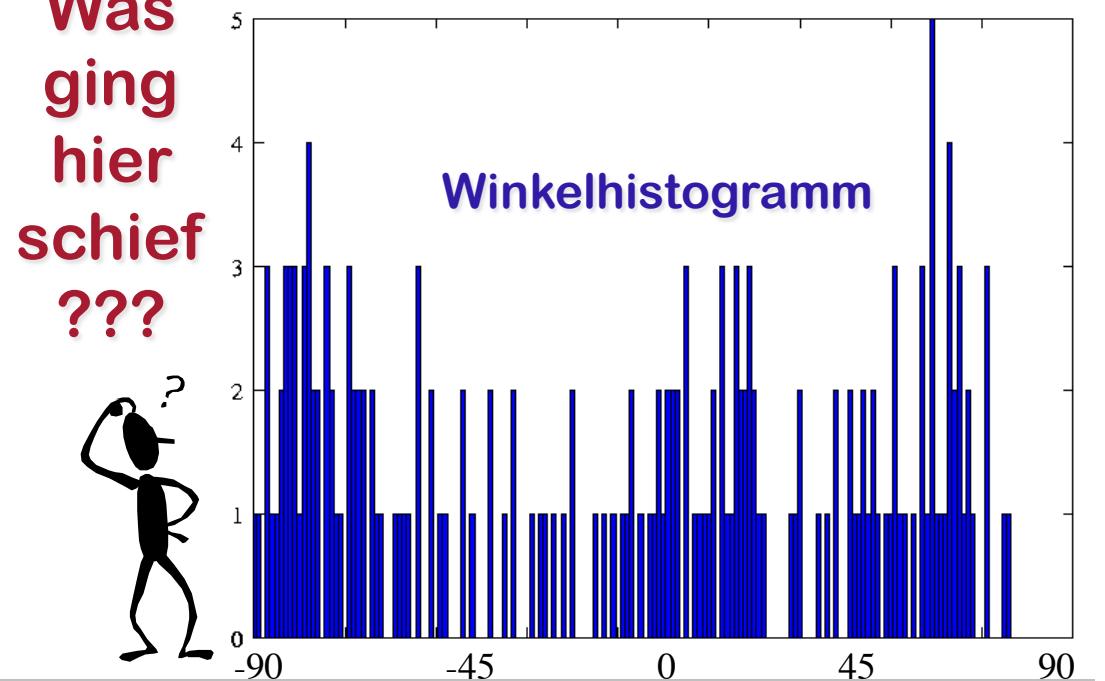
... zwischen \mathcal{H} und dem um i *bins* verschobenen \mathcal{G}

Optimale Übereinstimmung ergibt sich bei Verschiebung
(in Vielfachen der *bin*-Auflösungen) von

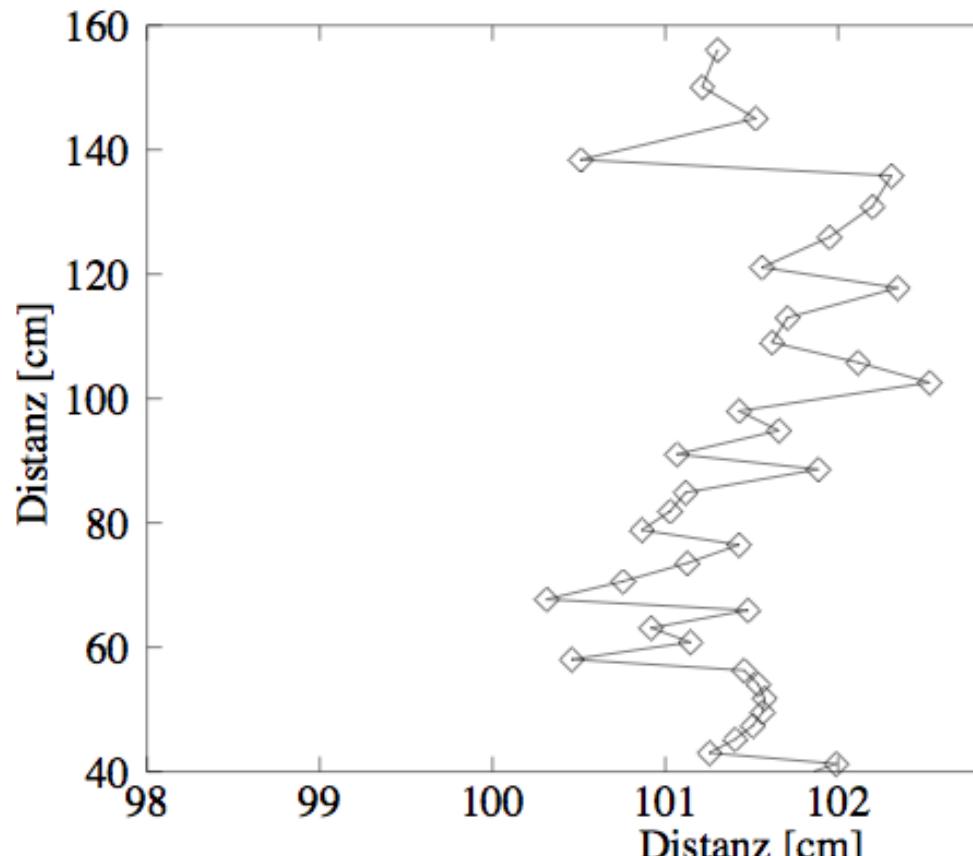
$$\Delta\theta = \arg \max_i K_i(\mathcal{H}, \mathcal{G})$$



Was
ging
hier
schief
???



Sensorrauschen zerstört Histogramme



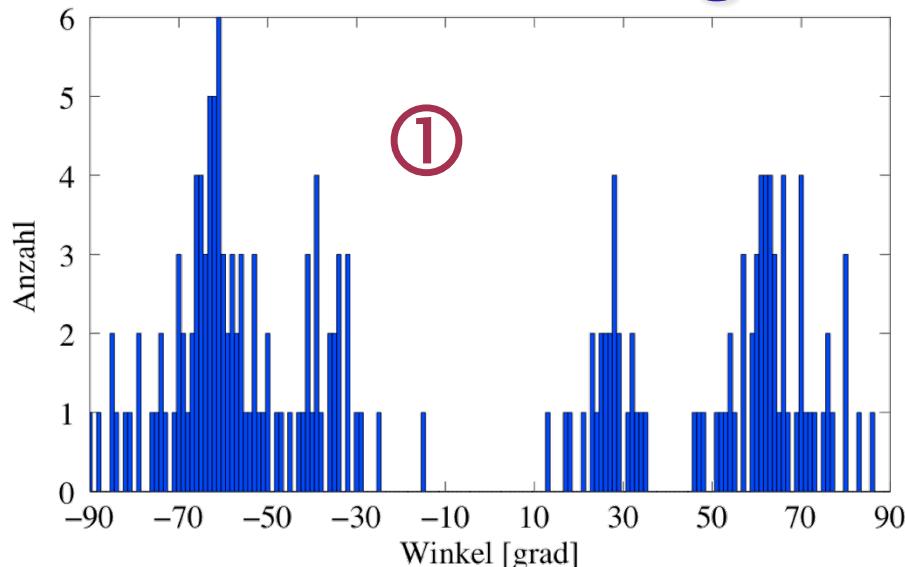
Scan einer planen Wand (Ausschnitt)
(Achtung Achsenmaßstäbe!)

