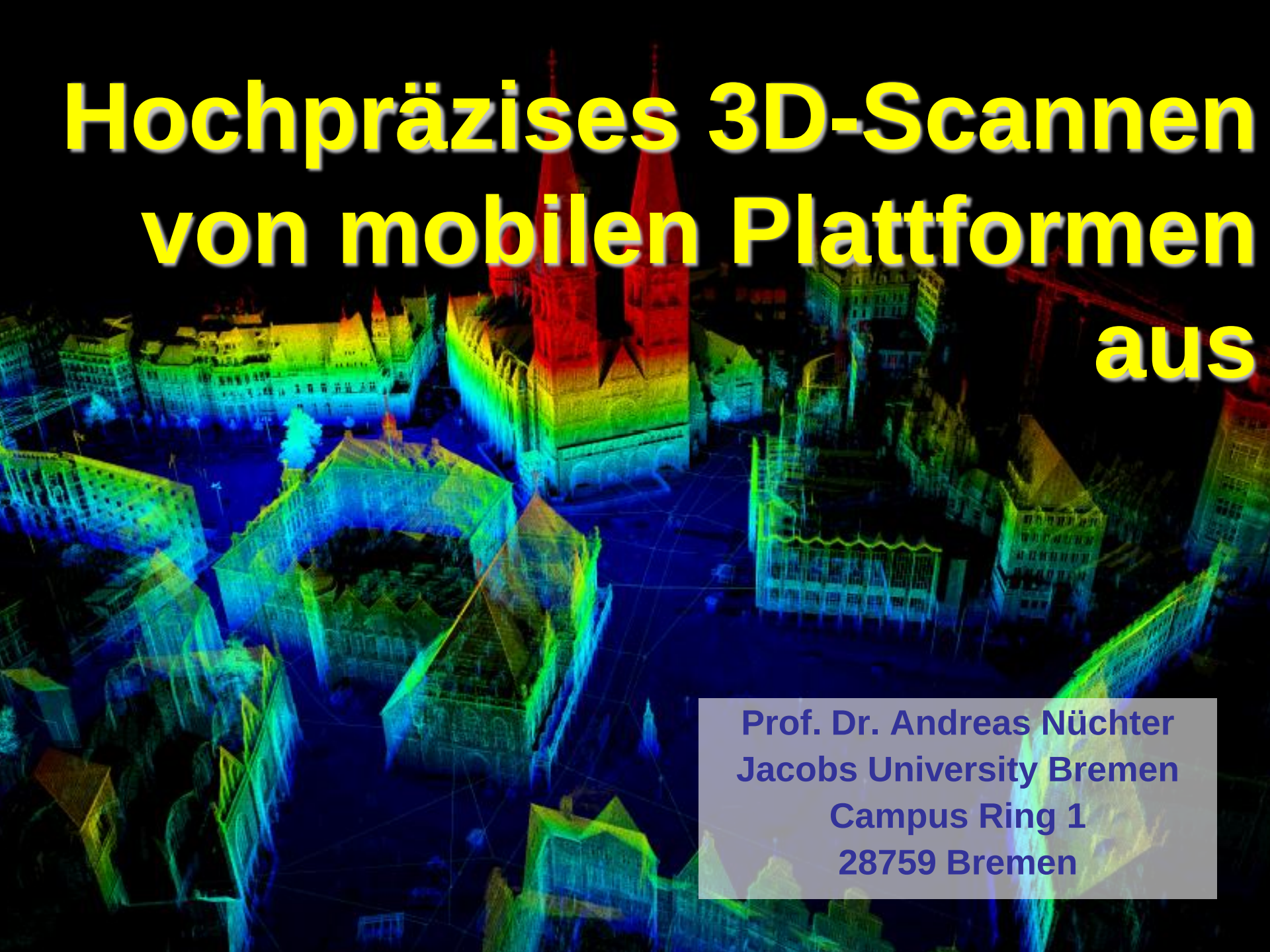


# Hochpräzises 3D-Scannen von mobilen Plattformen aus

An aerial view of a city, likely Bremen, with various buildings and structures. Overlaid on the image are numerous 3D point cloud visualizations in various colors (red, green, blue, yellow) representing different scans or data points. The point clouds are most prominent on the central church with two tall spires and the surrounding urban area.

Prof. Dr. Andreas Nüchter  
Jacobs University Bremen  
Campus Ring 1  
28759 Bremen

# Danksagung

- Für erfolgreiche Zusammenarbeit in den letzten Jahren mit
  - Joachim Hertzberg
  - Kai Lingemann
  - Stefan Stiene
  - Hartmut Surmann
  - Oliver Wulf
  - Bernardo Wagner
  - Simone Frintrop
  - Dietrich Paulus
  - Sara Mitri
  - Dorit Borrmann
  - Jan Elseberg
  - Sebastian Thrun
  - Thomas Christaller



**Fraunhofer** Institut  
Autonome Intelligente  
Systeme





# Über diesen Vortrag...

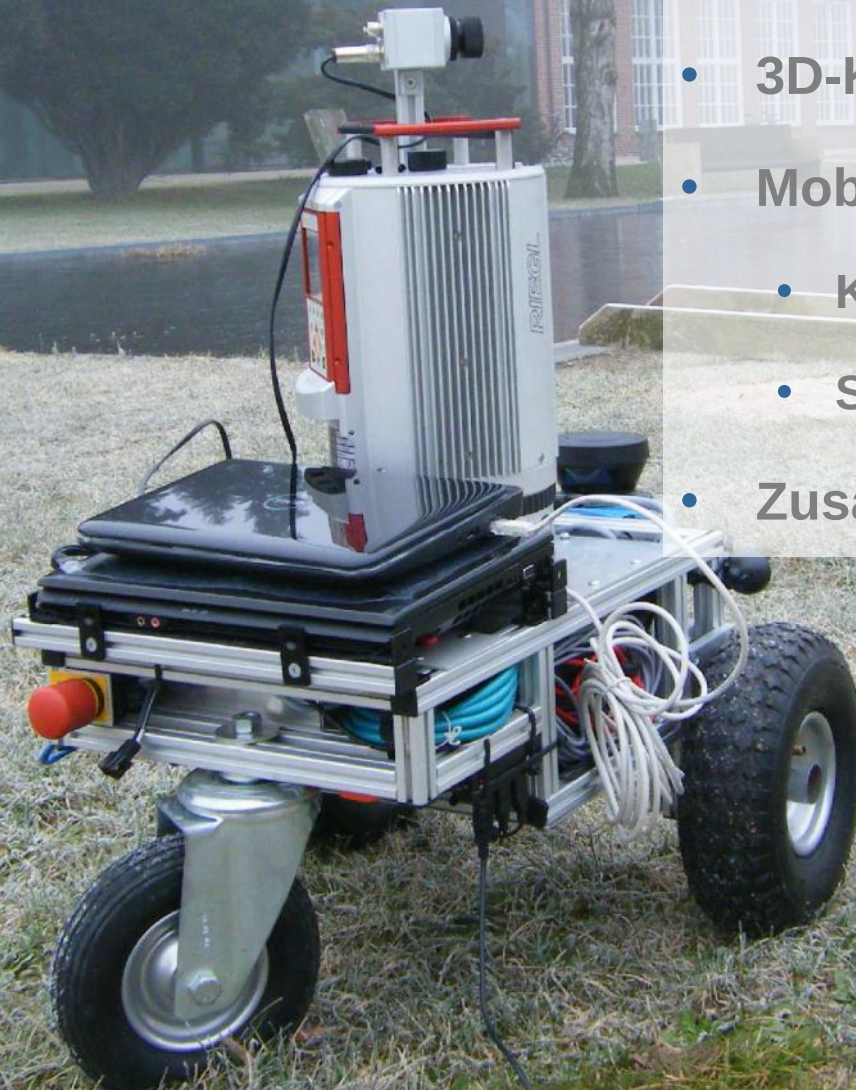
(video)





# Inhalt

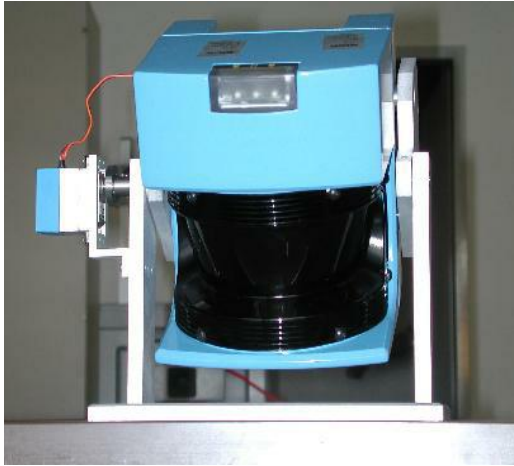
- **Einleitung**
- **3D-Kartierung mit Robotern**
- **Mobiles Laserscanning**
  - Kalibrierung
  - Semi-rigides Scanmatching
- **Zusammenfassung**



Automation  
JACOBS  
UNIVERSITY



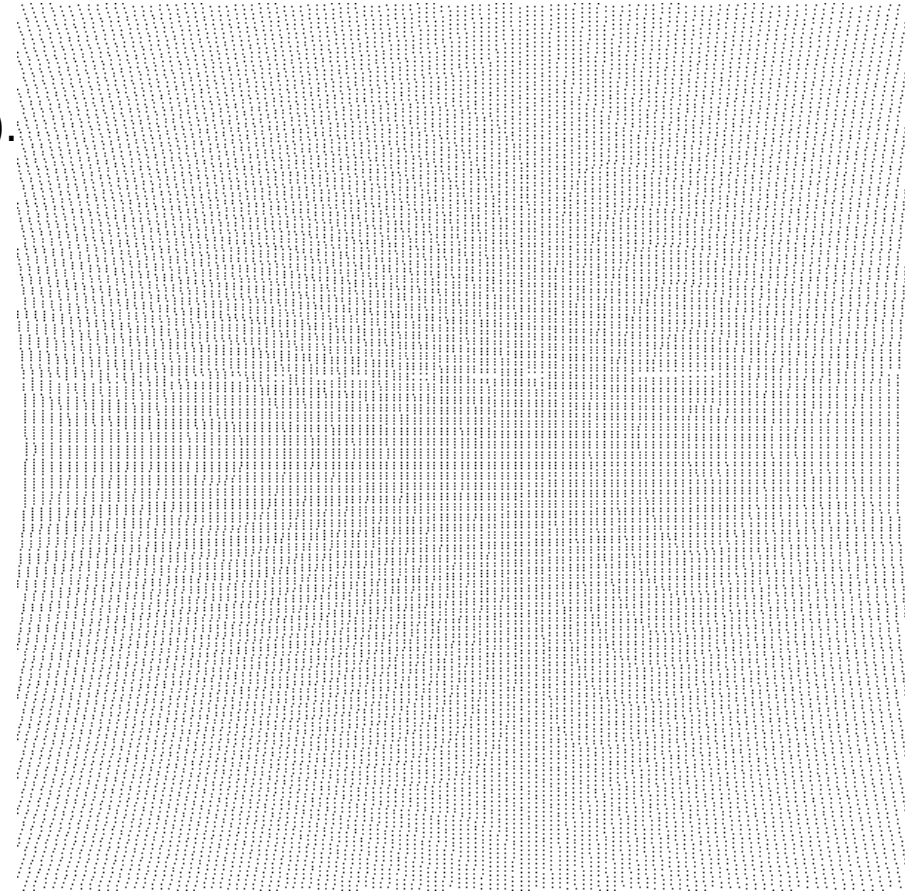
# Der 3D-Laserscanner (seit 2001)



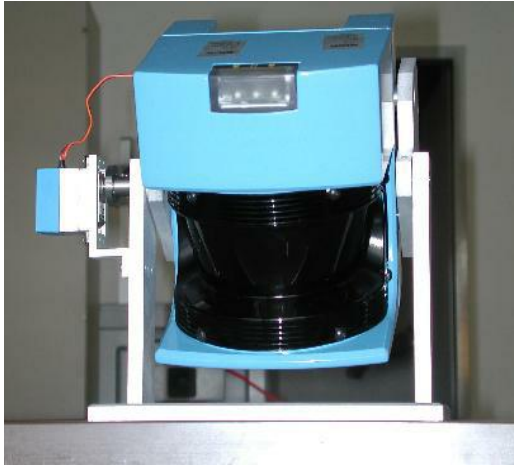
- Basiert auf einem 2D-Laserscanner (z.B., SICK LMS-200)
- Relativ billig, robust
- Kontrollierte Nickbewegung ( $120^\circ$  v).

- Auflösungen und Modi z.B. Reflektionswerte  $\{181, 361, 721\} [h] \times \{128, \dots, 500\} [v]$  pts.
- Schnelle Messungen, z.B., 3.4 sek. für  $181 \times 256$  Punkte.

Ansicht eines 3D-Scan von Scanpose



# Der 3D-Laserscanner (seit 2001)



- Basiert auf einem 2D-Laserscanner (z.B., SICK LMS-200)
- Relativ billig, robust
- Kontrollierte Nickbewegung ( $120^\circ$  v).

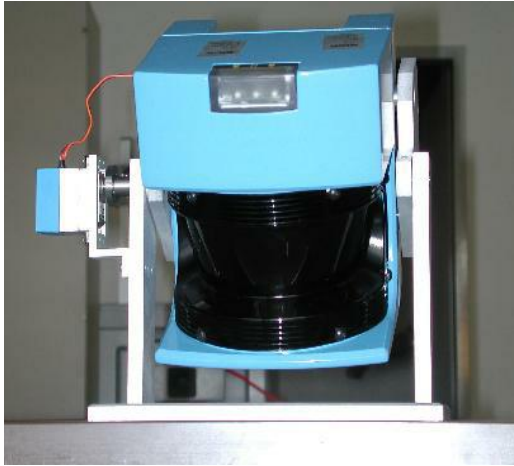
- Auflösungen und Modi z.B. Reflektionswerte  $\{181, 361, 721\}$  [h] x  $\{128, \dots, 500\}$  [v] pts.
- Schnelle Messungen, z.B., 3.4 sek. für 181x256 Punkte.

Ansicht eines 3D-Scan zirka 2 m hinter der Scanpose





# Der 3D-Laserscanner (seit 2001)



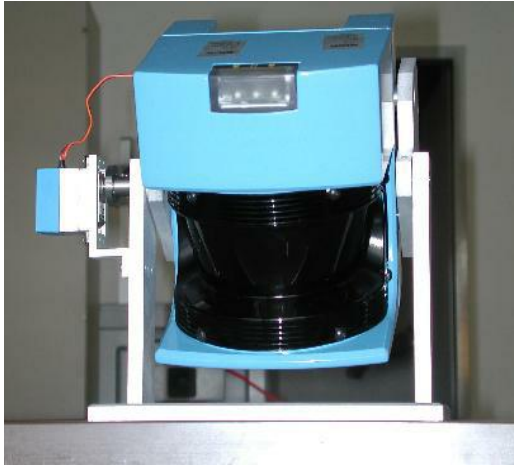
- Basiert auf einem 2D-Laserscanner (z.B., SICK LMS-200)
- Relativ billig, robust
- Kontrollierte Nickbewegung ( $120^\circ$  v).

