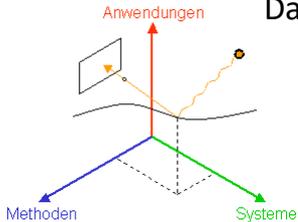


# Geodätische Netzplanung für Robotermissionen basierend auf synthetischen Laserscans

Daniel WUJANZ<sup>1</sup>, Felix GRUNER<sup>2</sup>, Vladyslav BURIAKOVSKIY<sup>3</sup>, Denys GORKOVCHUK<sup>4</sup>, Maria CHIZHOVA<sup>6</sup>, Darius POPOVAS<sup>4</sup>, Eric BERGHOLZ<sup>3</sup>, Frank GIELSDORF<sup>1</sup>, Christian CLEMEN<sup>2</sup>, Thomas LUHMANN<sup>5</sup>

<sup>1</sup>technet GmbH    <sup>2</sup>HTW Dresden    <sup>3</sup>Laserscanning Europe  
<sup>4</sup>spm3d    <sup>5</sup>IAPG, Jade Hochschule    <sup>6</sup>Otto-Friedrich-Universität Bamberg

21. Oldenburger 3D-Tage, Jade Hochschule Oldenburg, Oldenburg, 01.02.2024



# Neulich auf dem Marketing-Rummel

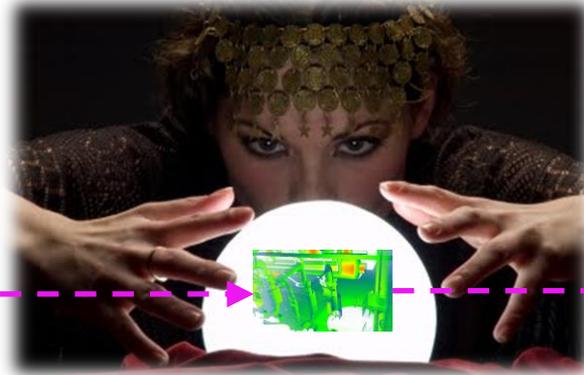
*„In der Zukunft...“*

Autonome Systeme



*werden Sie nicht mehr selber arbeiten...“*

*...Sie müssen überhaupt NICHTS können, geschweige denn wissen...*



*"Dieses Foto"* von Unbekannter Autor ist lizenziert gemäß [CC BY](#)

Passive Systeme

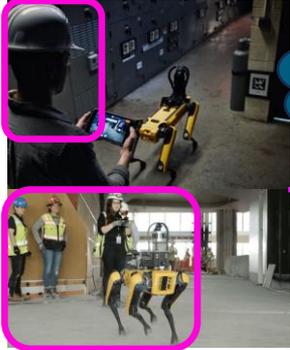


*aber die Cloud wird Geld regnen!“*

# Neulich auf dem Marketing-Rummel

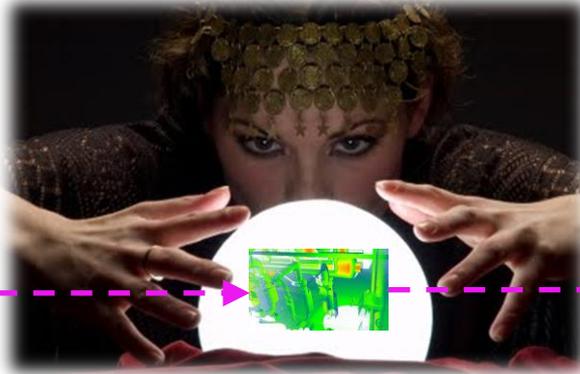
„In der Zukunft...“

Autonome Systeme



Wieviel Personal  
brauchen  
autonome  
Systeme?

...Sie müssen überhaupt NICHTS  
können, geschweige denn wissen...



"Dieses Foto" von Unbekannter Autor ist lizenziert gemäß [CC BY](#)

werden Sie nicht  
mehr selber  
arbeiten...“

Wer kann sich  
leisten, reich  
zu werden?



**Price**  
143.251 €

Braucht die  
Robotik die  
Geodäsie?



Passive Systeme



aber die Cloud  
wird Geld  
regnen!“

Rechtssicherheit  
oder wer kennt  
Barbara Salesch?