Mögliche Abhilfen

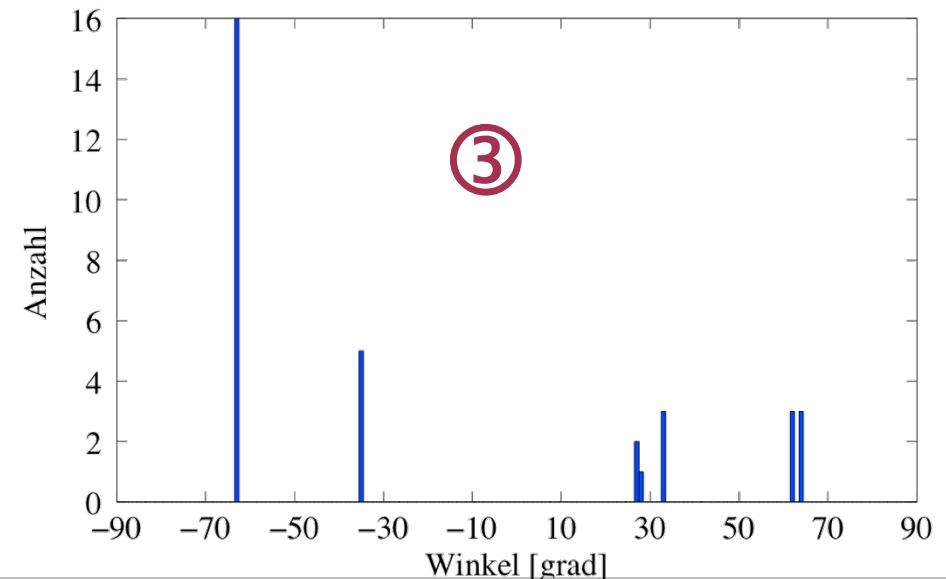
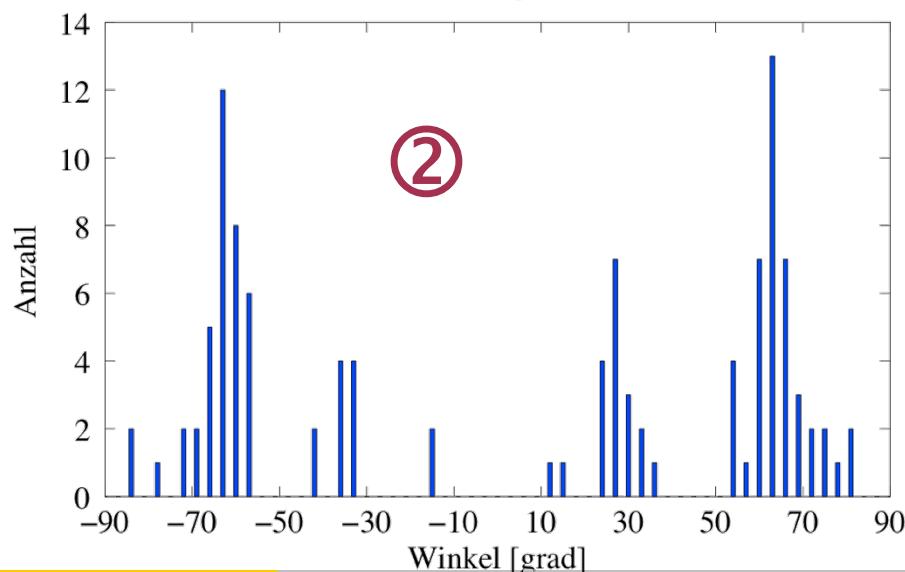
- Winkelauflösung vergrößern
- Punktmenge filtern
 - m aus n weglassen
 - Reduktions/Medianfilter
(Folien 83ff)
- Linienfilter + Resampling
verwenden (Folien 87ff)
- ...

Filtern von Histogrammen

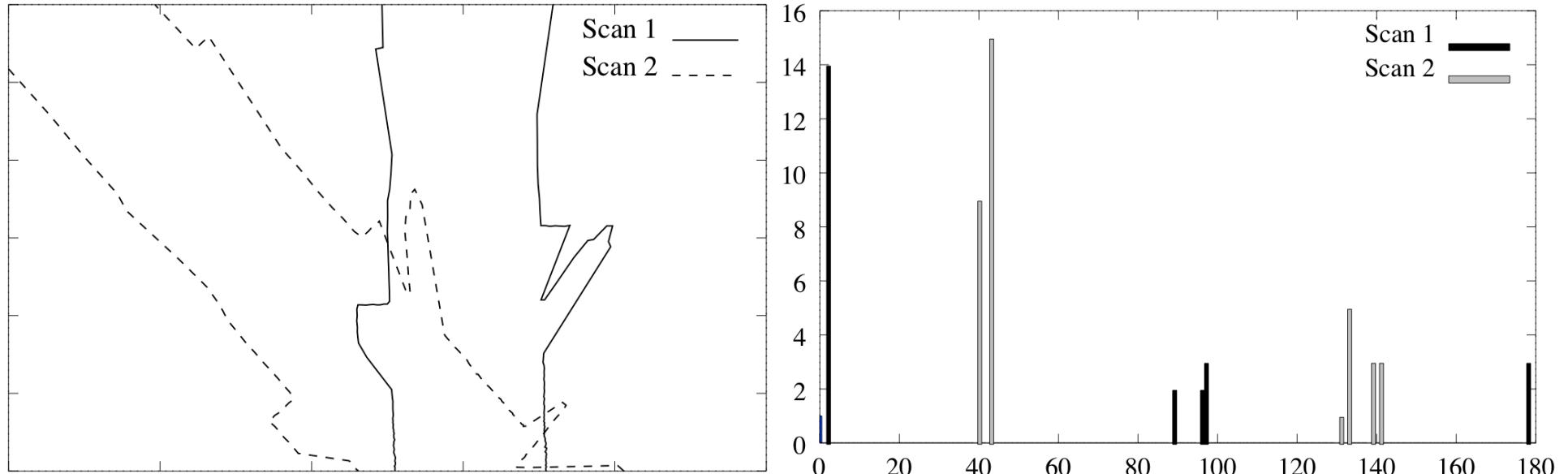
[Diplomarbeit Lingemann, 2001]



- ① Original-Histogramm, 1°
- ② Reduktionsfilter + *bin size* 3°
- ③ Linienfilter + *bin size* 3°



Beispiel

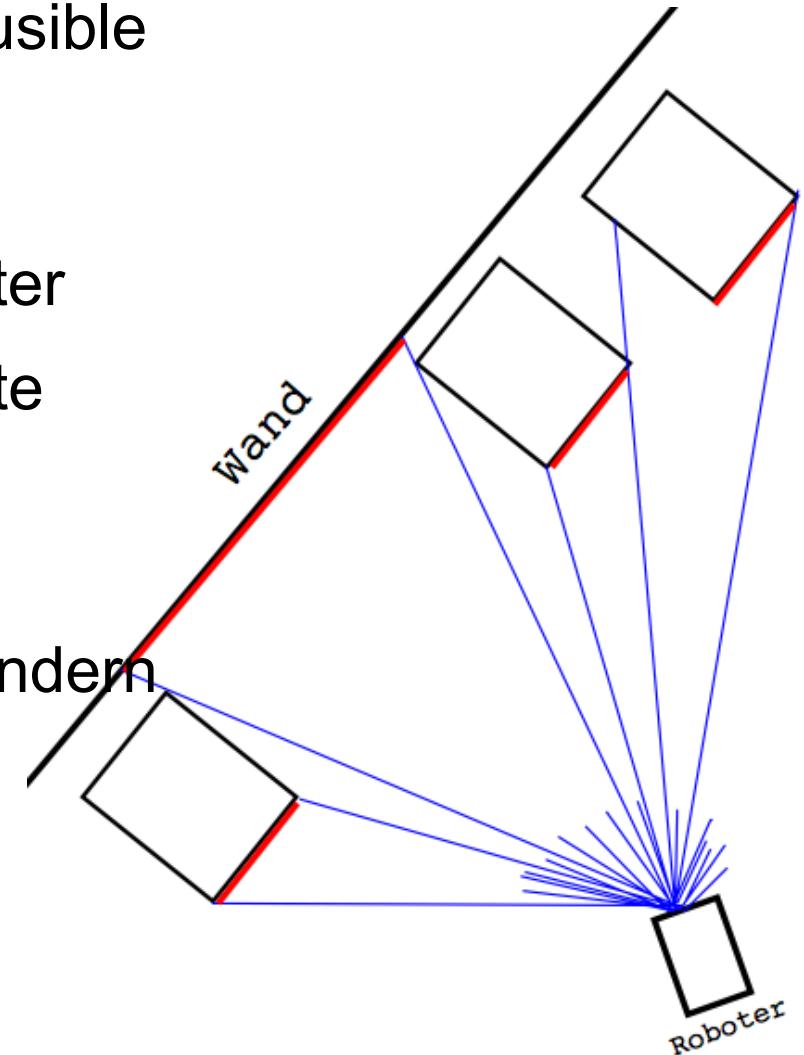


2 2D-Laserscans, aufgenommen
von derselben Position mit
unterschiedlicher Rotation