- Auflösungen und Modi z.B. Reflektionswerte  $\{181, 361, 721\}$  [h] x  $\{128, \dots, 500\}$  [v] pts.
- Schnelle Messungen, z.B., 3.4 sek. für 181x256 Punkte.

Ansicht eines 3D-Scan als Tiefenbild



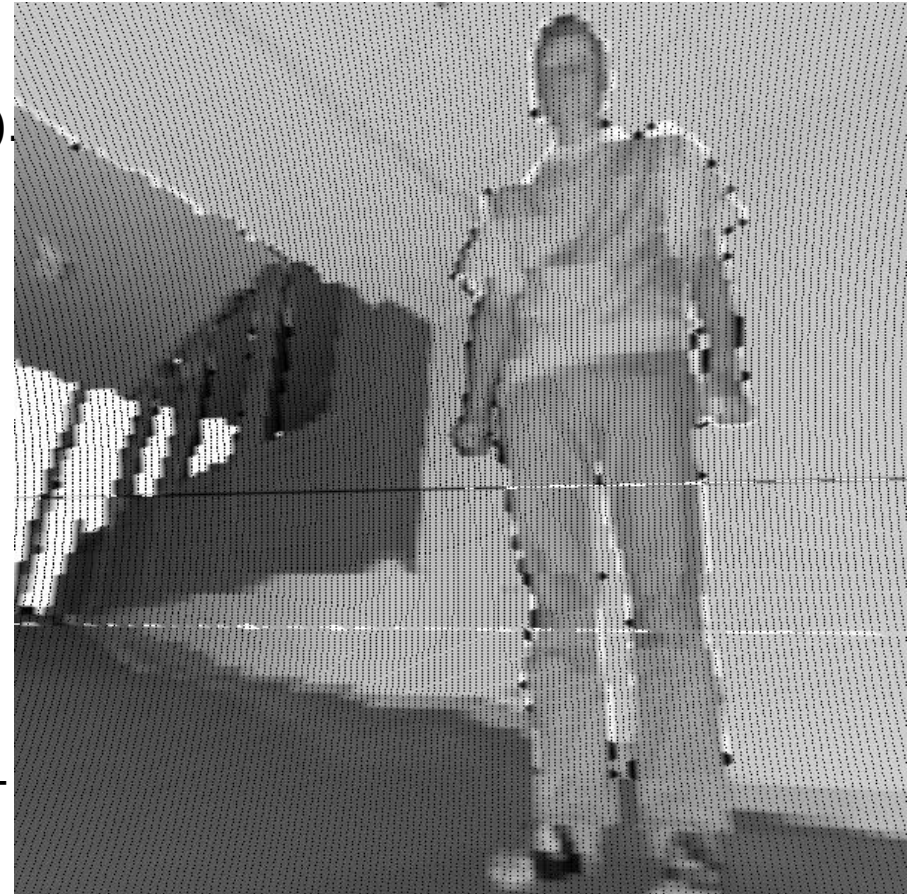
# Der 3D-Laserscanner (seit 2001)



- Basiert auf einem 2D-Laserscanner (z.B., SICK LMS-200)
- Relativ billig, robust
- Kontrollierte Nickbewegung ( $120^\circ$  v).

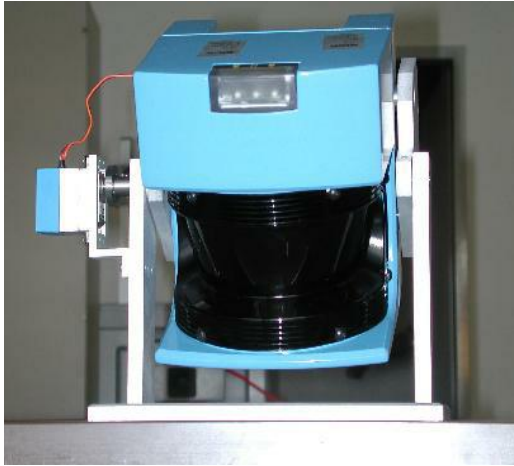
- Auflösungen und Modi z.B. Reflektionswerte  $\{181, 361, 721\}$  [h] x  $\{128, \dots, 500\}$  [v] pts.
- Schnelle Messungen, z.B., 3.4 sek. für 181x256 Punkte.

Ansicht eines 3D-Scan als Reflektionsbild





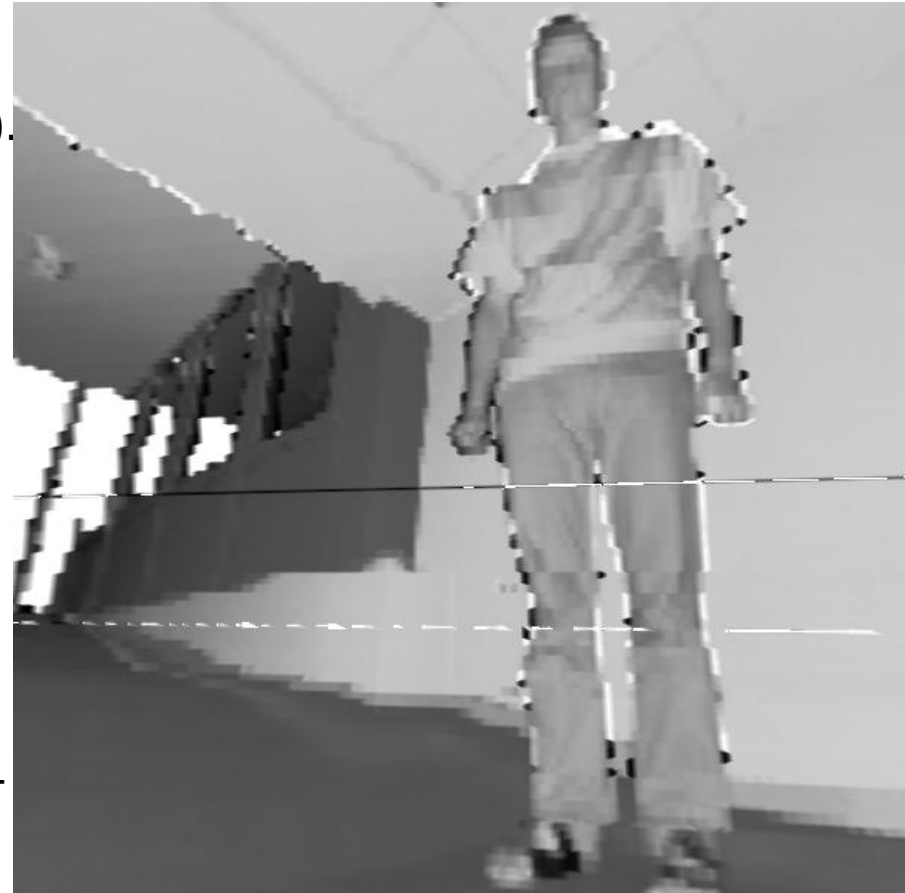
# Der 3D-Laserscanner (seit 2001)



- Basiert auf einem 2D-Laserscanner (z.B., SICK LMS-200)
- Relativ billig, robust
- Kontrollierte Nickbewegung ( $120^\circ$  v).

- Auflösungen und Modi z.B. Reflektionswerte  $\{181, 361, 721\}$  [h] x  $\{128, \dots, 500\}$  [v] pts.
- Schnelle Messungen, z.B., 3.4 sek. für 181x256 Punkte.

Ansicht eines 3D-Scan als Reflektionsbild



# Der Ariadne Roboter (2002 / 2003)

Der 3D-Scanner wurde zunächst auf Ariadne montiert um die Hindernisvermeidung zu verbessern und 3D-Karten zu erstellen.



Die Bewegung des Roboters hatte nur 3 Freiheitsgrade.

(Video Crash)    (Video NoCrash)





RoboCup

2011

- 11 July  
Istanbul



Lenar  
**EVG**  
Sankt Augustin  
Evangelische Jugend Sankt Augustin

Henrik  
**EVG**  
Sankt Augustin  
Evangelische Jugend Sankt Augustin

Henrik  
**EVG**  
Sankt Augustin  
Evangelische Jugend Sankt Augustin

Merit  
**EVG**  
Sankt Augustin  
Evangelische Jugend Sankt Augustin

# Der mobile Roboter Kurt3D (seit 2004)



- Kurt3D ist leicht (ca. 25 kg)
- Zwei 90W (200W) Motoren, 48 NiMH a 4500mAh, C167 Microcontroller, CAN Bus, Centrino-Laptop

- Indoor/Outdoor Version
- Hauptsensor: 3D-Scanner



(video)



# Der mobile Roboter Irma3D (seit 2010)

- Automatisierung im Bereich terrestrisches Scannen



(video)

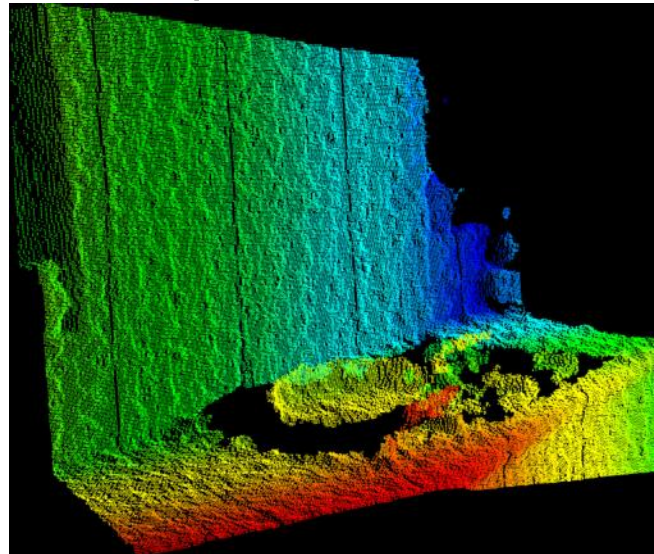
(video)

- Kombination terrestrisches / kinematisches Laserscanning

# Kinecting

## Microsoft Kinect

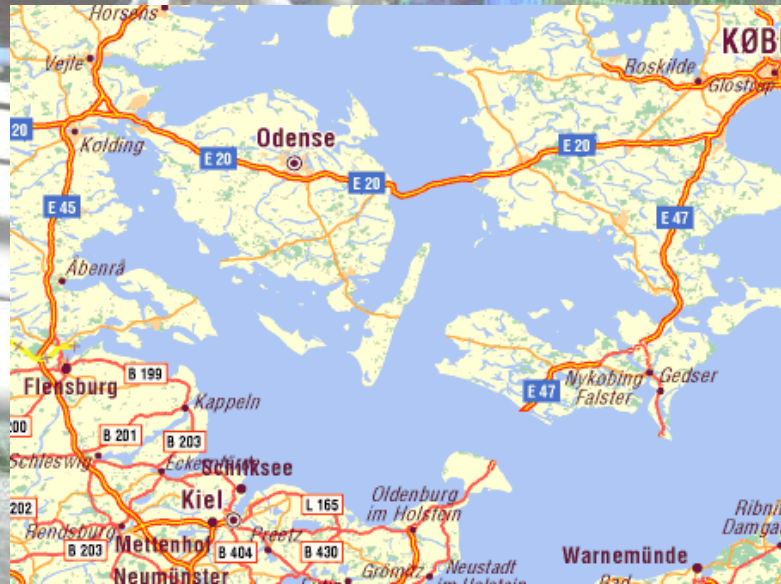
- Video 30 Hz
- RGB Video: 8-bit VGA Auflösung (640 × 480 Pixel)
- Monochrome Video Stream  
(depth information): 11-bit VGA  
2048 Entfernungswerte
- Entfernung: 1,2 – 3,5 m, (enhanced: 0,7 – 6 m)
- Öffnungswinkel:  
57° (h) × 43°(v)
- Nickbewegung  
27°
- preisgünstig





# Simultane Lokalisierung und Kartierung (SLAM)

- Ist die Pose (Position und Orientierung) eines mobilen Roboters genau bekannt, lassen sich die Messdaten zum Aufbau einer Karte verwenden.
- Leider sind jegliche Pose-Messungen ungenau ☹
- Die Pose eines Roboters lässt sich leicht aus den Sensordaten bei gegebener Karte berechnen.



*The chicken and egg dilemma...*



# Simultane Lokalisierung und Kartierung (SLAM)

- Ist die Pose (Position und Orientierung) eines mobilen Roboters genau bekannt, lassen sich die Messdaten zum Aufbau einer Karte verwenden.
- Leider sind jegliche Pose-Messungen ungenau ☹
- Die Pose eines Roboters lässt sich leicht aus den Sensordaten bei gegebener Karte berechnen.



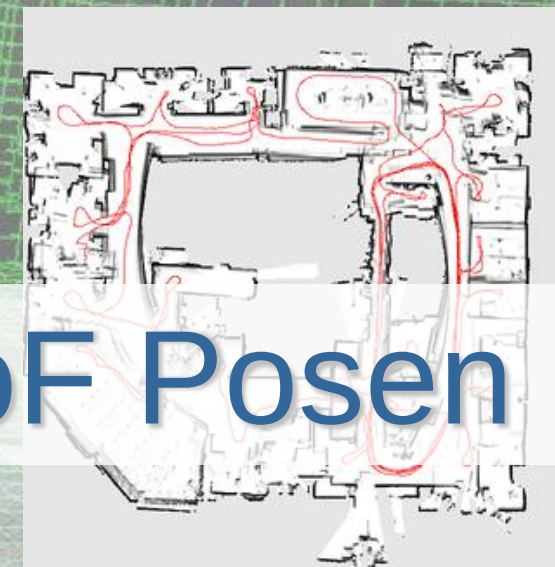
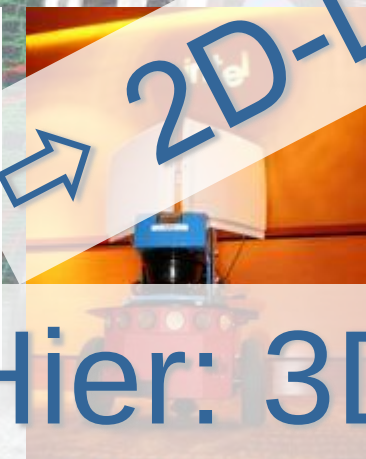
(Fig. Burgard et al.)





# Simultane Lokalisierung und Kartierung (SLAM)

- Ist die Pose (Position und Orientierung) eines Roboters genau bekannt, lassen sich die Messungen zum Aufbau einer Karte verwenden.
- Leider sind jegliche Pose-Messungen ungenau ☹
- Die Pose eines Roboters lässt sich leicht aus den Sensordaten bei gegebener Karte berechnen.