# In diesem Beitrag...

- Was braucht es, damit Roboter im geodätischen Kontext einen echten Mehrwert bieten?  
→ Ziele des FuE-Projektes Green3DScan
- Was brauche ich als Grundlage für die Planung einer Robotermission?
- Vorstellung eines Netzplanungs-Algorithmus basierend auf synthetischen Laserscans
- Zusammenfassung & Ausblick



## Projektziele Teil 1

- Der Preis für eine stabile Plattform muss auch für mittlere Unternehmen bezahlbar sein  
→ Preis < 50.000 €
- Es müssen kostenfreie & universelle Schnittstellen vorhanden sein  
→ Robot Operating System (ROS)
- Die Akkulaufzeit mit Payload sollte etwa einem halben Arbeitstag entsprechen
- Lokale Prozessierung der erhobenen Daten OHNE Cloud auf der Plattform  
→ Datensicherheit, Transparenz, Zeitersparnis



~20.000 \$  
Payload: 120 kg  
Max Strecke: ~5 km



~13.000 \$  
Payload: 150 kg  
Max Strecke: 20 km

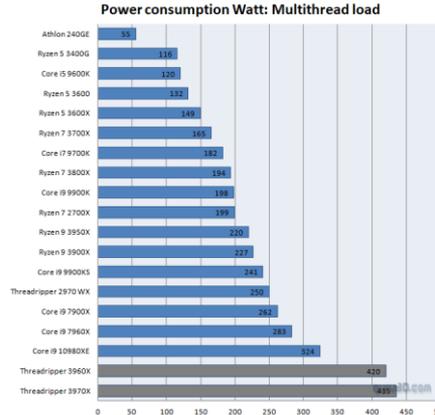
## Projektziele Teil 2

- Die Akkulaufzeit ist selbst ohne Payload bereits sehr limitiert  
→ Boston Dynamics Spot: 376 Watt

### Power

Specification	Value
Battery capacity	564 Wh
Max battery voltage	58.8 V
Typical runtime	90 minutes
Standby time	180 minutes

- Welche Rechner eignen sich?
  - Standard-Prozessor in der Punktwolkenverarbeitung  
→ Threadripper: >250 Watt
  - Geekom Micro-PC: <40 Watt
- Wo muss der Roboter denn eigentlich hin?
  - Um optimale Netze zu erfassen
  - Um die Akkulaufzeit voll ausschöpfen zu können



# Was brauche ich für die Planung?

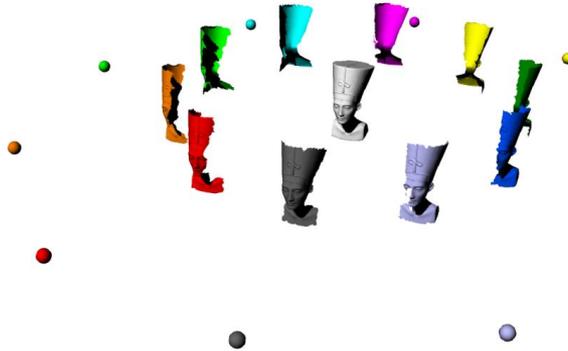
## Prozesskette der Netzplanung im Laserscanning

### Modell

(CAD oder BIM)



### Laserscan-Simulator



### Netzplanungs-Algorithmus



# Das Anwendungsszenario

## Industrieanlagenbau

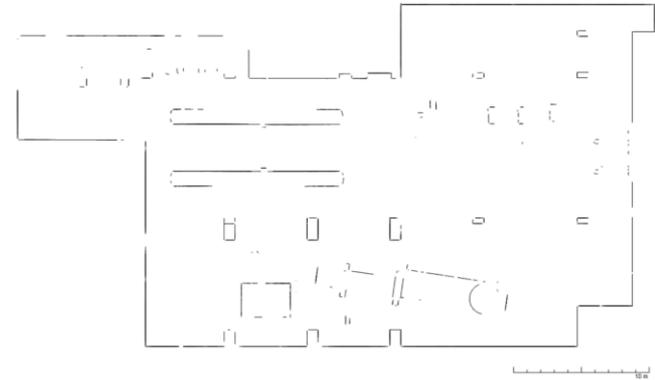
- Hohe Genauigkeitsanforderungen  
→ z.B. Einpassung von Verrohrungen
- Kurze Verweilzeiten im Werksbetrieb  
→ Möglichst wenig Aufwand im Feld