Zugehörige Winkelhistogramme
nach Reduktion und Filterung

Fazit Winkelhistogramme

- Im Umfeld von Gebäuden hoch plausible Orientierungs-Hilfe
- Fusion mit Odometrie wiederum deterministisch oder mit Kalman-Filter
- Korrigiert damit die schwächste Seite der Odometrie
- Billig zu berechnen
- Klappt auch, wenn nicht Wände, sondern wandparallele Strukturen sichtbar
- In der Literatur selten aufgegriffen



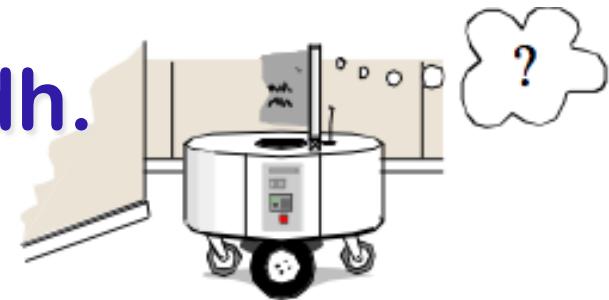
Kapitel 5 Lokalisierung in Karten

1. Zum Einstieg: Worum geht es?
2. Sensorik
3. Sensordatenverarbeitung
4. Fortbewegung
5. Lokalisierung in Karten
6. Kartierung
7. Navigation
8. Umgebungsdaten
9. Roboterkontrollarchitekturen

5.1 Karten
5.2 Triangulation
5.3 Lokalisierungs-Algorithmen

Ausblick

Formen von Lokalisierung, Wdh.



Triviale Lokalisierung

keine mobilen Einheiten → kein Lokalisierungsproblem

(Lokalisierung = momentane interne Pose: z.B. Automationsroboter)

Keine Lokalisierung

Kenntnis der Pose unnötig/unerwünscht → keine Lokalisierung
„verhaltensbasierte“ Robotik, random-walk-Staubsauger: roomba)

Inkrementelle Lokalisierung (relative L., Lokale L., *tracking*)

Ermittle Pose-Änderung relativ
zu Startpose oder zu Zwischenposen

Haben wir in 4. gemacht

Globale Lokalisierung (Absolute L.)

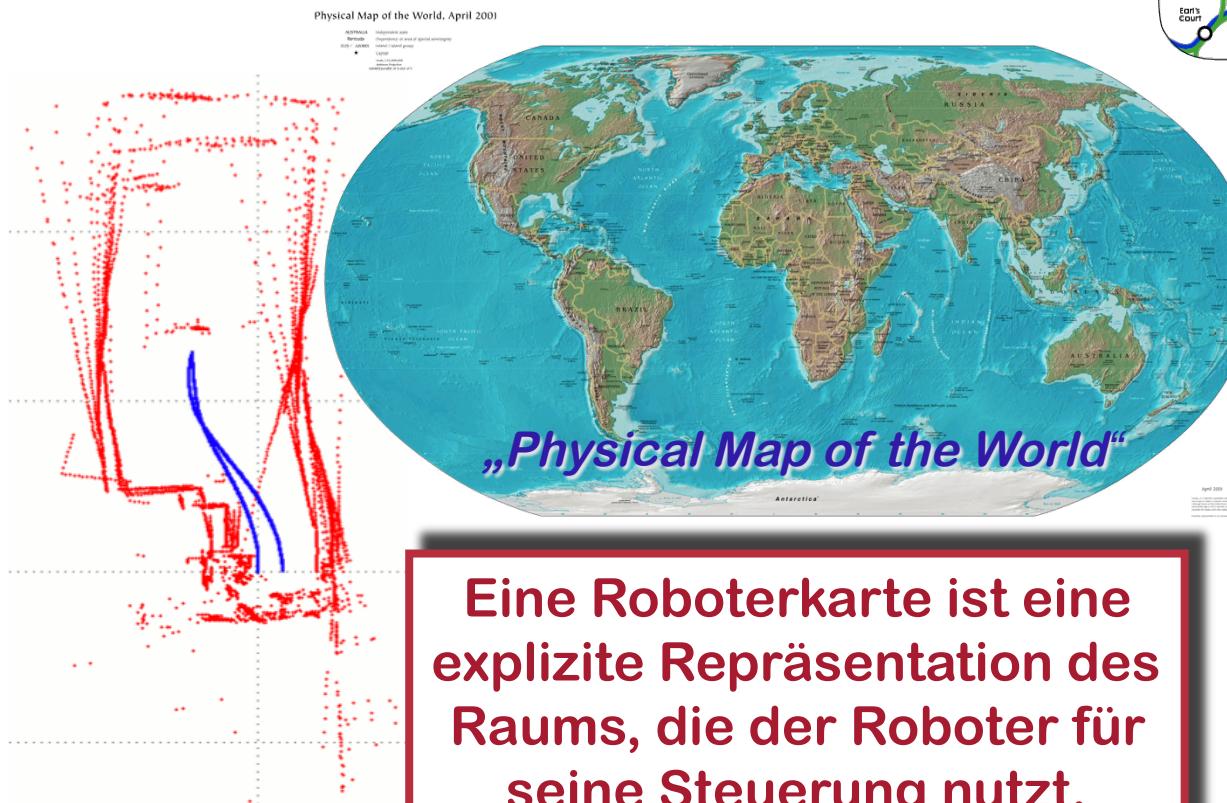
Ermittle Pose in externem Bezugssystem
„Karte“, Koordinatensystem)

Kommt in diesem Kapitel

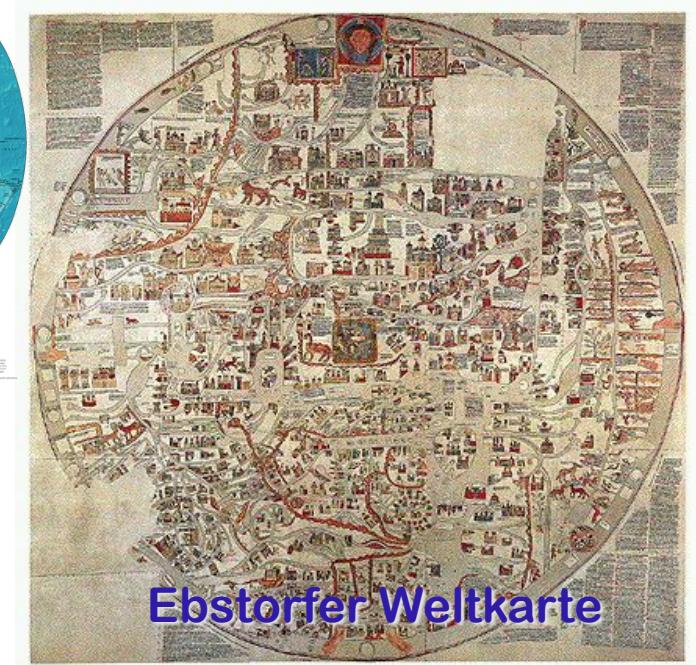
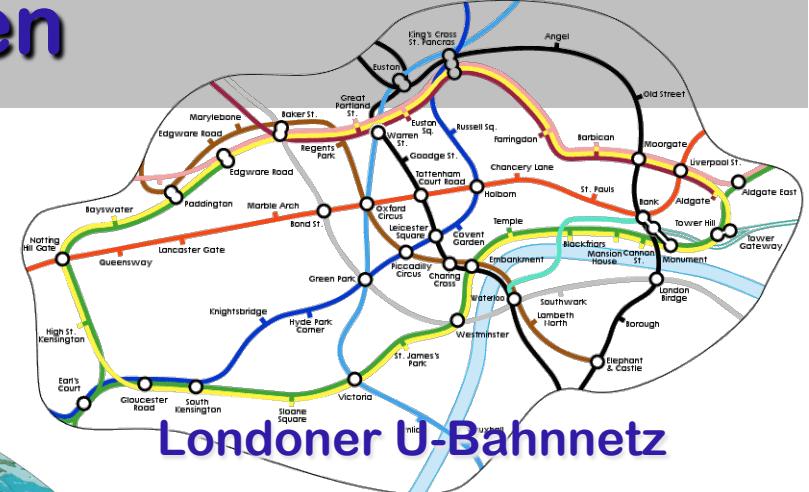
5.1 Karten

Geographie, Psychologie und KI sind einig:

Es gibt nicht die Art Karte,
sondern endlos viele davon!