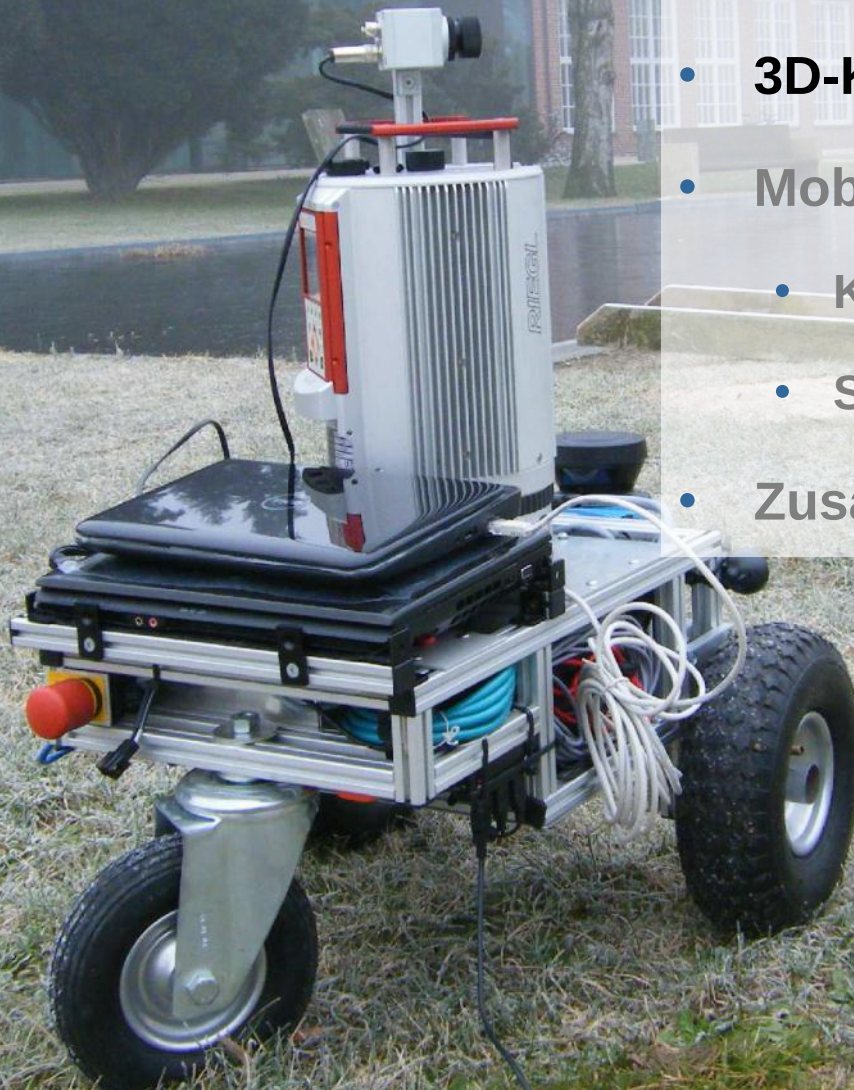
⇒ Hier: 3D-Data, 6DoF Posen

(Fig. Burgard et al.)



# Inhalt

- Einleitung
- 3D-Kartierung mit Robotern
- Mobiles Laserscanning
  - Kalibrierung
  - Semi-rigides Scanmatching
- Zusammenfassung



Automation  
JACOBS  
UNIVERSITY



# Der ICP-Algorithmus

**Scan Registrierung** Zwei unabhängig voneinander aufgenommene Scans in einem globalen Koordinatensystem zusammenfügen.

**Iterative Closest Point** Algorithmus [Besl/McKay 1992]

Für eine Punktmenge  $M$  ("Modellmenge") und einer Datenmenge  $D$

1. Bestimme Punkt-Punkt Korrespondenzen
2. Minimiere für Rotation  $\mathbf{R}$ , Translation  $\mathbf{t}$

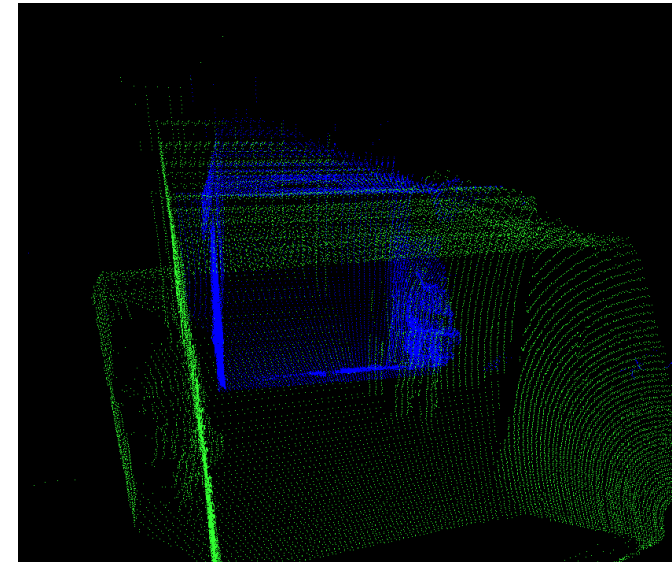
$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{m}_i - (\mathbf{R}\mathbf{d}_i + \mathbf{t})\|^2$$

3. Iteriere 1. und 2.

Berechnung der Rotation mit SVD

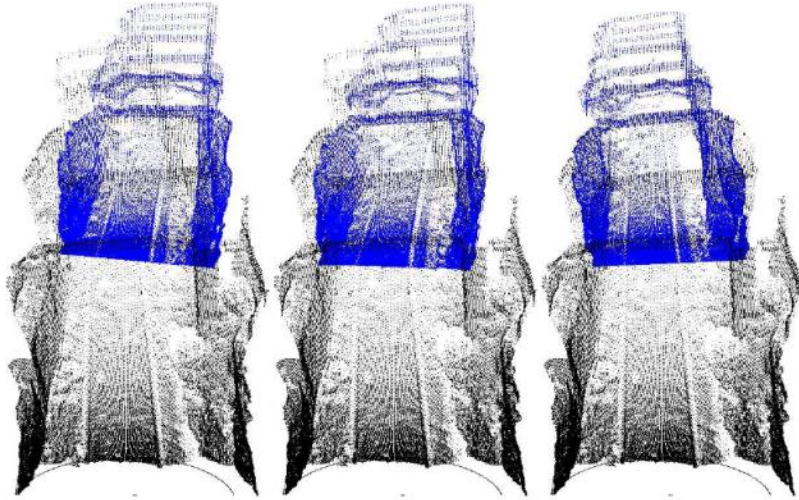
- Funktioniert in 6 Dimensionen  $\Rightarrow$  **6D SLAM**

**Achtung:** ICP benötigt eine gute initiale Schätzung!



# 3D-Kartierung mit ICP – Beispiele

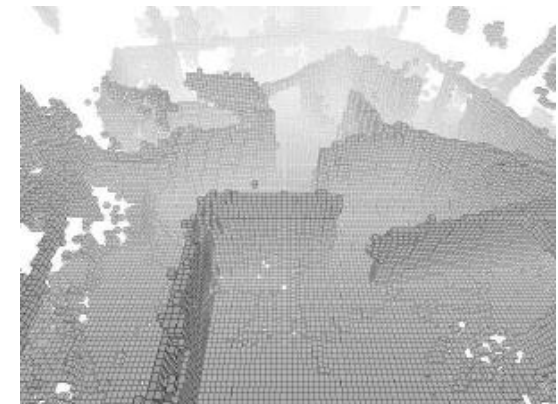
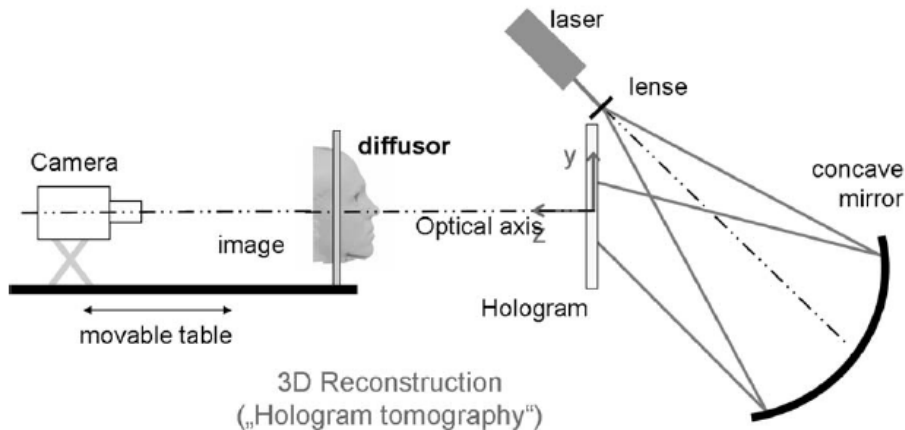
## Kartierung von Bergwerken (CMU)



RoboCup Rescue



## 3D-Kartierung im Bereich der medizinischen Bildverarbeitung





# Der globale Algorithmus

**Scan Registrierung** Zwei 3D-Scans (Punktwolken) in ein gemeinsames Koordinatensystem bringen

**Iterative Closest Point** Algorithmus [Besl/McKay 1992]

Für eine Punktwolke  $M$  („Modell“) und eine Punktwolke  $D$  („Daten“)

1. Bestimme Korrespondenzen in  $\{0,1\}$
2. Minimiere für die Rotation  $\mathbf{R}$ , Translation  $\mathbf{t}$

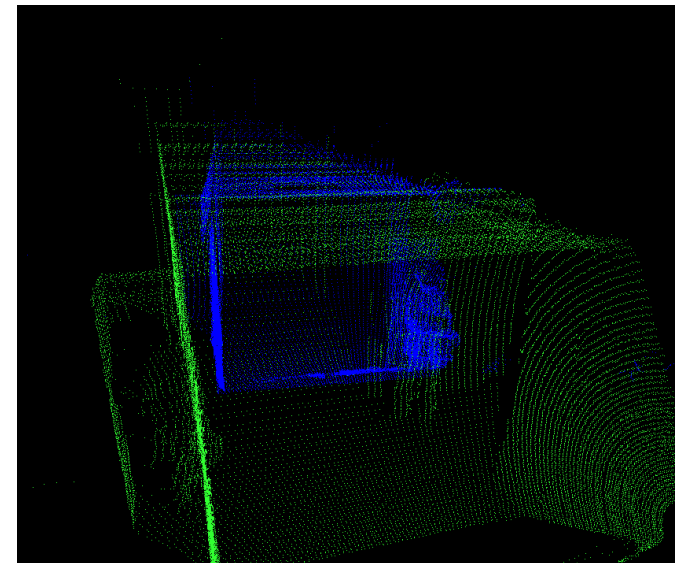
$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{m}_i - (\mathbf{R}\mathbf{d}_i + \mathbf{t})\|^2$$

3. Iteriere 1. und 2.

Neu globale Fehlerfunktion:  
z.B. SVD-basierte Berechnung der Rotation

$$E = \sum_{j \rightarrow k} \sum_i |\mathbf{R}_j \mathbf{m}_i + \mathbf{t}_j - (\mathbf{R}_k \mathbf{d}_i + \mathbf{t}_k)|^2$$

- formale 6D-Translations- und 6D-Rotationsdimensionen  $\Rightarrow$  6D SLAM  
Keine geschlossene Lösung, aber 3 verschiedene Linearisierungen möglich!

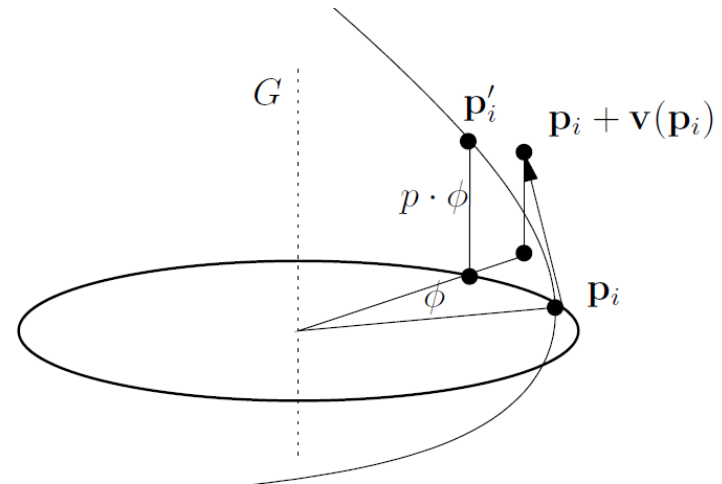


# Linearisierte Lösungen für globales Scanmatching

$$E = \sum_{j \rightarrow k} \sum_i |\mathbf{R}_j \mathbf{m}_i + \mathbf{t}_j - (\mathbf{R}_k \mathbf{d}_i + \mathbf{t}_k)|^2$$

- Helix-Transformation

$$\mathbf{v}(\mathbf{p}) = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{x} \times \mathbf{p}.$$



$$E = \sum_{j \rightarrow k} \sum_i (\mathbf{m}_i - \mathbf{d}_i + (\bar{\mathbf{x}}_j + \mathbf{x}_j \times \mathbf{m}_i) - (\bar{\mathbf{x}}_k + \mathbf{x}_k \times \mathbf{m}_i))^2$$

... Lösen eines linearen Gleichungssystems



# Linearisierte Lösungen für globales Scanmatching

$$E = \sum_{j \rightarrow k} \sum_i |\mathbf{R}_j \mathbf{m}_i + \mathbf{t}_j - (\mathbf{R}_k \mathbf{d}_i + \mathbf{t}_k)|^2$$

- Kleine Winkel Approx.  $\sin \theta \approx \theta - \frac{\theta^3}{3} + \frac{\theta^5}{5} - \dots$   
 $\cos \theta \approx 1 - \frac{\theta^2}{2} + \frac{\theta^4}{4} - \dots$

$$\mathbf{R} \approx \begin{pmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_x \theta_y + \theta_z & 1 - \theta_x \theta_y \theta_z & -\theta_x \\ \theta_x \theta_z - \theta_y & \theta_x + \theta_y \theta_z & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R} \approx \begin{pmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z & 1 & -\theta_x \\ -\theta_y & \theta_x & 1 \end{pmatrix}$$

# Linearisierte Lösungen für globales Scanmatching

$$E = \sum_{j \rightarrow k} \sum_i |\mathbf{R}_j \mathbf{m}_i + \mathbf{t}_j - (\mathbf{R}_k \mathbf{d}_i + \mathbf{t}_k)|^2$$

- Explizite Modellierung der Unsicherheiten
- Annahme: Der unbekannte Fehler in der Pose ist eine Normalverteilung

$$\begin{aligned} W &= \sum_{j \rightarrow k} (\bar{\mathbf{E}}_{j,k} - \mathbf{E}'_{j,k})^T \mathbf{C}_{j,k}^{-1} (\bar{\mathbf{E}}'_{j,k} - \mathbf{E}'_{j,k}) \\ &= \sum_{j \rightarrow k} (\bar{\mathbf{E}}_{j,k} - (\mathbf{X}'_j - \mathbf{X}'_k)) \mathbf{C}_{j,k}^{-1} (\bar{\mathbf{E}}'_{j,k} - (\mathbf{X}'_j - \mathbf{X}'_k)). \end{aligned}$$

$$E_{j,k} = \sum_{i=1}^m \|\mathbf{X}_j \oplus \mathbf{d}_i - \mathbf{X}_k \oplus \mathbf{m}_i\|^2 = \sum_{i=1}^m \|\mathbf{Z}_i(\mathbf{X}_j, \mathbf{X}_k)\|^2$$