## Der Datensatz

- 47 m x 25 m
- Verwinkeltes Szenario
  - Anlagen
  - Rohrleitungen
  - Tanks

## Ziele

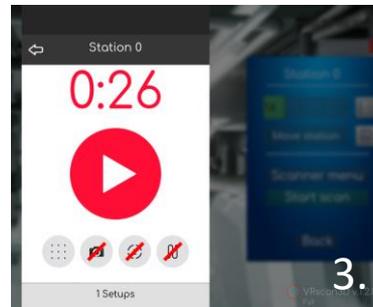
- Wegpunktplan für eine Robotermission
- Einhaltung einer Stationierungsgenauigkeit von 1 mm ( $1\sigma$ )



# Erstellung synthetischer Laserscans

## Prozesskette VRScan3D (CHIZHOVA et al. 2019)

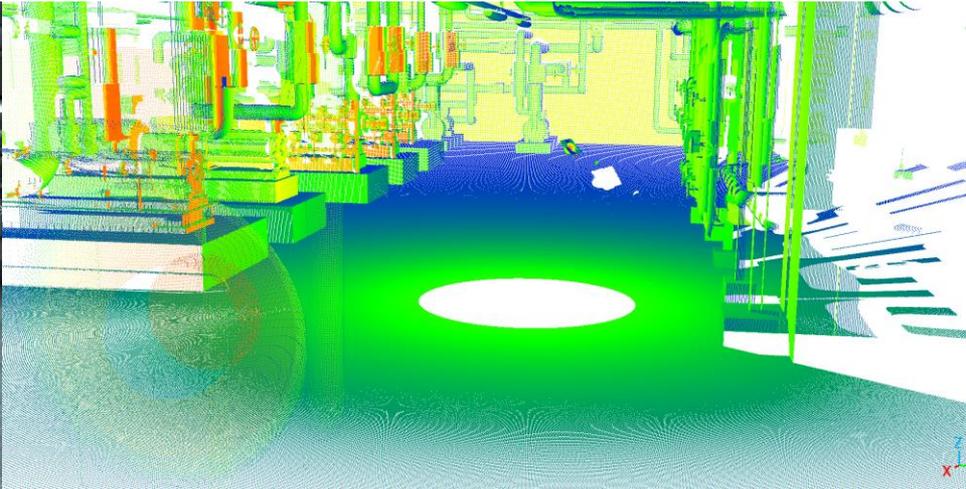
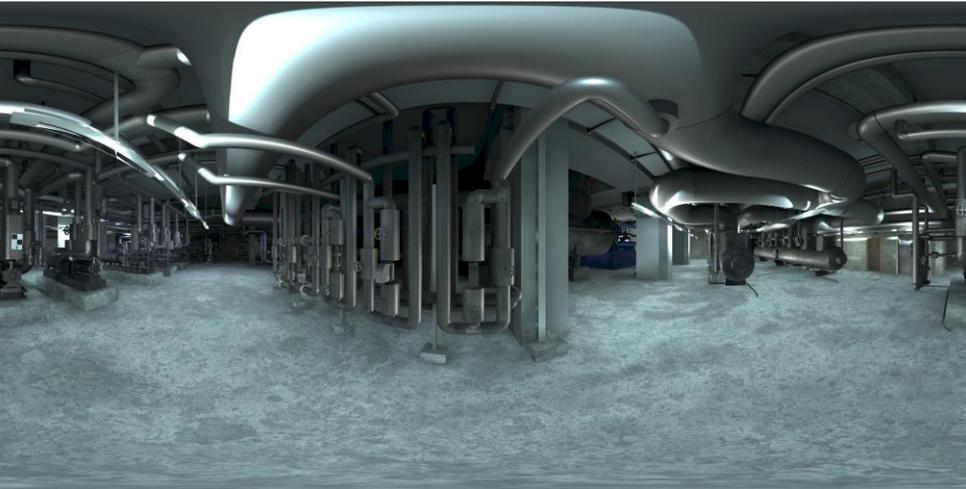
1. (Optional) Platzierung von Zielmarken
2. Definition von Standpunkten im engmaschigen Raster
3. Setzen der gewünschten Auflösung
4. Simulation der Scans



Vortrag T. LUHMANN - Session AR/VR: Simulation von mobilem & dynamischem Scanning im virtuellen Simulator VRscan3D