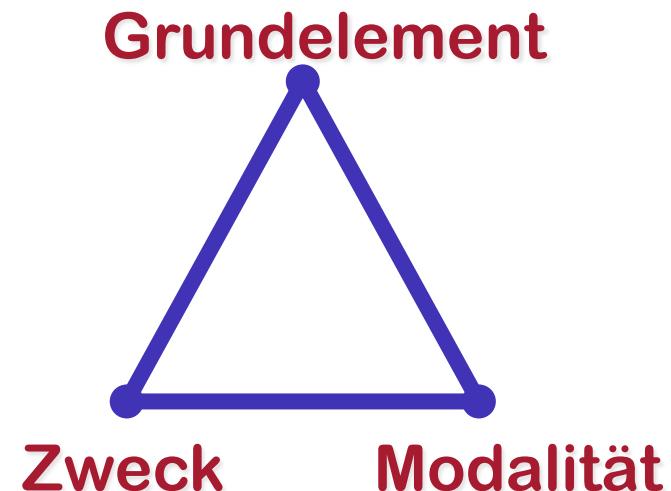
Eine Roboterkarte ist eine explizite Repräsentation des Raums, die der Roboter für seine Steuerung nutzt.



Wie und was repräsentieren Karten?

Für Roboterkarten (2D, 3D, ... gilt):

- Drei Charakteristika für Karten (mindestens!)
- Konkrete Roboterkarten sollen möglichst hohen Gesamtnutzen haben
- Oft braucht man mehr als eine Karte derselben Umgebung („hybride Repräsentation“ ↪ Integrationsproblem!)
- Raumrepräsentation (einschließlich effizienter Inferenzverfahren) erstaunlich schwach entwickeltes Forschungsgebiet! (↪ Arbeitsthemen!)



Mögliche Roboterkarten-Arten

... ergeben sich aus dem Kreuzprodukt Modalität x Element
Hier 2D-Karten; Karten können auch 3D sein!

Modalität \ Element	Sensordaten	syntaktische Merkmale	semant. Merkmale
metrisch kontinuierlich			
metrisch diskret			
topologisch			

Modalitäten der Raumrepräsentation

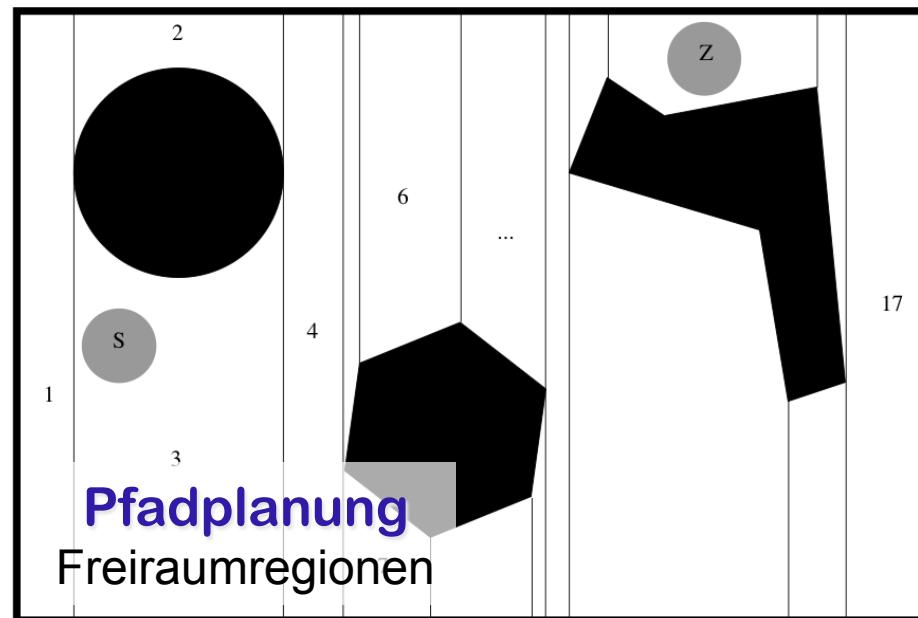
- **Metrisch kontinuierlich** (geometrische Objekte im Raum)
 - repräsentiere x, z, θ (bzw. $x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$) numerisch
 - **Vorteil:** Präzision, oft kompakte Repräsentation
 - **Nachteil:** Rechnen im Kontinuierlichen (z.B. W'dichten)
- **Metrisch diskret** (Raum „an sich“)
 - repräsentiere x, z (bzw. x, y, z) diskret („Fliesen“, „Voxel“)
 - **Vorteil:** Uniformität, oft einfache Algorithmen
 - **Nachteil:** Diskretisierungsfehler
- **Topologisch** (i.d.R. diskret)
 - repräsentiere „Landmarken/Orte“ + „Wege dazwischen“
 - **Vorteil:** kompakte Repräsentation
 - **Nachteil:** Diskretisierungsfehler, viel Rauminfo. fehlt

Elemente der Raumrepräsentation

- **Sensordaten** (Messwerte z.B. Laser-Punkte, Bilder)
 - **Vorteil:** Daten unverfälscht, vielfach interpretierbar
 - **Nachteil:** i.d.R. viel zu hohes Datenvolumen
- **syntakt. Merkmale** („semantik-frei“ verarbeitet, z.B. Linien)
 - **Vorteil:** Komprimierung gegenüber Rohdaten, Standard-Vorverarbeitung spart Zeit
 - **Nachteil:** ggf. fällt wichtige Roh-Information weg
- **semant. Merkmale** (z.B. Objektklassen)
 - **Vorteil:** Extrem hohe Komprimierung, Speicherung in Termini der Nutzungskategorien
 - **Nachteil:** Originaldaten nicht im Ansatz rekonstruierbar, wenn Nutzung sich ändert

Zwecke von Karten

- **Lokalisierung**
 - **Optimierte**: Eindeutiges Matching von Sensordaten in Karte
→ **Kartenelemente**: „Oberflächen“ (z.B. Linien/Flächen bei Abstandssensoren; Texturen bei Kamera)
- **Pfadplanung** (hier Fahrpfade, allg. auch Greiftrajektorien)
 - **Optimierte**: Rechenzeit für Planung kollisionsfreier Trajektorien von Start- nach Zielpose
→ **Kartenelemente**: „Freiraum“-Regionen in 2D oder 3D
- Diverse **Anwendungszwecke**
 - **Optimierte**: z.B. Präsentation für Nutzer, Archivierung, Auswertung
→ **Kartenelemente**: Objekte/Kategorien der Anwendung (z.B. ATV-Schadensklassen bei Kanalinspektion)



Beispiele: Zwecke



Kanalinformationssystem-Plan
Alle raumbezogenen und nominalen
Daten, die für Kanalbetrieb relevant

Im Folgenden zunächst ...

Beispiel-Zweck: Lokalisierungskarten

1. Lege Sensormodalität/en und Lokalisierungsverfahren fest
z.B. 2D Laserscanner mit Liniendetektion;
Rundumkamera mit Farbfleckspektrum
2. „Besorge“ Umgebungskarte passend zu Modalität
(vom Gebäudemanagement; oder manuell ausmessen&modellieren;
oder lernen lassen → SLAM, s.u.; oder ...)
3. Bewerte Abbildung von Sensordaten (s. 1.) in die Umgebungskarte (s. 2.) unter Einsatzbedingungen
(lokale Symmetrien?, „Alias“-Posen?, Beleuchtungsvarianz?,
dynamische Verdeckungen?, ...)
4. Ggf. gehe zurück nach 1. und/oder 2.