# Vergleich der Parametrisierungen

## Globaler ICP Algorithmus

- Gaußsches Rauschen in der „3D-Punktwolke“
- Lokal optimal
- ICP-ähnliche Iterationen mit neu berechneten Punkt-korrespondenzen

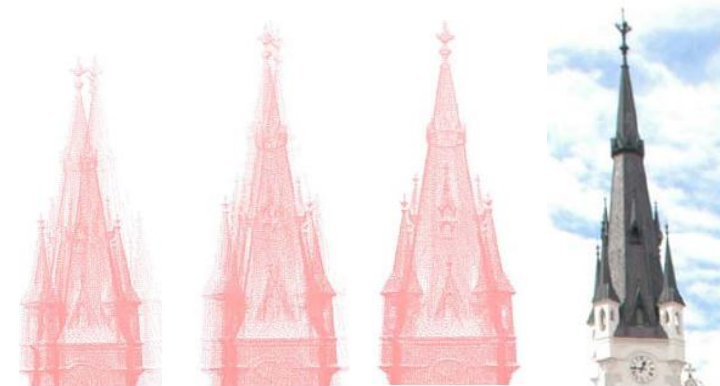
## Klassisches Pose GraphSLAM

- Gaußsches Rauschen im Parameteraum der Pose
- Gradientenabstieg notwendig
- ICP-ähnliche Iterationen mit neu berechneten Punkt-korrespondenzen

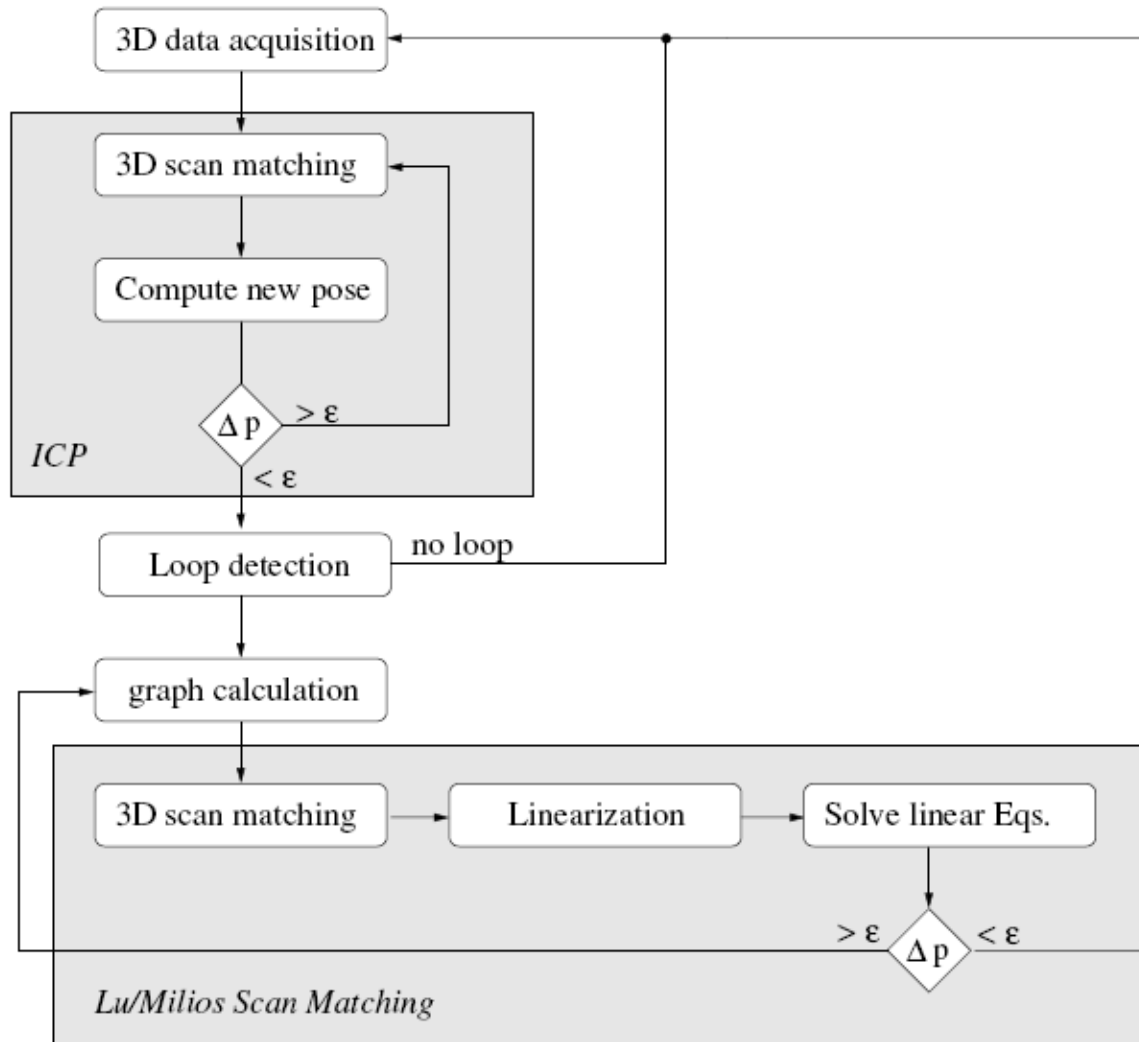
- Riegsl Laser Measurement GmbH

(Video courtesy of Riegsl)

(Video 1)   (Video 2)   (Video 3)



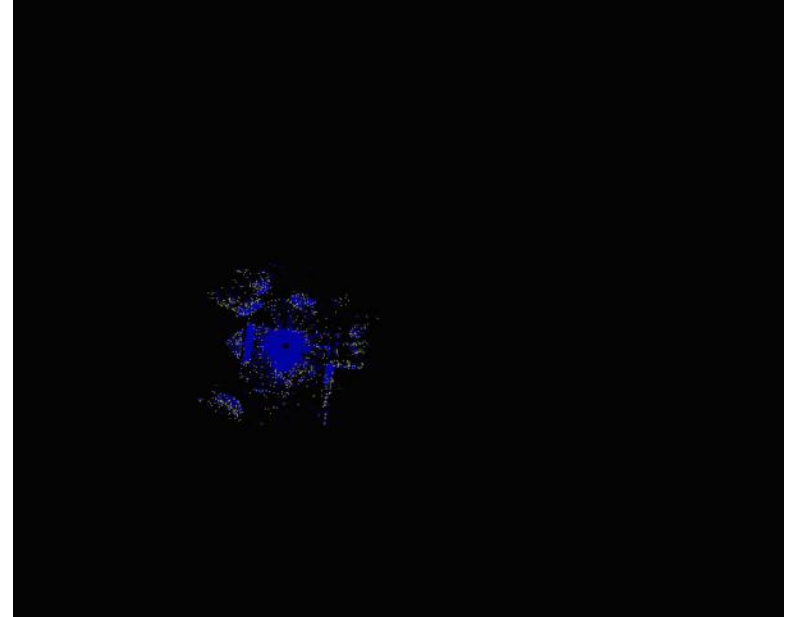
# Detektion geschlossener Kreise und globale Relaxation





# 6D SLAM – vollständiges Beispiel

- Leibniz University Hannover (RTS)





# Inhalt

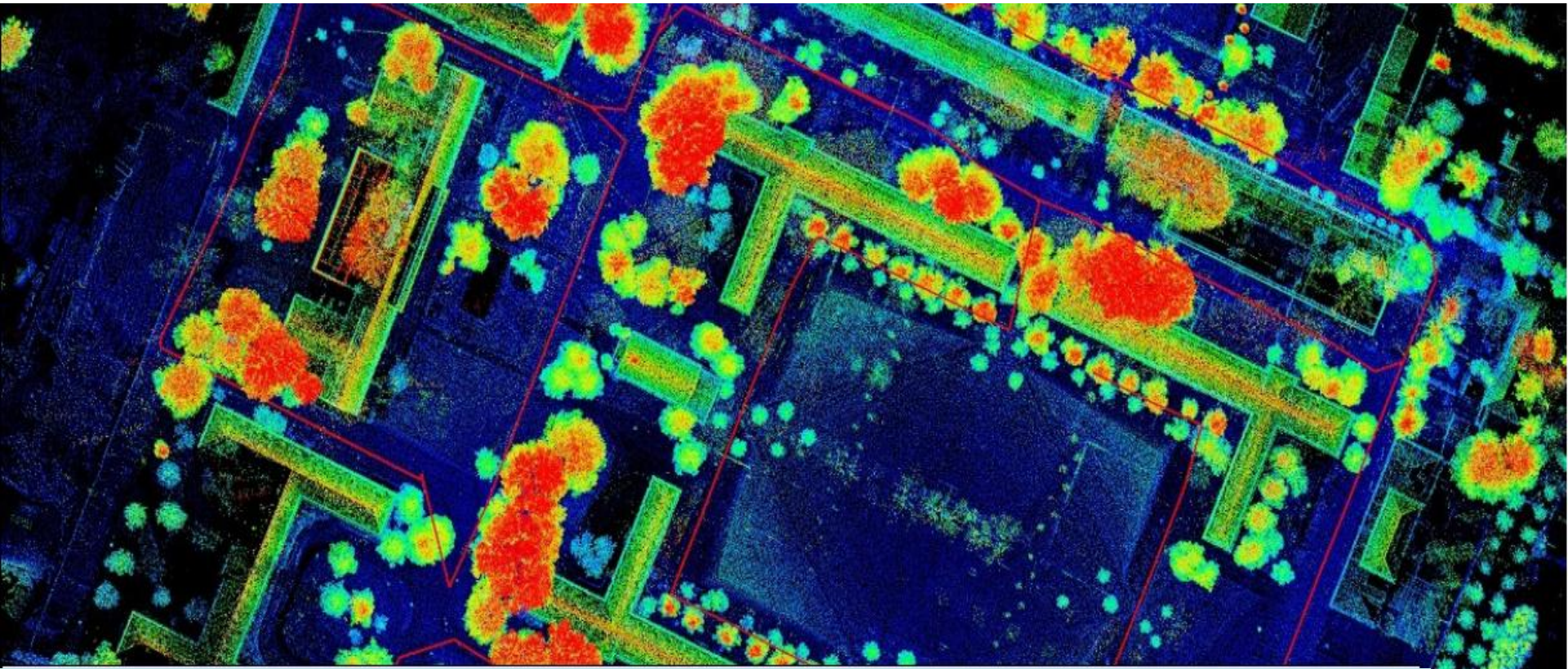
- Einleitung
- 3D-Kartierung mit Robotern
- **Mobiles Laserscanning**
  - Kalibrierung
  - Semi-rigides Scanmatching
- Zusammenfassung



Automation  
JACOBS  
UNIVERSITY



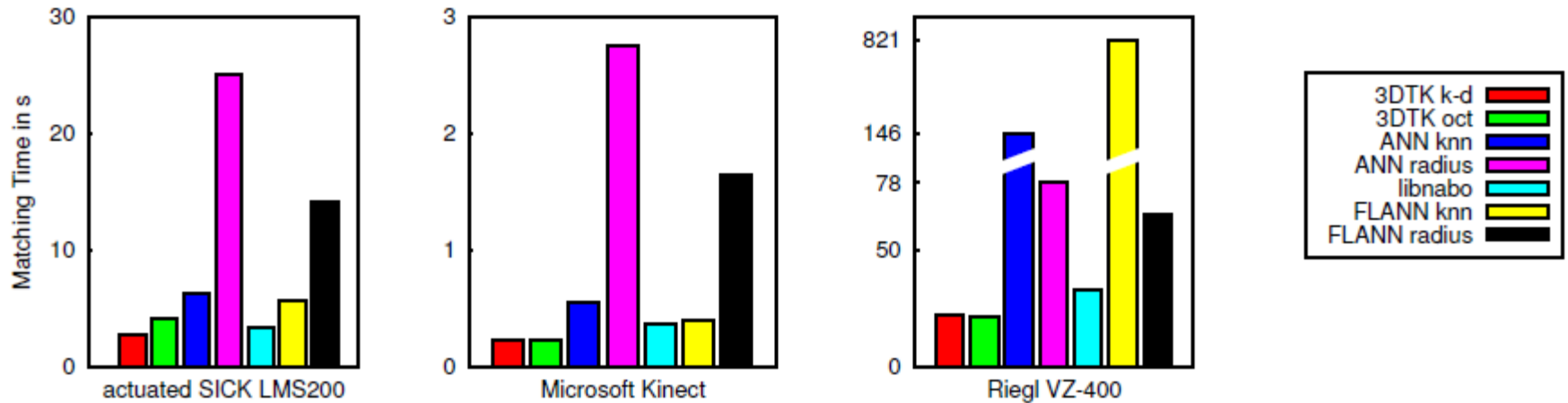
# 3D-Punktwolkenverarbeitung – Herausforderungen



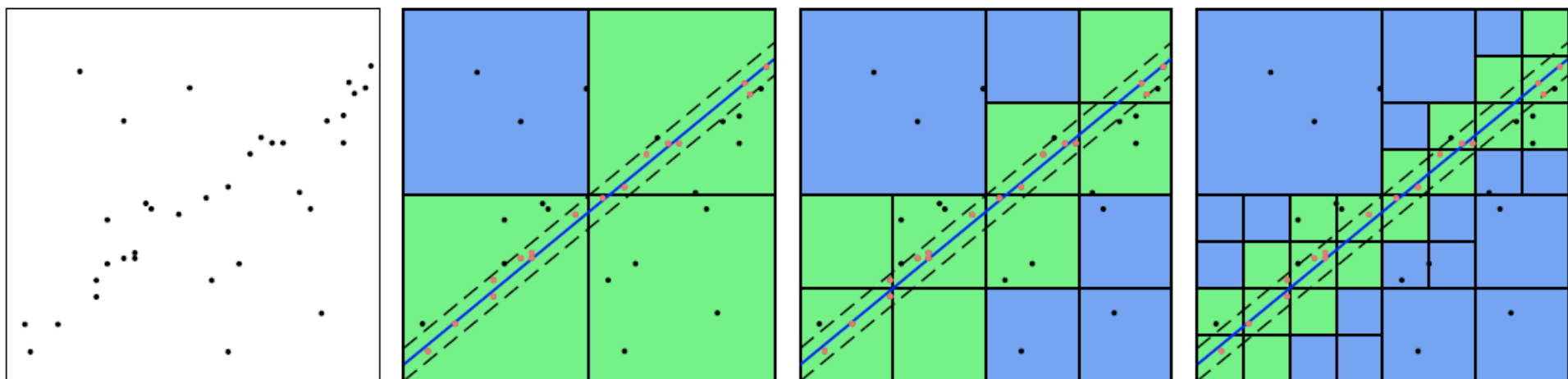
- 122 Scans mit insgesamt mehr als 2 Milliarden 3D-Punkten
- 4 Koordinaten pro Punkt, 8 Byte pro Koordinate => 60 GByte
- Komprimiert nur 8.8Gbyte mit 100  $\mu\text{m}$  Genauigkeit

# Effiziente Algorithmen

- Effizienter  $k$ -d Baum und Octree zur Punktwolkenreduktion und Nächste Nachbar Suche