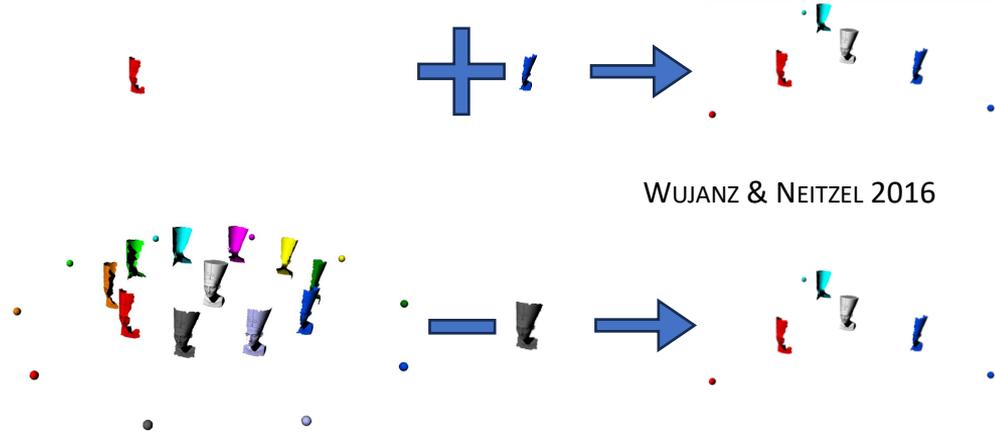
## Zwischenergebnisse

- Synthetische Laserscans: \*.E57
- Simulierte Panoramabilder: RGB



## Suchstrategien am Beispiel von Laserscannetzen (NOICHL ET AL. 2024)

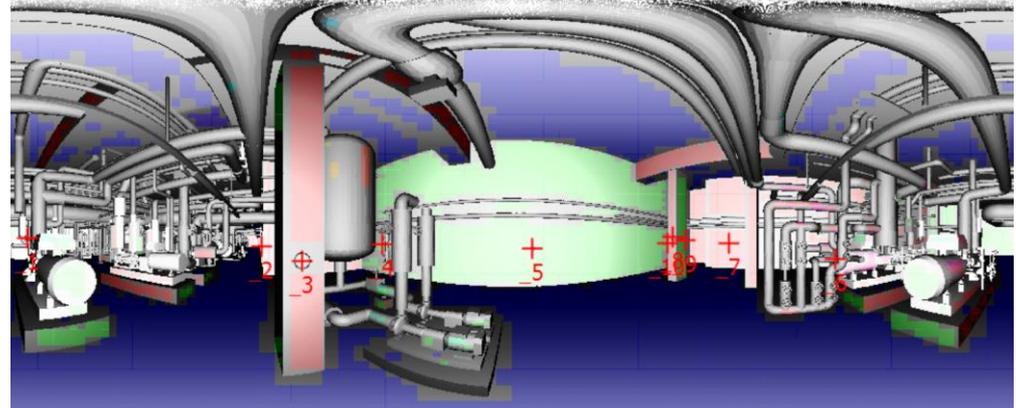
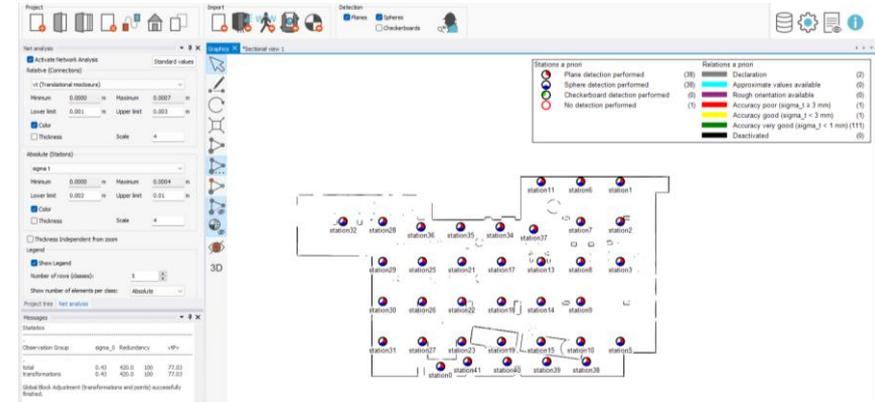
- Vorwärts-Suche (Greedy-Strategien)
  - Starte mit „stärkstem“ Scan
  - Iteration: Füge Scans hinzu
  - Abbruch bei optimaler Lösung
- Rückwärtselimination
  - Starte mit allen Scans
  - Iteration: Eliminiere „unnötigsten“ Scan
  - Abbruch bei optimaler Lösung
- Oszillierende Strategien
  - Kombination aus Vor- und Rückwärts
- Genetische Algorithmen
  - Kreuzung und Mutation von Lösungen (Populationen)
  - Bewertung der Fitness jeder Lösung
  - Abbruch bei optimaler Lösung