**Eine Roboterkarte muss effizient für ihren Zweck sein!
z.B.: Lokalisierungskarte muss effizientes & eindeutiges Matching von Sensordaten unterstützen!**

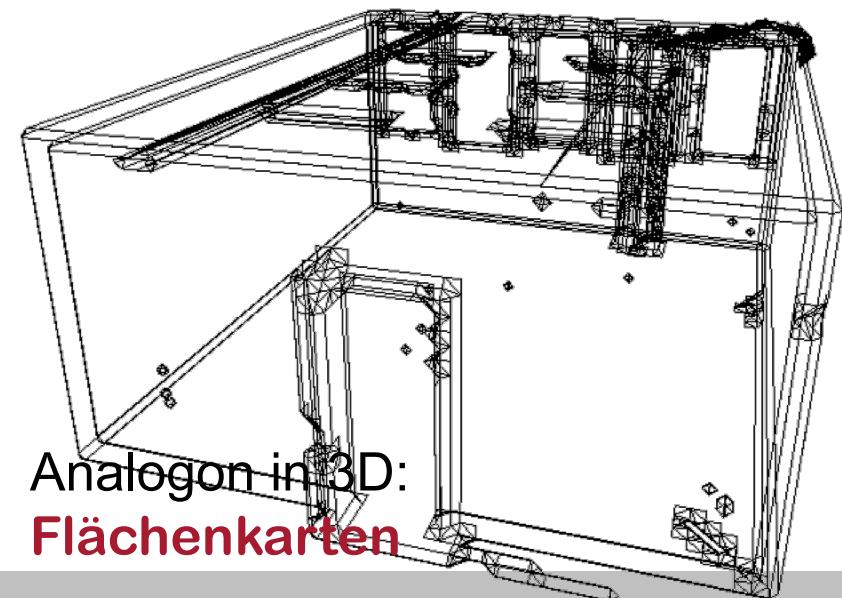
Lokalisierungskarten #1: Linienkarten



**Linien im wirklichen Leben
sind nicht immer achsparalell!**

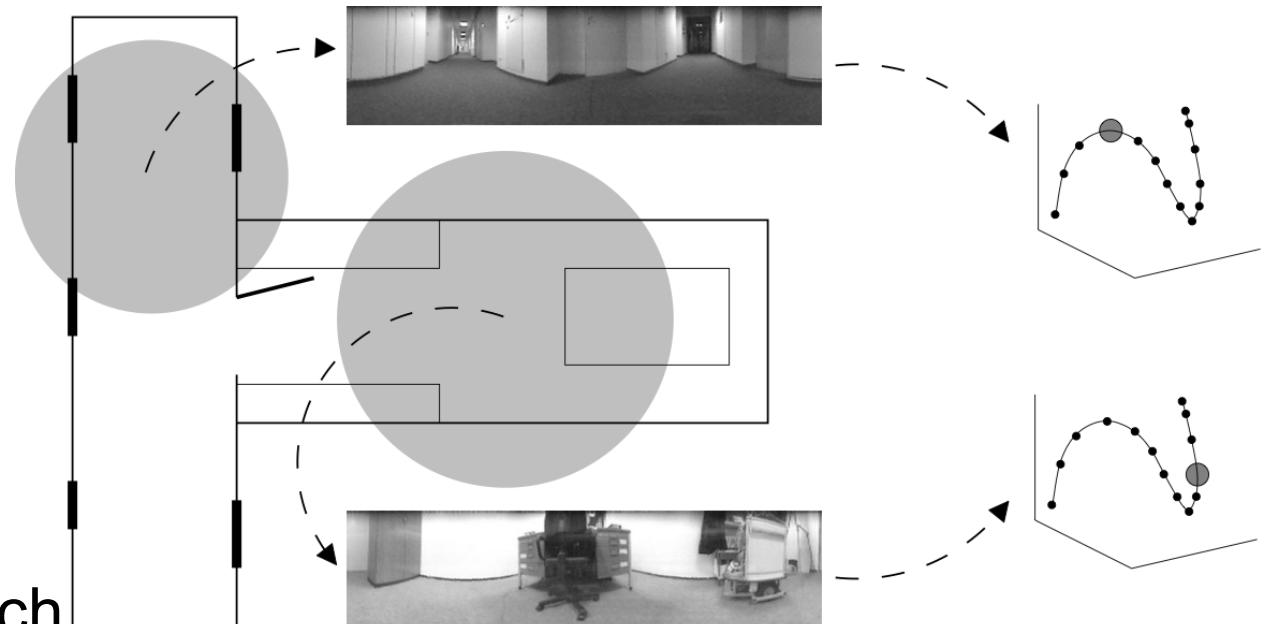
Kompaktere Repräsentation
(falls anwendbar: achspar./Fluchtlinien):
Endlosliniendarstellung

- Metrische Lok. mit Entfernung-Sensoren (Laser, US)
- Linien nur im Messbereich!
(z.B. Scanebene)
- Voraussetzung: Messwerte effizient auf Linien matchen



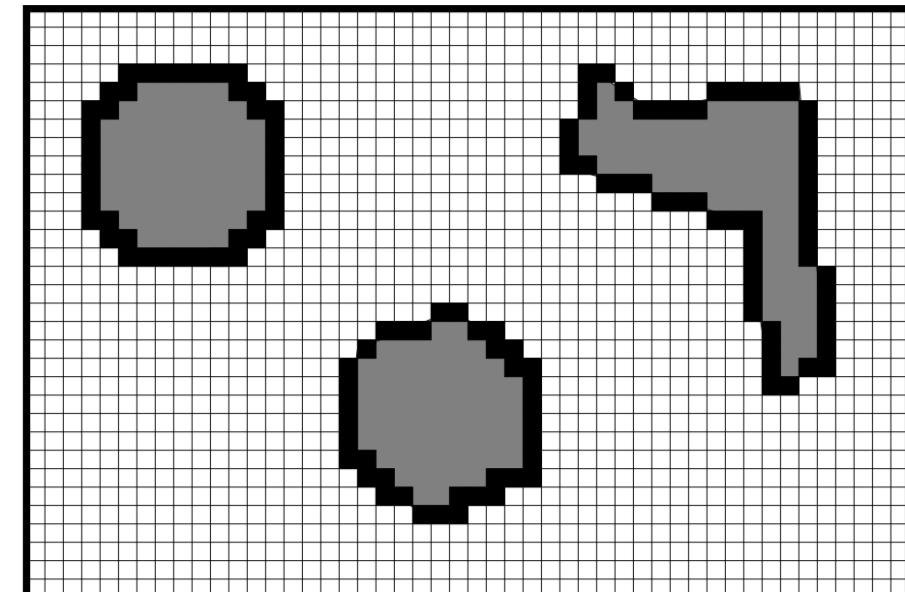
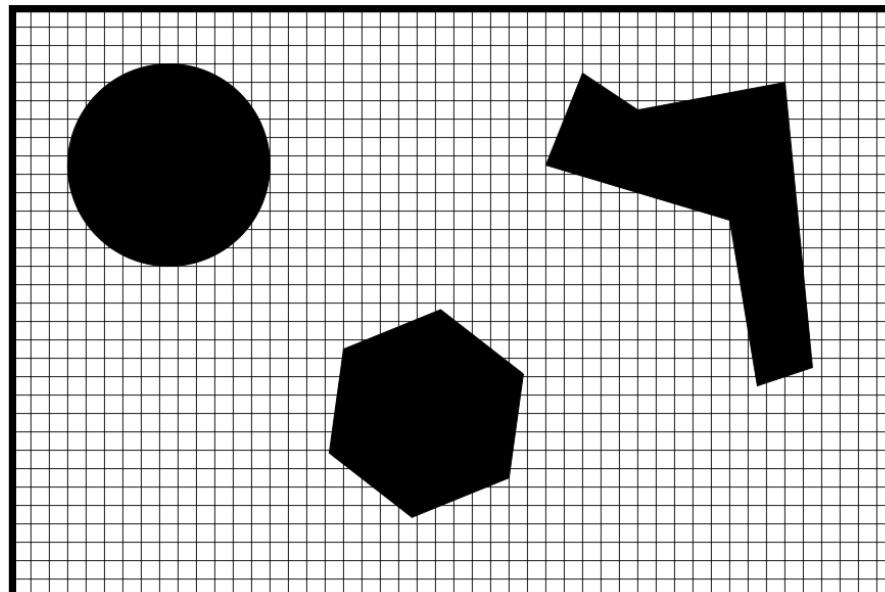
Lokalisierungskarten #2: Visuelle Signatur