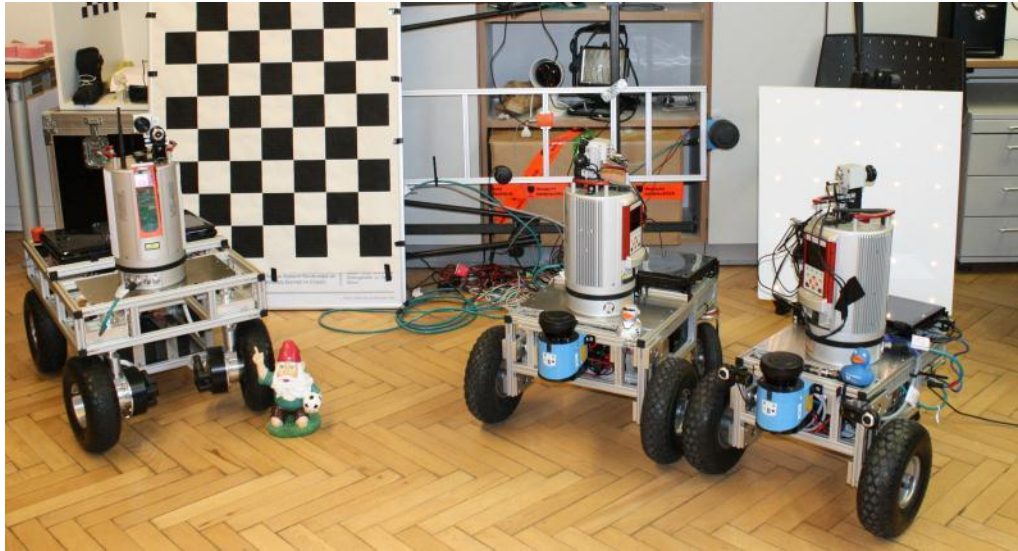
- RANSAC: Validierung von Hypothesen





# Mobile Laserscansysteme

## Experimentell

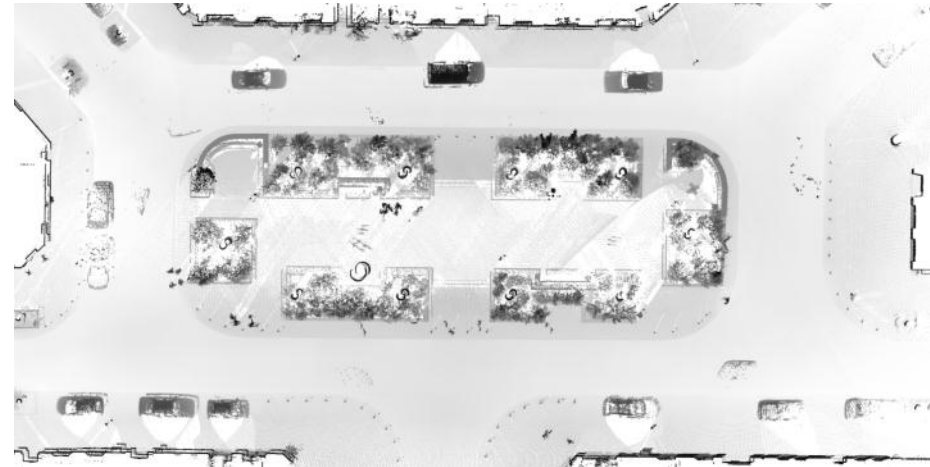


## Professionell



# Stand der Technik

- Für jeden Sensor bestimme die Position und Orientierung auf dem Fahrzeug (Kalibrierung)
- Daten Akquisition
- Extrahiere die Trajektorie des Fahrzeugs mit Hilfe der Sensordaten (Kalman-Filter)
- Abwickeln der Laserscans, um eine 3D-Punktwolke zu erzeugen





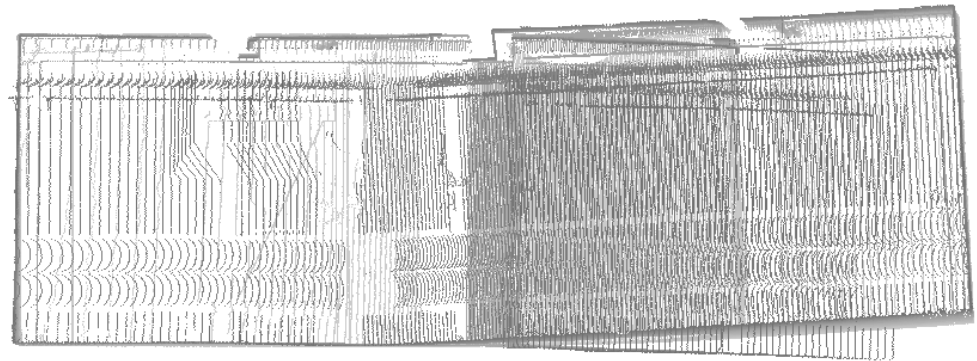
# Kalibrierung – Definition der Punktwolkenqualität

- Punktwolke P repräsentiert Stichproben aus einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
- Schätze diese Funktion (Weltmodell):

$$d(\mathbf{l}) = \frac{1}{m} \sum_j^m G(\mathbf{l} - \mathbf{p}_j, \sigma^2 \mathbf{I})$$

- Rényi Entropie  $d(\mathbf{l})$  erhöht sich mit Fehlern in der Punktwolke

$$- \sum_i^m \sum_j^m G(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j, 2\sigma^2 \mathbf{I})$$



# Effiziente Kalibrierung

- Auswertung der Entropie ist in  $O(m^2)$
- Gleichmäßige Reduktion der Daten in der Punktwolke
  - $m$  wird kleiner
  - Kleinerer Anteil zu der Fehlerfunktion im Suchraum
- Ausdünnung der betrachteten Punktpaare
  - Betrachte nur Paare, die mit minimaler Zeitdifferenz
  - Betrachte nur nächste Punkte
- Minimierung der Fehlerfunktion

$$E(f(\mathbf{M}, \mathbf{C})) = - \sum_i^m G(\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i, 2\sigma^2 \mathbf{I}).$$

in  $O(m \log m)$  (Rechenzeit zirka 20 Minuten)

- Powells Algorithmus  
zur Bestimmung von

$$\hat{\mathbf{C}} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{C}} E(f(\mathbf{M}, \mathbf{C}))$$



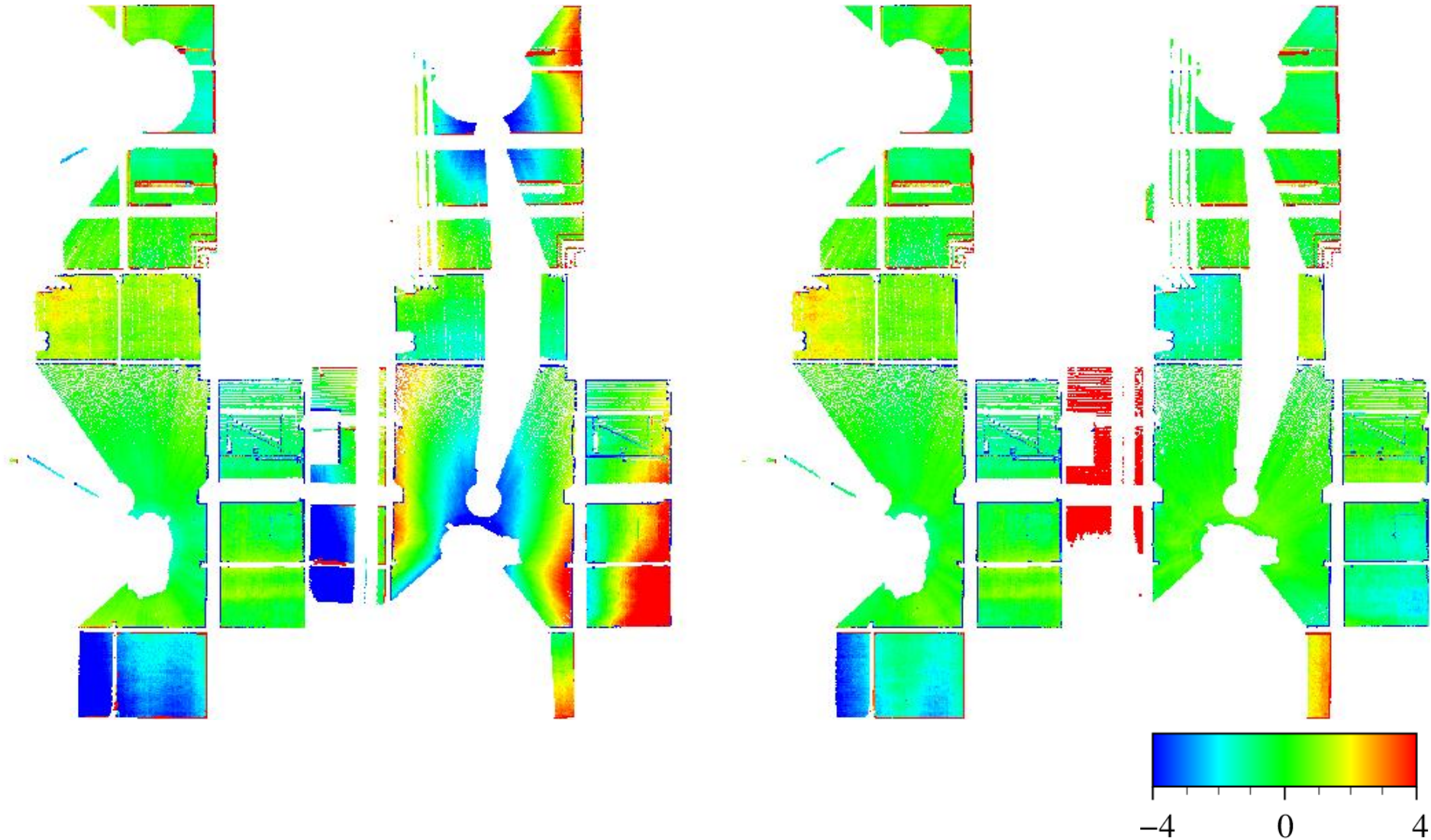
# Kalibrierung Experiment (1)



- Referenzmodell: 3D-Modell aus gemessener Punktwolke
- Vergleich: erstellte Punktwolke mit Modell



# Kalibrierung Experiment (1)





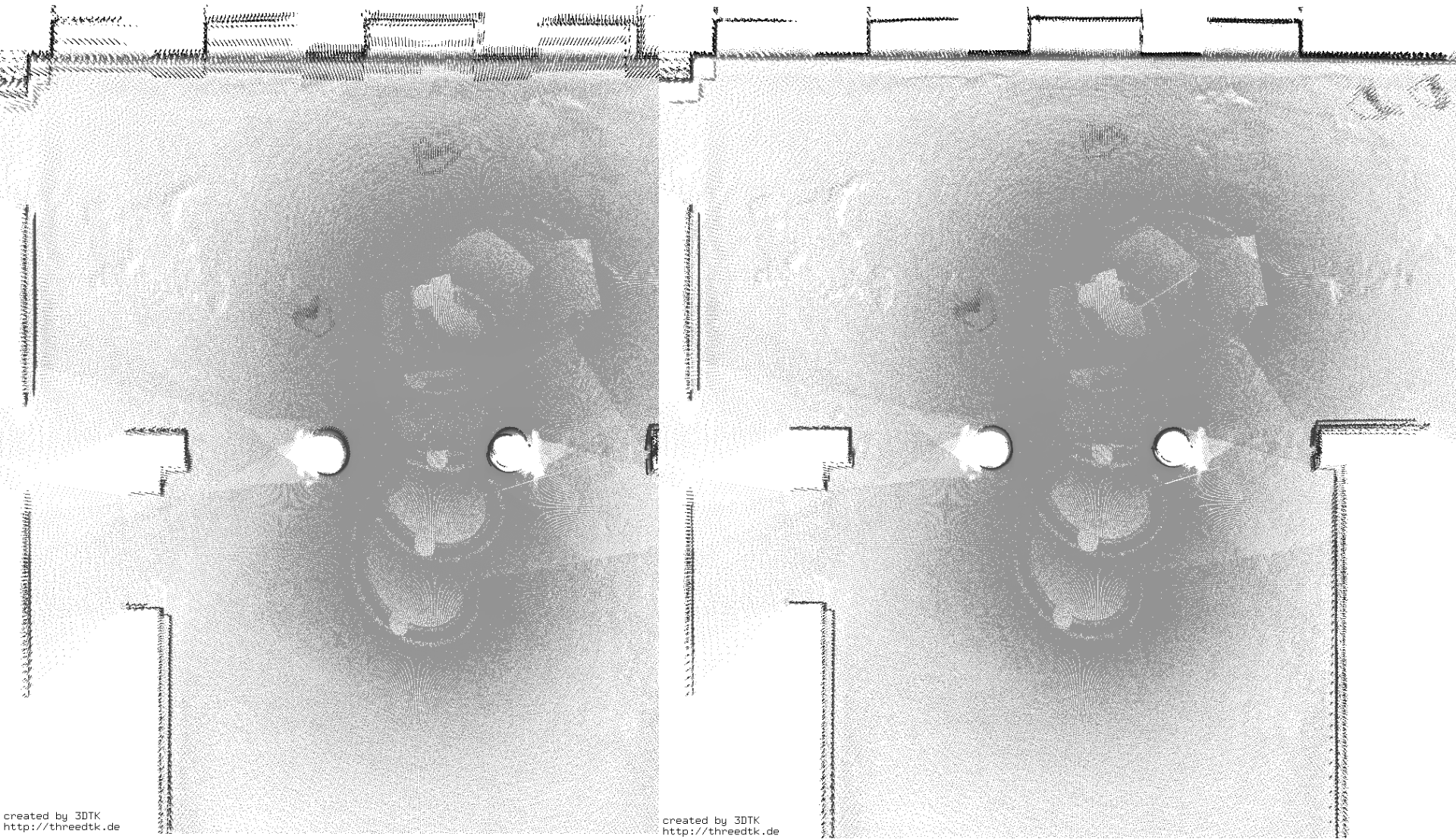
# Kalibrierung Experiment (2)

- Ostia Antica in Rom
- Umgebung ist weniger strukturiert
- Kein “ground truth”-Modell