- Primär topologische Lokalisation mit (Rundum-)Kamera
- Relativ wenig gebräuchlich
- Viele Verfahren für Abbildung Bild->Signatur möglich (vert. Linien + Farbblobs (S/N), PCA, ...)
- Signatur berücksichtigt Vollbild; Rundum-Kamera günstig, da kein Aperturproblem und Rotation=Musterverschiebung
- **Voraussetzung:** Assoziere Regionen mit Signaturen
- **Problem:** Poseänderungen, Beleuchtungsvarianzen, Verdeckungen verändern Signatur nichtlinear



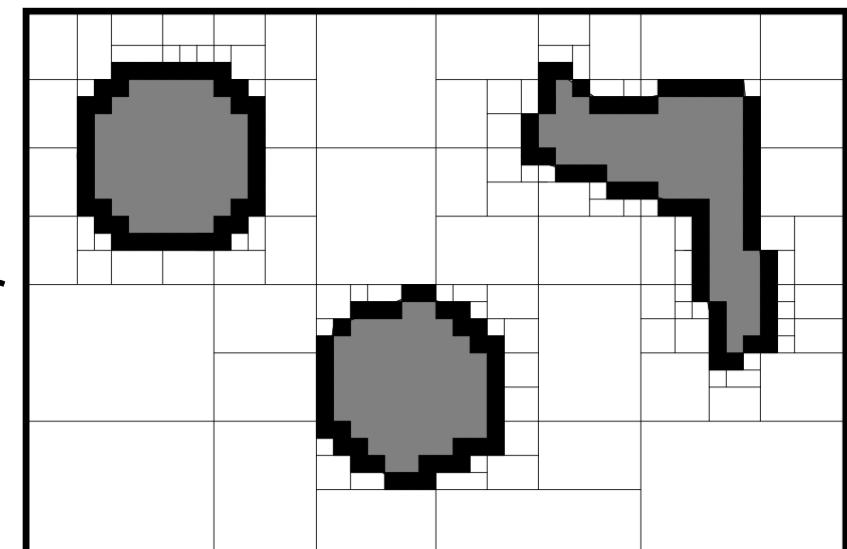
Lokalisierung + Pfadplanung: Rasterkarten

- Diskret Metrische Lok. mit Entfernungs-Sensoren (Laser, US)
- Auch für Pfadplanung geeignet (s.u.) und autom. Kartenbau
- Zerlege Raum in diskrete Elemente; markiere Belegtheit
- **Vorteil:** Sehr allgemeine, flexible Repräsentation
- **Nachteil:** Diskretisierungsfehler in Konturen, Pose, Freiraum



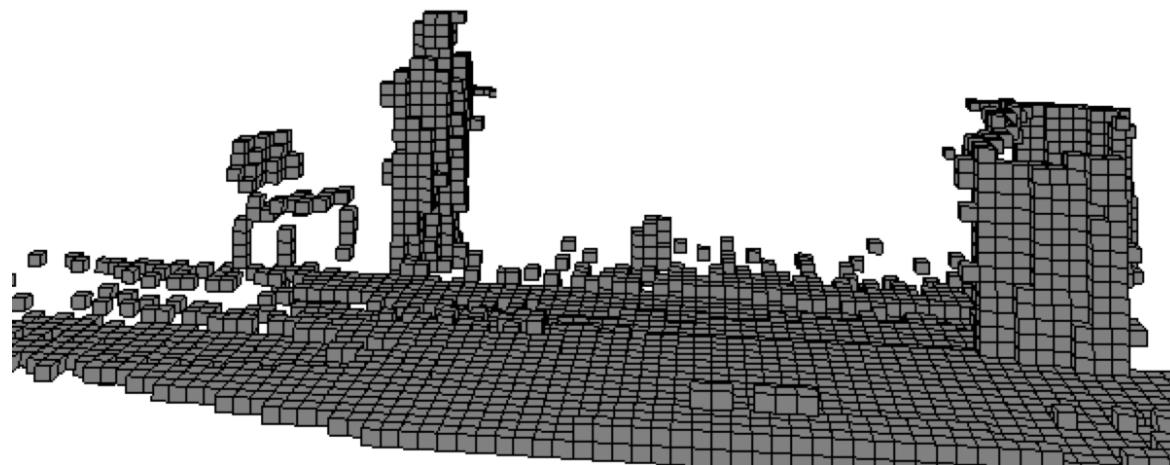
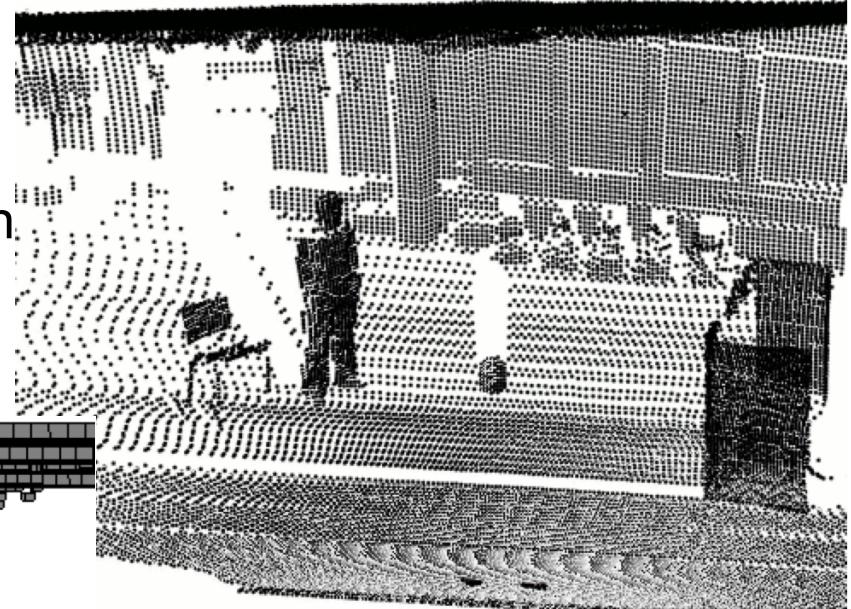
Rasterkarten-Repräsentation: Quad/Octrees

- **Vorurteil** (s. S/N): „Rasterkarten kosten viel Speicher“
- **... ist Unsinn:** Quadtrees (im 3D: Octrees) erlauben, spärlich besetzten Raum spärlich zu repräsentieren
(dichte Besetzung mit Polygonen macht in *allen* Verfahren Aufwand!)
- **Repräsentations-Verfahren:**
 - Starte mit (rechteckiger) Zelle, die Areal umfasst;
 - Enthält aktuelle Zelle belegte und freie Anteile, zerlege in 4 gleiche Teilzellen;
 - Stoppe Zerlegung, wenn Zelle komplett frei;
 - stoppe Zerlegung bei minimaler Auflösung (=Raster); markiere frei/belegt wie bei Rasterrepräsentation



Octreekarte, Beispiel

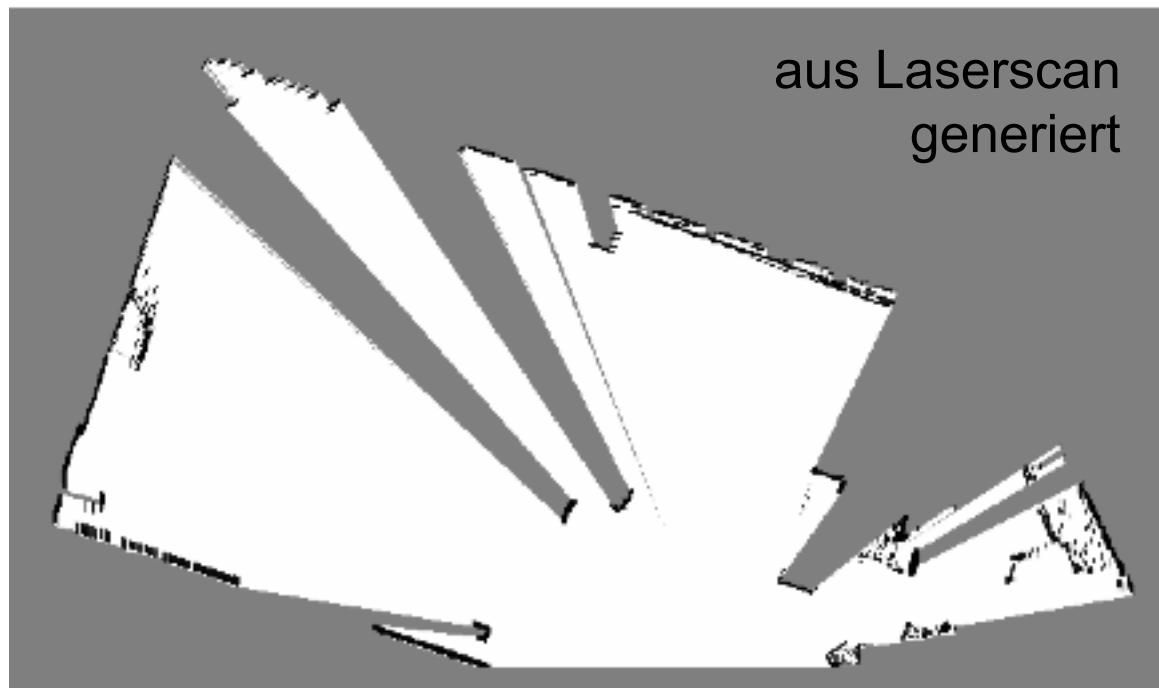
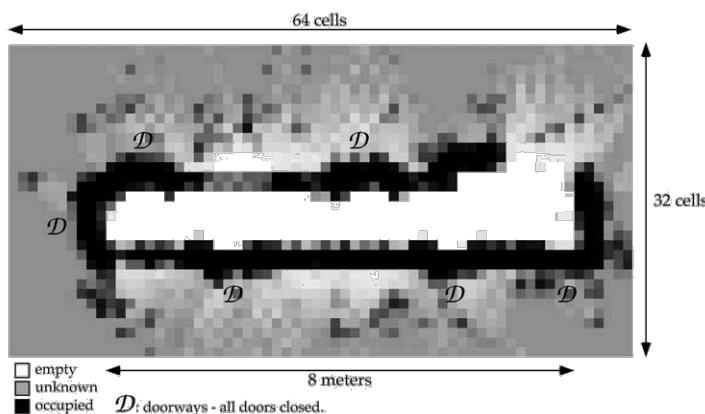
aus Szene mit 3D-Laser aufgenommen



- belegte Raumvolumina (deren Hüllen) sind immer in feinster Auflösung!
- Voxelung des Freiraums nicht eingezeichnet

Belegtheitswahrscheinlichkeit

Rasterkarten machen leicht, Unsicherheit in Sensorwerten und transiente Information zu repräsentieren:
Statt binärer Belegung speichere (aktuelle) Belegtheitsw'keit



Moravec/Elfes, 1985
Sonardaten, viele Messfehler
relativ grobe Auflösung



frei



belegt



unbekannt

Kartendarstellungen zur (2D-)Pfadplanung

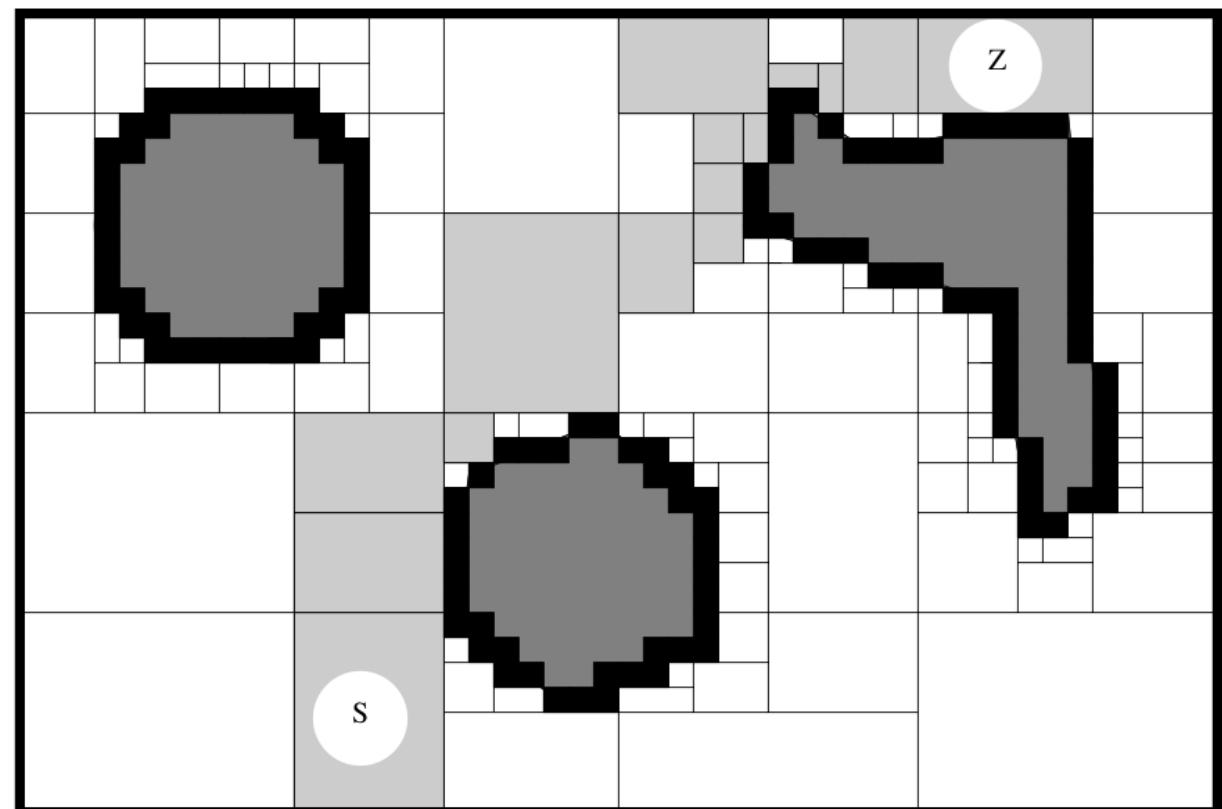
1. Repräsentiere Areale von bekanntermaßen freiem Raum und ihre Verbindungen (Nachbarschaft)
(Ggf. „vergrößere“ Objekte um halben Roboterdurchmesser
→ plane mit punktförmigem Roboter)
2. Suche Folge benachbarter Areale von Start- zu Zielpunkt
Suche im Sinn der KI; Ursprung des A*-Algorithmus! (s. **Kap. 7!**)
z.B. optimiere Pfadlänge, Fahrzeit, Hindernisabstand, Lokalisierbarkeit.
Implizite CWA: „Wo ich nicht weiß, dass was ist, da ist nichts!“
3. Fahre Pfad (mit Kollisionsvermeidung – CWA nicht wirklich wahr!);
durchquere dabei freie Areale nach zu wählender Strategie
z.B. Geschwindigkeit, Hindernisabstand, Lokalisierbarkeit

Unterstütze, fahrbare Trajektorien effizient zu finden (Freiraum)!