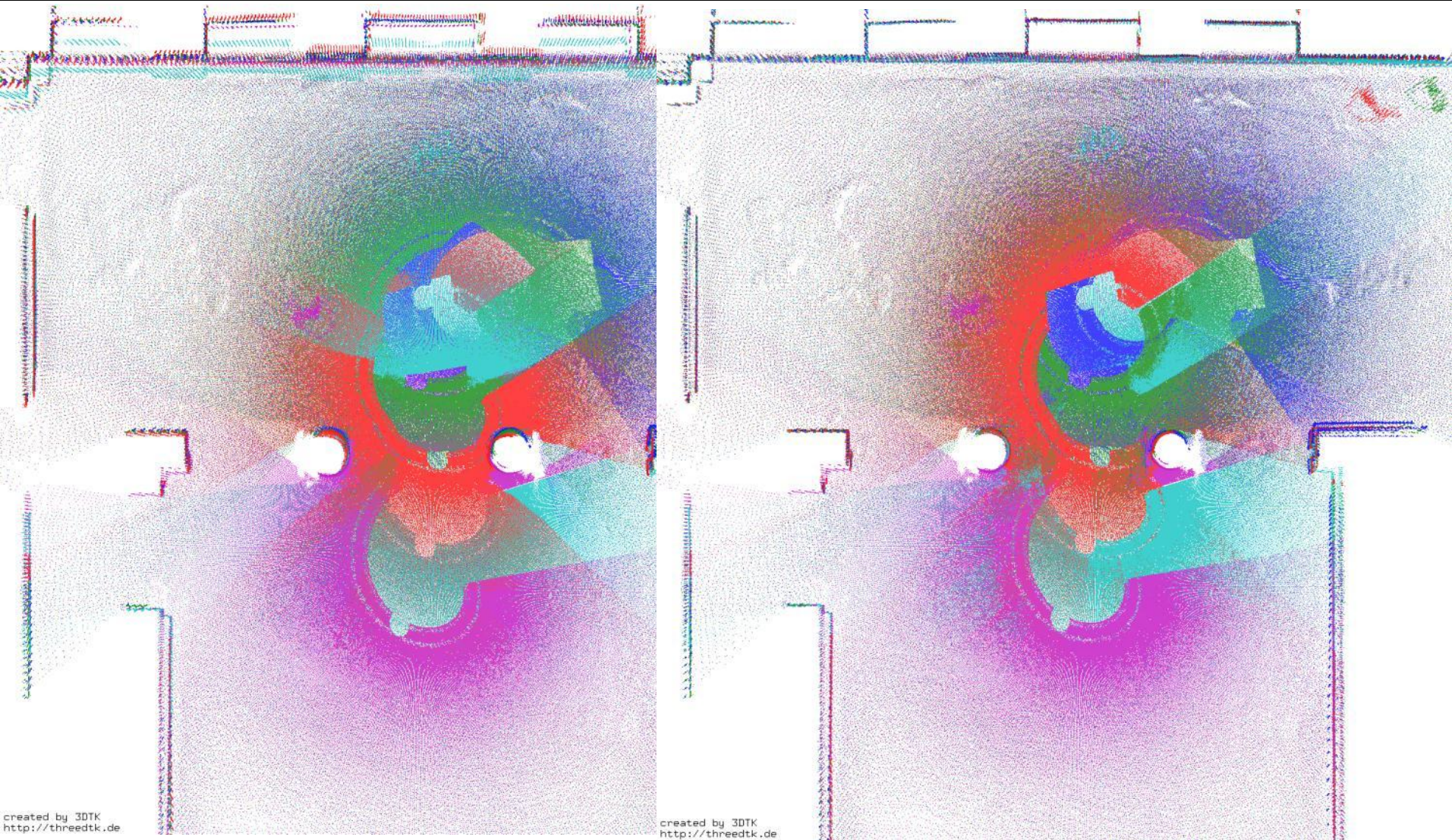


# Kalibrierung Experiment (2)



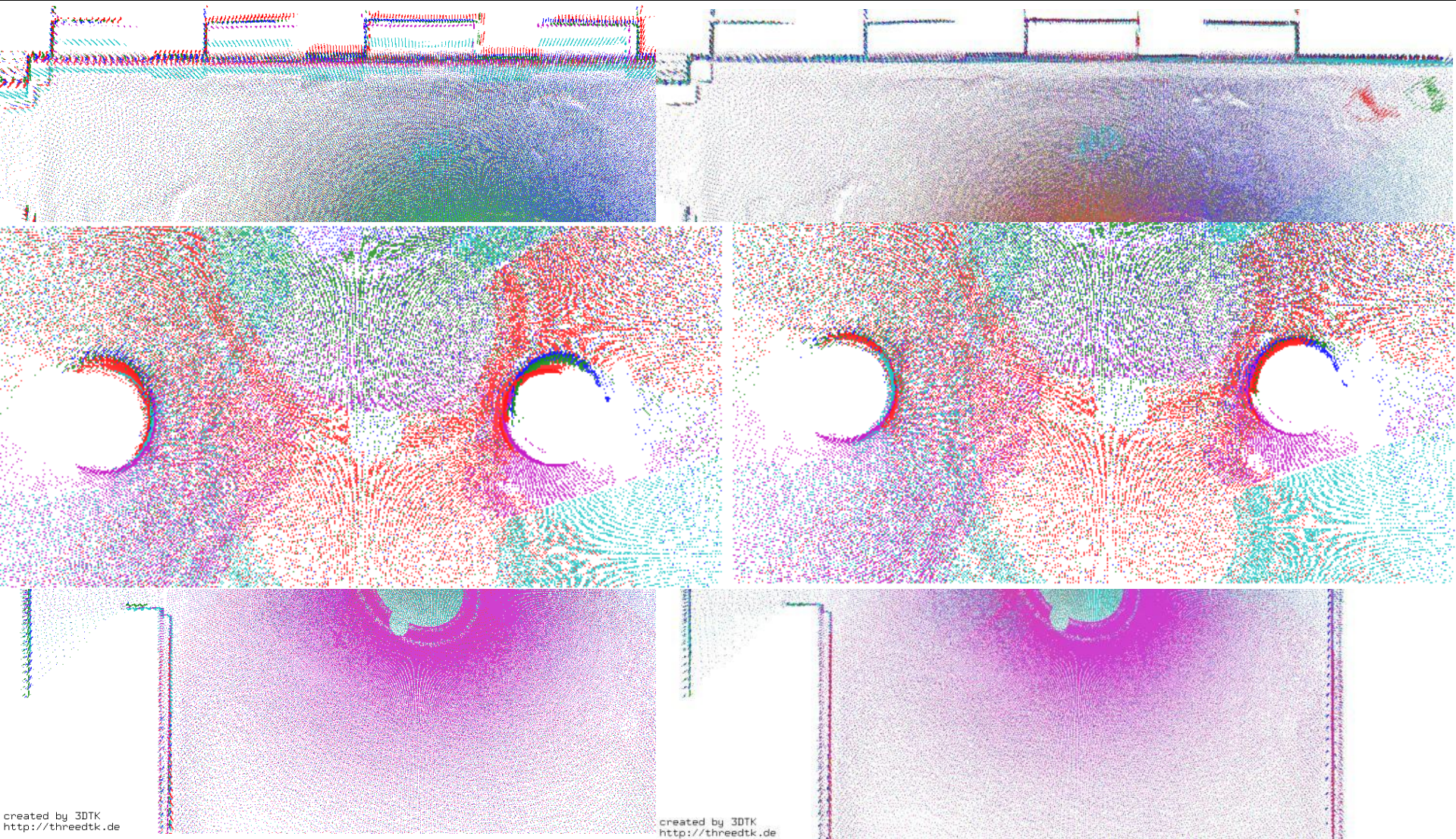


# Kalibrierung Experiment (2)





# Kalibrierung Experiment (2)





# Weitere Fehlerquellen

kein GPS  
schlechte IMU



schlechtes GPS  
keine IMU



# Semi-Rigide Registrierung

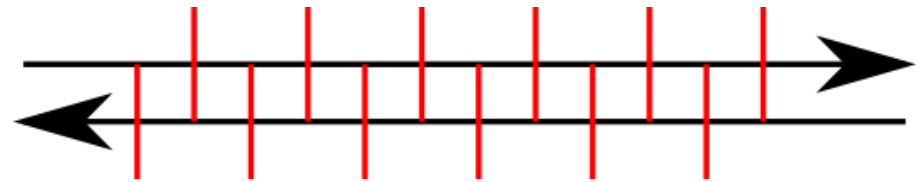
- Ziel:
  - Optimierung der Trajektorie
  - Keine oder geringe Zeitdiskretisierung ( $< 10$  ms)
  - Idealerweise Diskretisierung an jeder Punktmessung
- Ansatz:
  - Erweiterung des globalen ICP-Algorithmus / Graph-SLAM
- Modellierung
  - Trajektorie  $T = \{\mathbf{V}_0, \dots, \mathbf{V}_n\}$
  - Jedes  $\mathbf{V}_i$  ist eine Fahrzeugpose zum Zeitpunkt  $t_i$
  - IMU/Odometrie-Schätzung  $\mathbf{V}_i \rightarrow \mathbf{V}_{i+1}$
  - GPS-Schätzung  $\mathbf{V}_0 \rightarrow \mathbf{V}_i$
  - Laserscanner / Scanmatching  $\mathbf{V}_i \rightarrow \mathbf{V}_j$



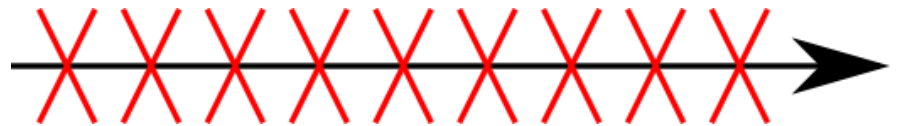
# Berechnung von $\mathbf{V}_i \rightarrow \mathbf{V}_j$

- Extrapoliere 3D-Punktwolke mit Hilfe der Schätzung der Trajektorie
- Stelle Korrespondenzen mit einer modifizierten nächsten-Nachbar-Suche
- Berücksichtige folgenden Szenarien:

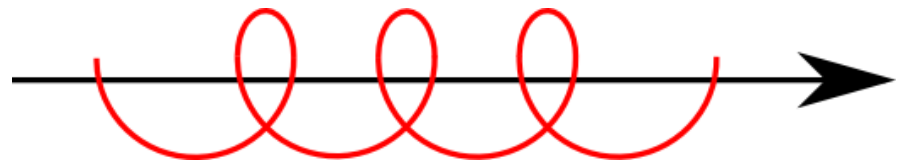
1 2D Scanner



2 2D Scanners



1 3D Scanners

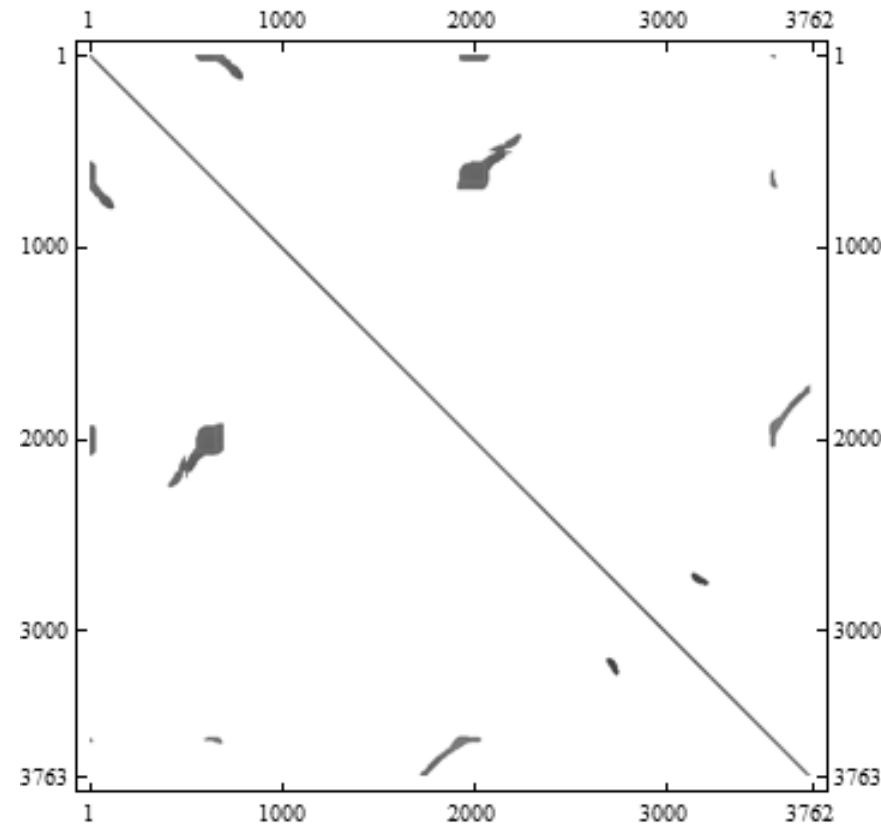


# Optimierung der Trajektorie

- Globale Fehlerfunktion

$$W = \sum_i \sum_j (\bar{\mathbf{V}}_{i,j} - (\mathbf{V}'_i - \mathbf{V}'_j)) \mathbf{C}_{i,j}^{-1} (\bar{\mathbf{V}}_{i,j} - (\mathbf{V}'_i - \mathbf{V}'_j))$$

- Minimierung durch  
 $(\mathbf{H}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H}) \mathbf{V} = \mathbf{H}^T \mathbf{C}^{-1} \bar{\mathbf{V}}$
- Lösung durch Sparse  
Choleskey Dekomposition
- Genauso möglich  
globale ICP-Lösung





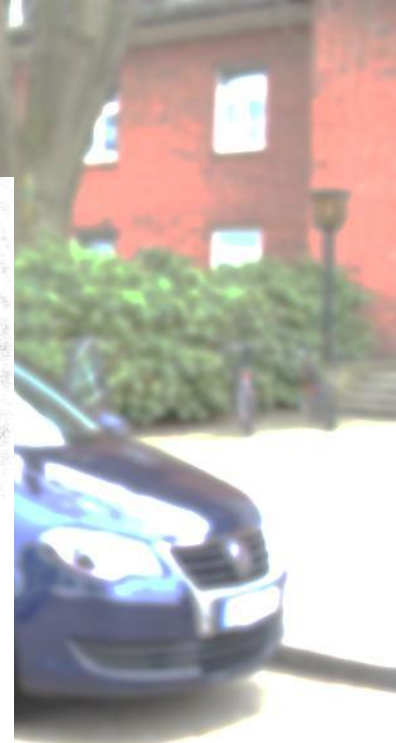
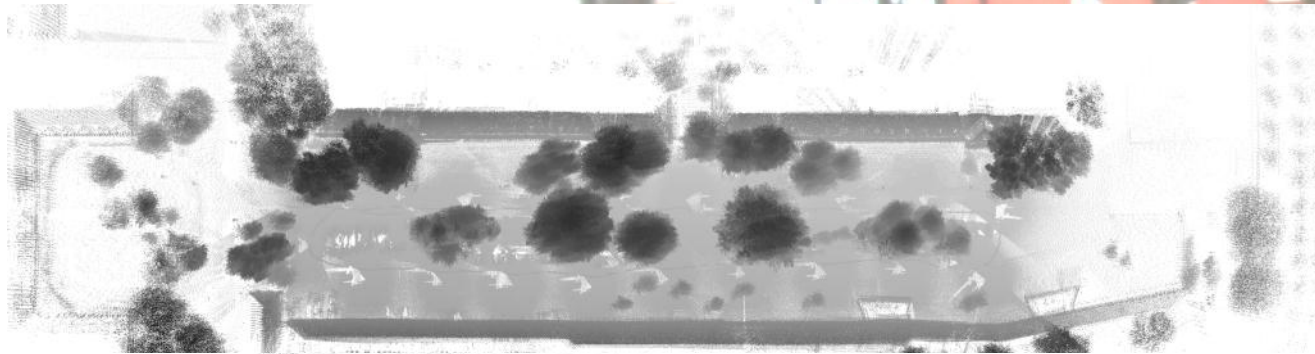
# Zusammenfassung: Algorithmus semi-rigid SLAM