→ **Kapitel 7**

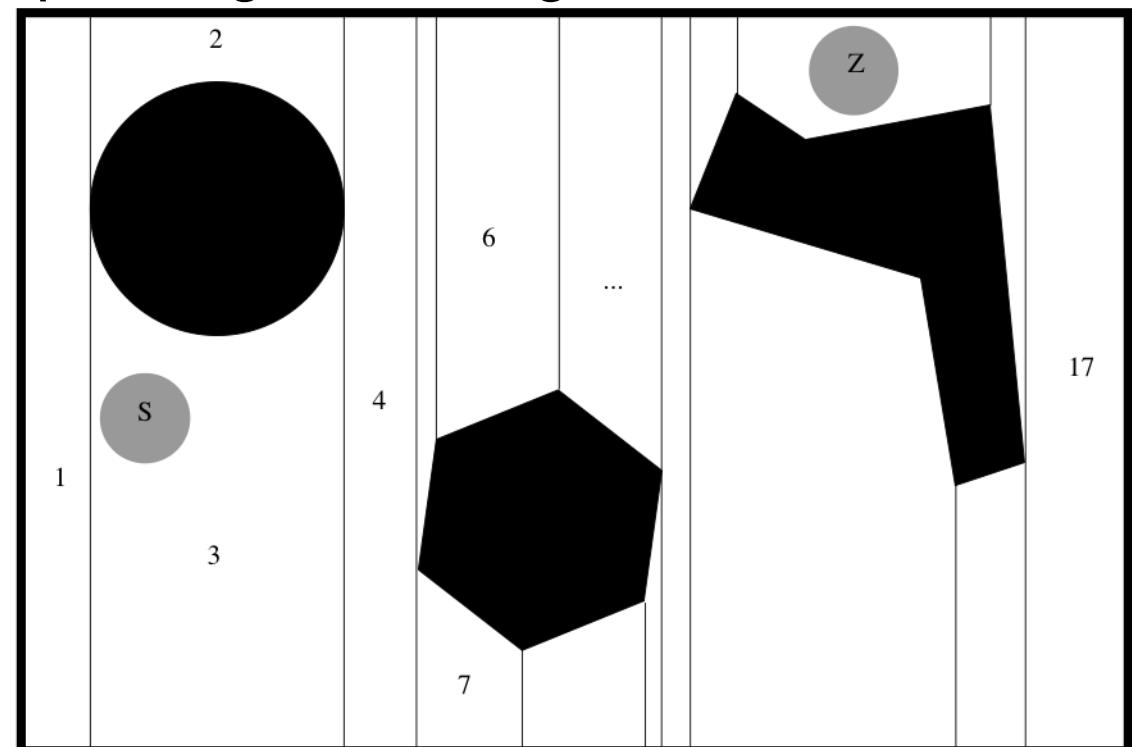
Pfadplanungskarten #1: Rasterkarten

- Rasterkarten stellen Freiraum für pfadplanungsgeeignet dar
- Quadtreedarstellung besonders geeignet
(weniger Zellen
 - kleinerer Suchraum; große Zelle
 - kleinere Krümmung, höhere Geschw'keit, bessere Odometrie)



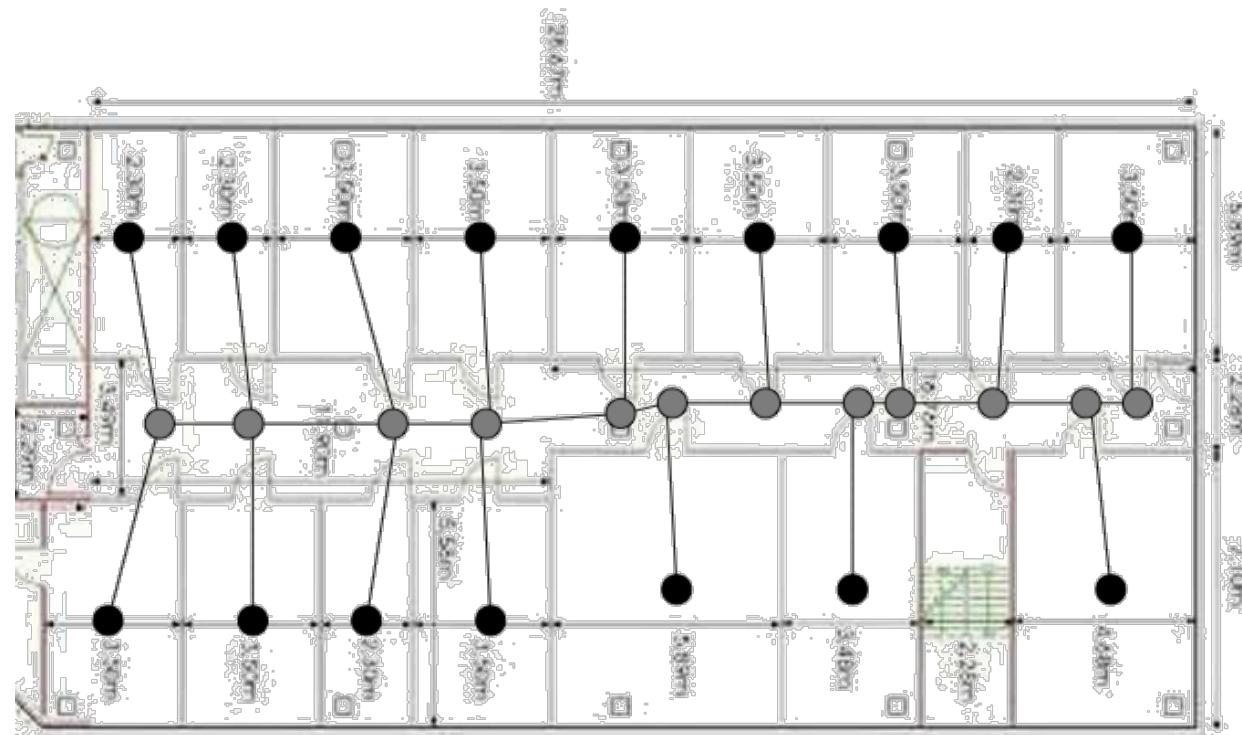
Pfadplanungskarten #2: „Exakte“ Zerlegung

- Rasterung orientiert an „kritischen“ Punkten der Umgebungsgeometrie (konvexe Ecken)
- Weniger Rasterelemente als in uniformer Rasterung
- Besser geeignet für Pfadplanung und Navigation
- Weniger geeignet für Lokalisierung
(Aber Zerlegung ähnlich *visibility graph*!)
- Weniger geeignet für automatischen Kartenbau
(Geht aus von 2D-Hindernispolygonen)



Pfadplanungskarten #3: Topologische Karten

- Abstrakte Zerlegung nach funktionalen/semantischen/... Kategorien (Abkehr von Repräsentation der Geometrie)
- Verbindungen zwischen direkt zugänglichen Knoten
- *Mehrere* Topo. Karten desselben Areals denkbar/sinnvoll
- Kommen in *vielen* Variationen
- Nah an „mentalen Karten“



Kartendarstellungen für Anwendungszwecke

... sind so heterogen wie die Anwendungszwecke selber!

Fazit Roboterkarten

- Man braucht Karten für Lokalisation, Pfadplanung, ggf. Anwendungszwecke
- Möglicherweise mehr als 1 Karte
- Dient 1 Format mehreren Zwecken, umso besser!
(Rasterkarten – für InformatikerInnen effizient in Quad/Octrees)
- Dazu berücksichtige automatische Erstellbarkeit (→ Kap. 5)
- Bei hybriden Repräsentationen (mehr als 1 Karte) ist der Übergang zwischen Repräsentationen interessant (Forschungsgebiet!)
- Braucht man eigentlich mehr als 1 Karte, bloß weil der Schulatlas mehrere thematische Darstellungen auf Papier enthält? Merke: Aus 1 GIS erzeuge viele Karten!

Eine Roboterkarte ist eine explizite Repräsentation des Raums, die der Roboter für seine Steuerung nutzt.