1. Berechnung der Poseschätzungen

$$\mathbf{V}_i \rightarrow \mathbf{V}_{i+1} \text{ und } \mathbf{V}_0 \rightarrow \mathbf{V}_i$$

2. Erstelle eine Punktwolke aus der aktuellen Trajektorien-schätzung und der Systemkalibrierung
3. Berechne einen Octree für die 3D-Punkte (mit Zeitstempel)
4. Berechne nächste Punkte und eine Schätzung für  $\mathbf{V}_i \rightarrow \mathbf{V}_j$
5. Aktualisiere die Trajektorie
6. Wiederhole Schritte 2 – 5 bis zur Konvergenz

# Experiment I





# Experiment II

- Daten und Analyse von TopScan GmbH  
(Dr. Joachim Lindenberg)



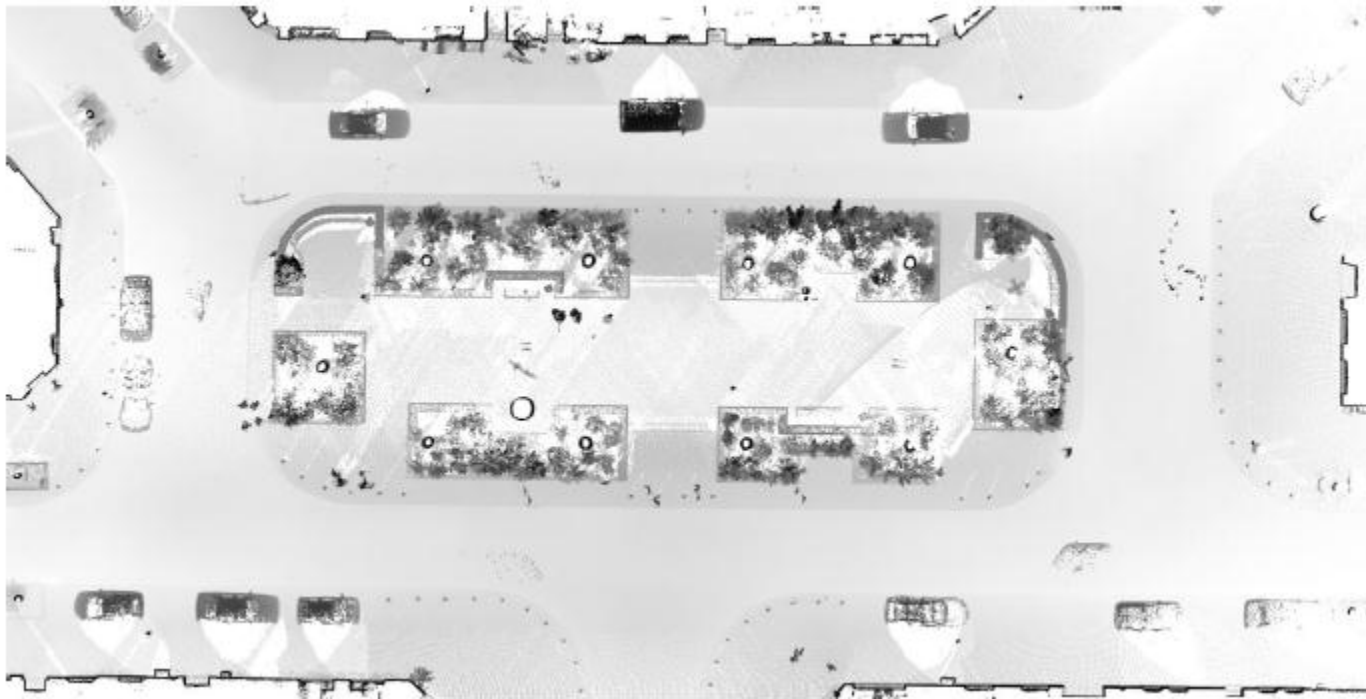
(video)

(video)

(video)

# Experiment II

- Daten und Analyse von TopScan GmbH  
(Dr. Joachim Lindenberg)



(video)

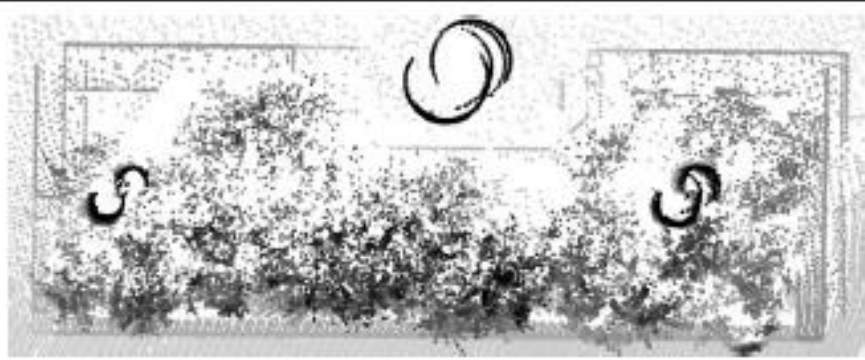
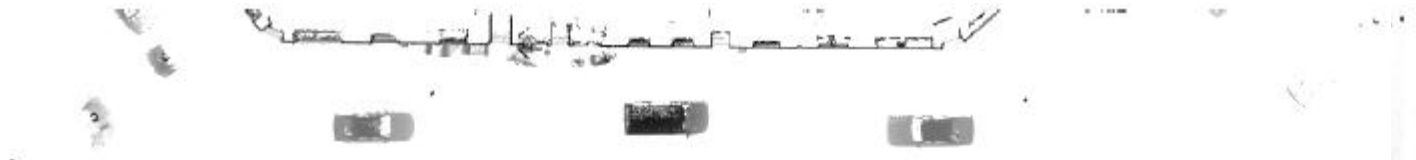
(video)

(video)

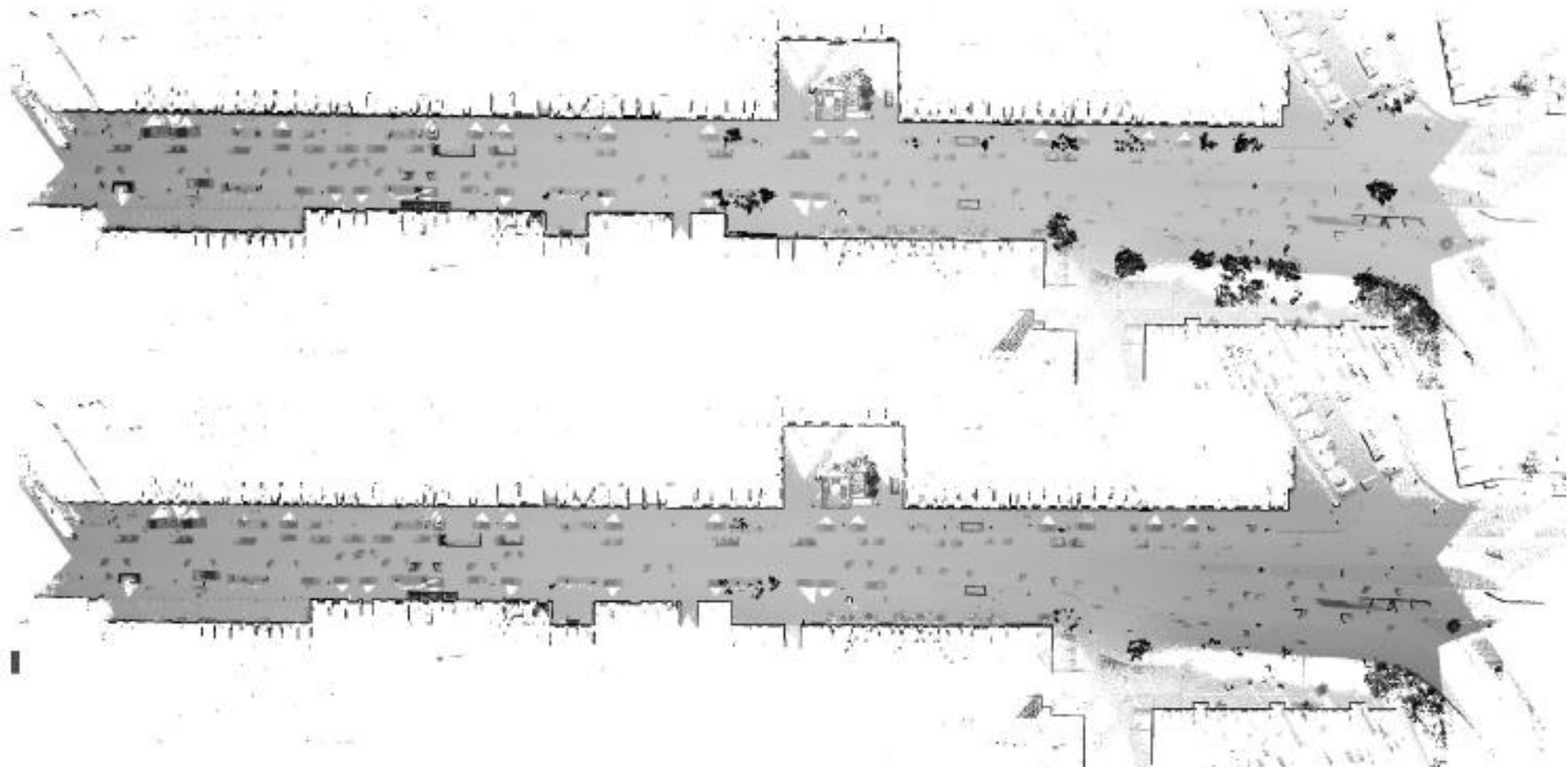


# Experiment II

- Daten und Analyse von TopScan GmbH  
(Dr. Joachim Lindenberg)

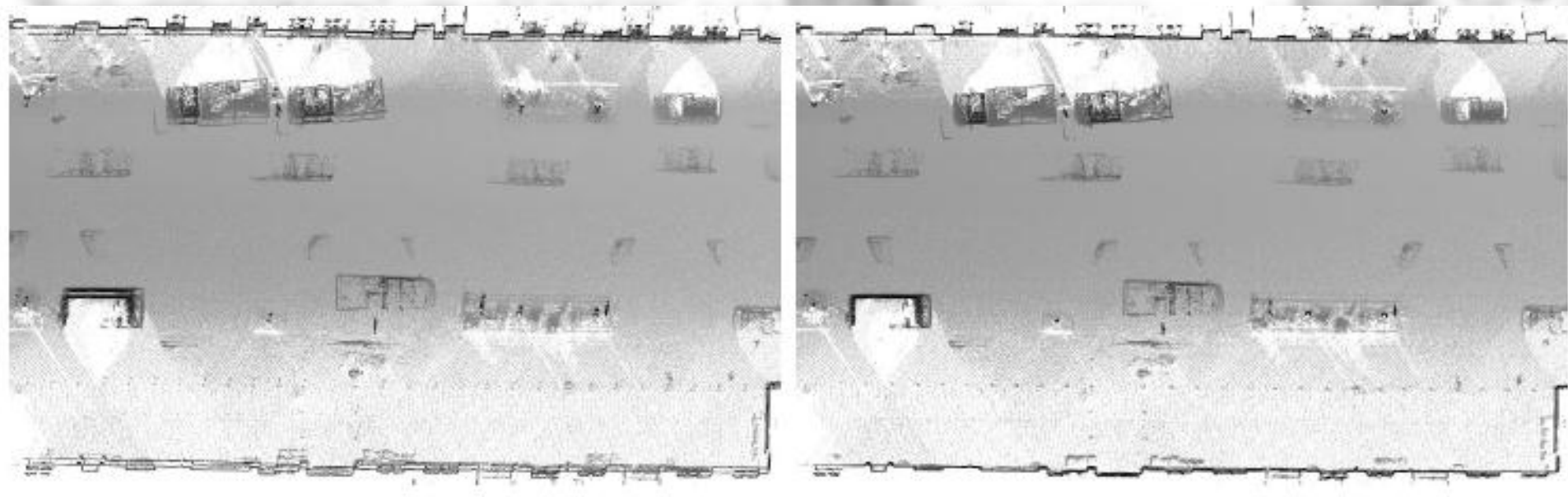


# Experiment II

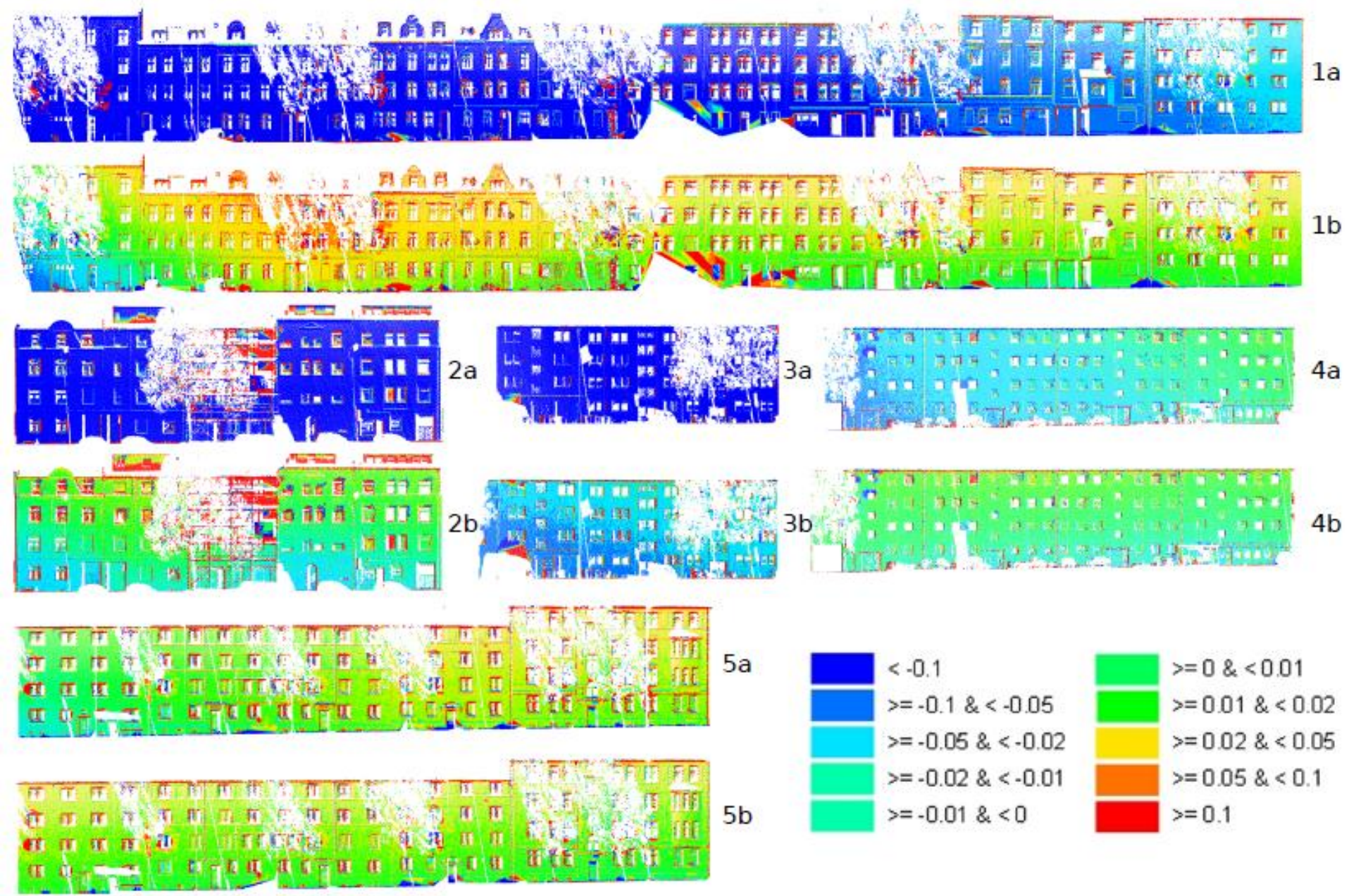




# Experiment II



# Experiment II





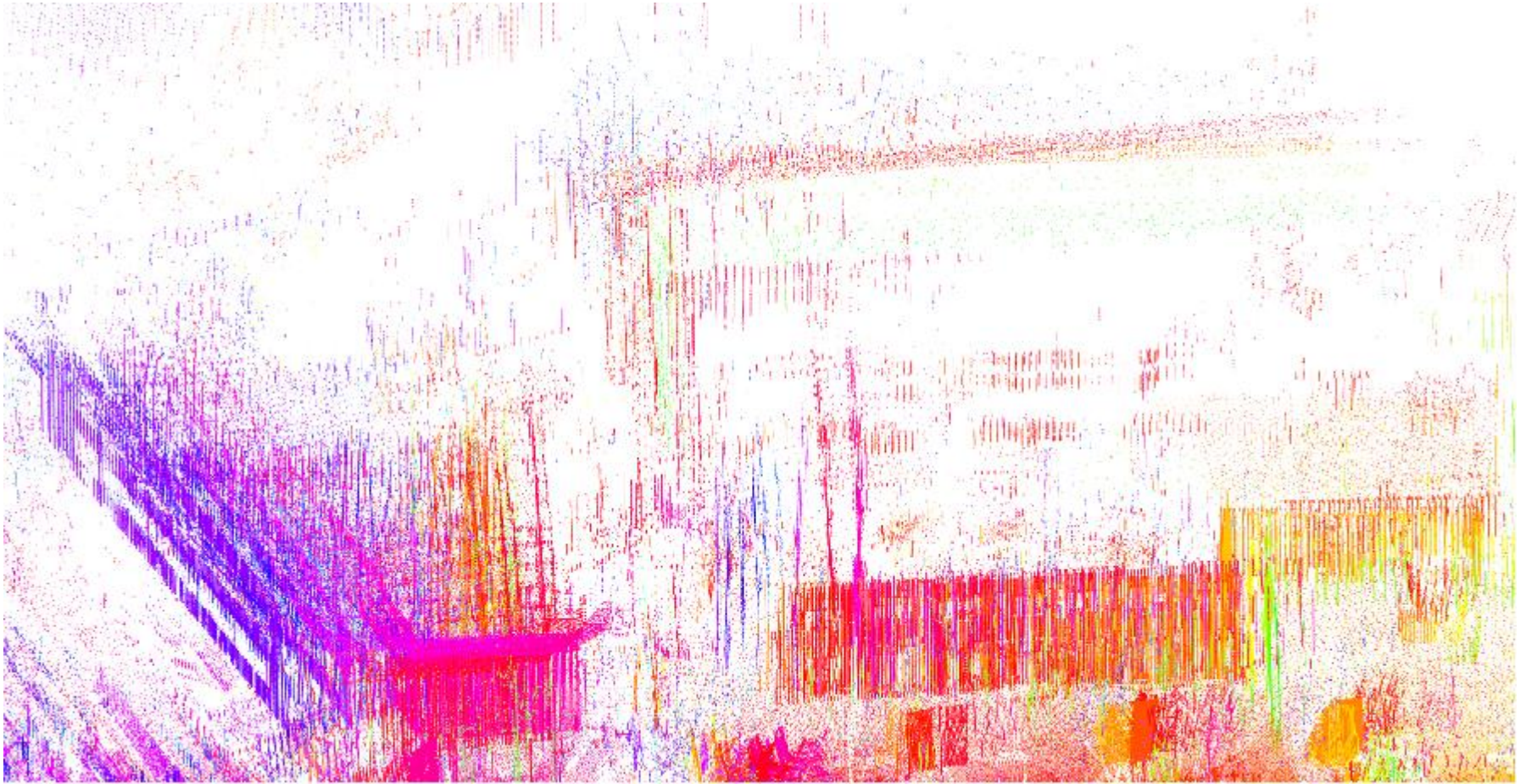
# Experiment III





# Experiment III

- Aufgenommen von Riegl GmbH in Salzburg





# Experiment III

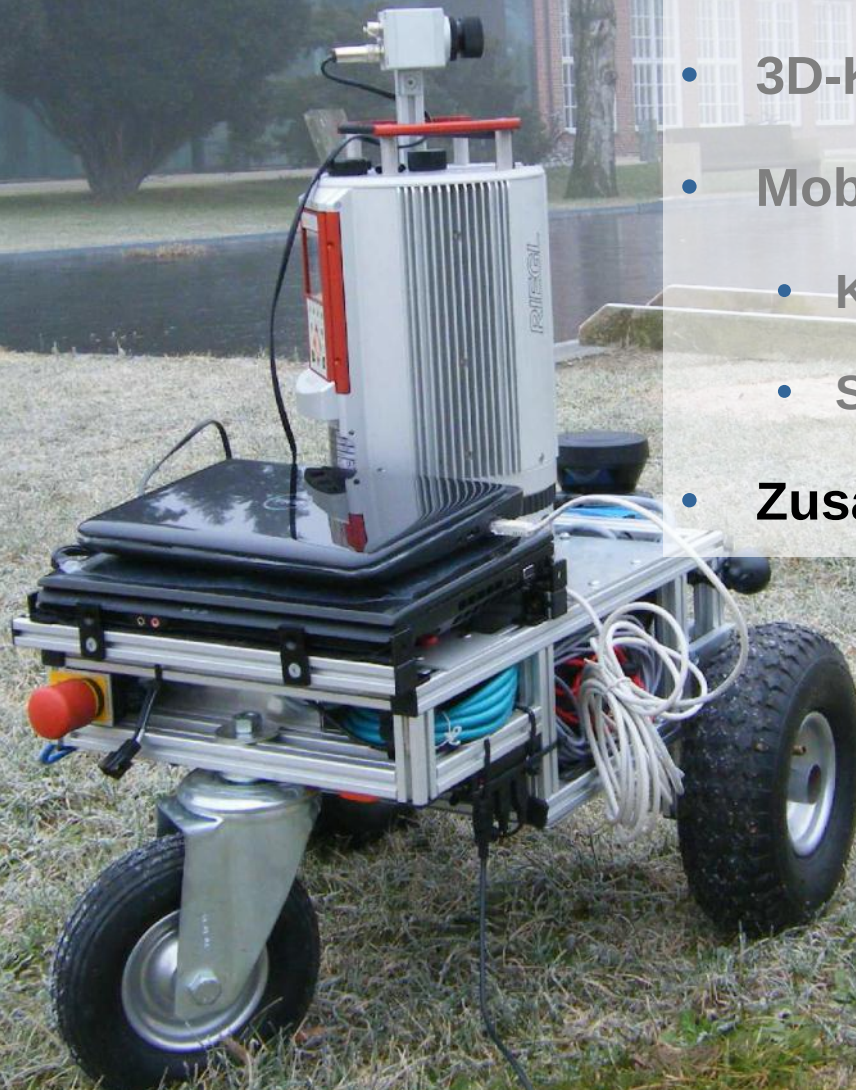
- Aufgenommen von Riegl GmbH in Salzburg





# Inhalt

- Einleitung
- 3D-Kartierung mit Robotern
- Mobiles Laserscanning
  - Kalibrierung
  - Semi-rigides Scanmatching
- Zusammenfassung



Automation  
JACOBS  
UNIVERSITY

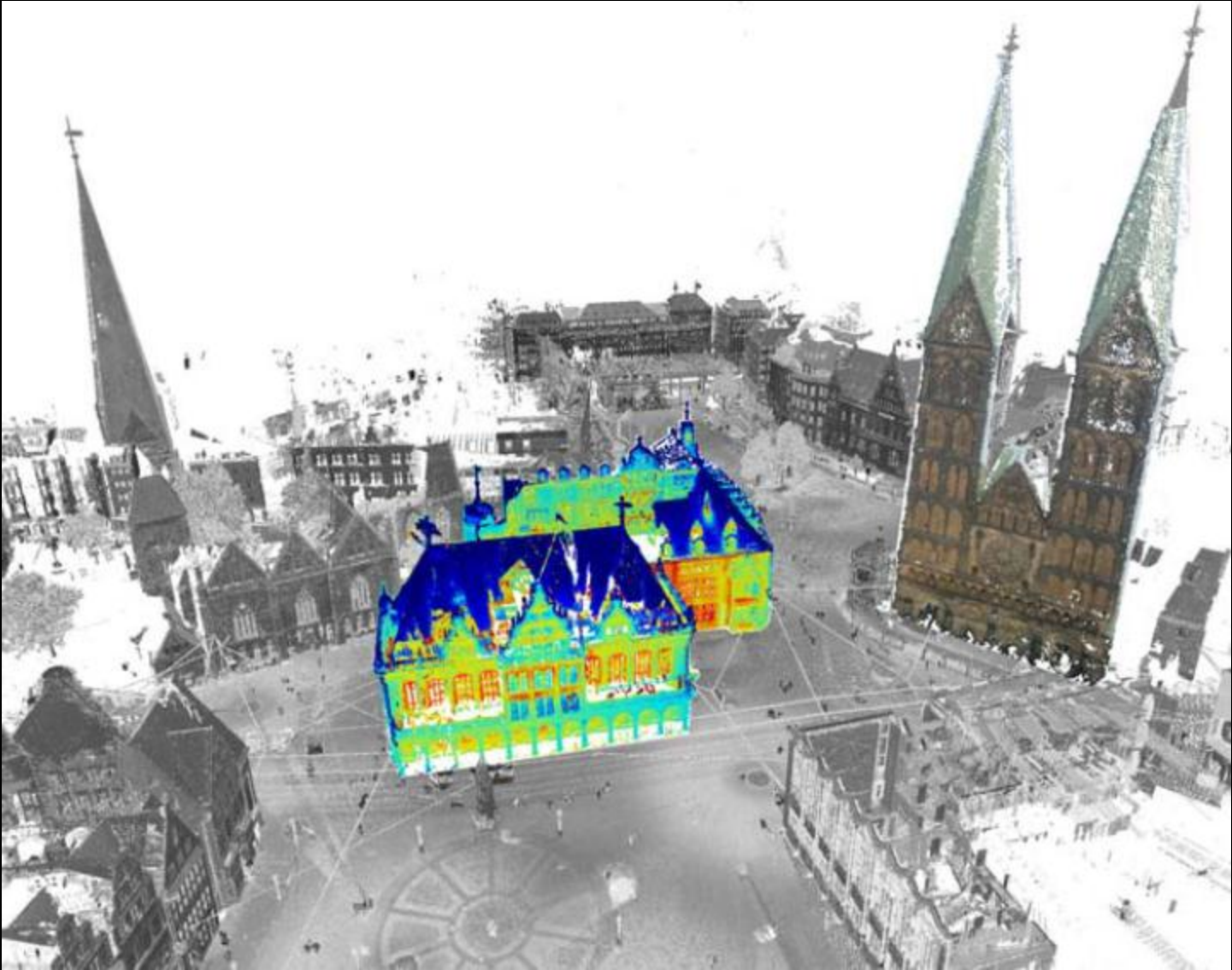


# Zusammenfassung

---

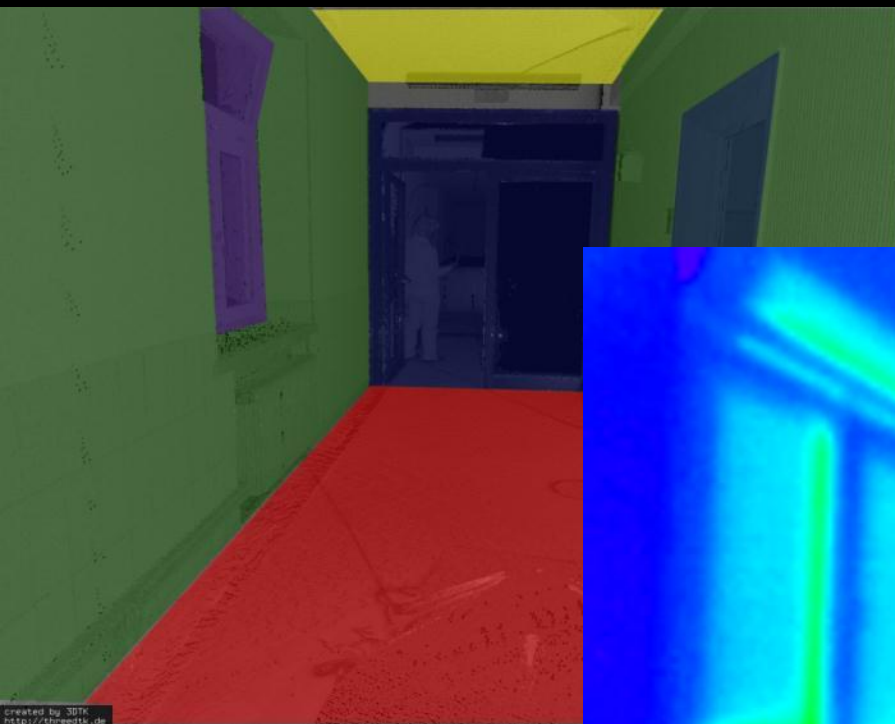
- Effiziente Algorithmen und Datenstrukturen zur Verarbeitung von 3D-Punktwolken
- Global konsistentes Scanmatching
  - ⇒ Bündelblockausgleichung für 3D Scans
  - ⇒ Bundle Adjustment for 3D Point Clouds
    - Dichte Methode
- Robotersteuerung
- Interpretation von 3D-Daten
- Multi-modale Datenverarbeitung

# Aktuelle Arbeiten





# Aktuelle Arbeiten



created by 3DTX  
<http://3dtx.net/de>



ATTENTION!!!  
window open  
and  
heater on



# Referenzen

---

- Publikationen abrufbar unter

[www.nuechti.de](http://www.nuechti.de)

- Videos online auf dem youtube-Kanal

[www.youtube.com/user/AutomationAtJacobs](http://www.youtube.com/user/AutomationAtJacobs)

- Große Teile der Software als Open Source Projekt

**3DTK – The 3D Toolkit**

<http://slam6d.sourceforge.net>