NOICHL ET AL. 2024

## Grundlegende Idee

1. Import der synthetischen Scans in SCANTRA  
→ Weitestgehendes 5 x 5 m Raster
2. Detektion von Zielmarken & Ebenen
3. Paarweises Matching der Scans
4. Blockausgleichung
5. Bewertung der Netzstabilität  
→ Geometrische Sicht
6. Ausdünnen oder hinzufügen  
→ Wirtschaftliche Sicht
  1. Geodätische Anschlusspunkte
  2. Lokale Zielmarken
  3. Laserscanstandpunkte
7. Go to 4



# ACHTUNG: Ausgleichung!

## Welche Kennzahlen eignen sich für die Ausdünnung?

- Geodätische Qualitätskriterien
  - Präzision / Genauigkeit
  - Zuverlässigkeit
- Maß der Zuverlässigkeit  
→ Redundanzanteile (FÖRSTNER 1979)
- $r = 1 - \frac{u}{n}$  mit
  - $u$  = Anzahl der Unbekannten
  - $n$  = Anzahl der Beobachtungen
- Welche Beobachtungen können wegfallen?

# Messungen	Redundanz	Redundanzanteil [%]
1	0	0
2	1	50
3	2	67
4	3	75



2

# ACHTUNG: Ausgleichung!

## Welche Kennzahlen eignen sich für die Ausdünnung?

- Geodätische Qualitätskriterien
  - Präzision / Genauigkeit
  - Zuverlässigkeit
- Maß der Zuverlässigkeit  
→ Redundanzanteile (FÖRSTNER 1979)
- $r = 1 - \frac{u}{n}$  mit
  - $u$  = Anzahl der Unbekannten
  - $n$  = Anzahl der Beobachtungen
- Welche Beobachtungen können wegfallen?

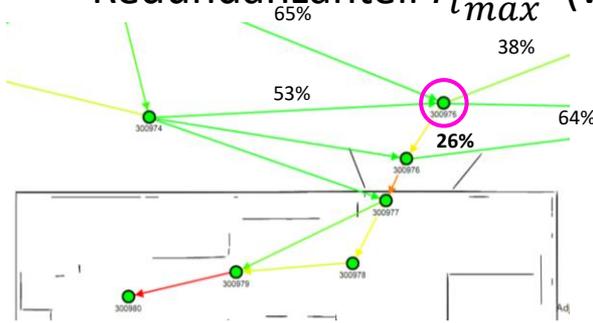
# Messungen	Redundanz	Redundanzanteil [%]
0%	$\leq EV_i < 1\%$	nicht kontrolliert
1%	$\leq EV_i < 10\%$	schlecht kontrolliert
10%	$\leq EV_i < 30\%$	ausreichend kontrolliert
30%	$\leq EV_i < 70\%$	gut kontrolliert
70%	$\leq EV_i < 100\%$	Beobachtung kann ohne Verlust an Zuverlässigkeit entfallen

4                      3                      1/3                      NEITZEL 2017

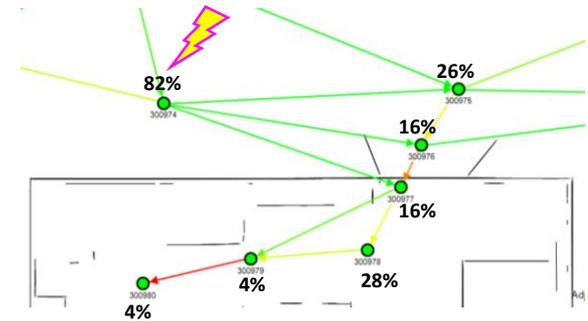


## Identifizierung von „unnötigen“ Scans

- 6 Unbekannte: Transformationsparameter  $t_x, t_y, t_z, r_x, r_y, r_z$   
→ Redundanzanteil  $\bar{r}_i$  der Beobachtungsgruppe jeder paarweisen Registrierung
- Zuweisung des jeweils **schwächsten** Redundanzanteils der angrenzenden Registrierungen zu einem Scan  
→ Repräsentativer Redundanzanteil
- Entfernen des Scans mit **höchstem** repräsentativen Redundanzanteil  $\bar{r}_{i_{max}}$  (wenn  $\bar{r}_{i_{max}} \geq 50\%$ )



$\bar{r}_i$  für Station 300976



Repräsentativer  $\bar{r}_i$  s  
der Nachbarn

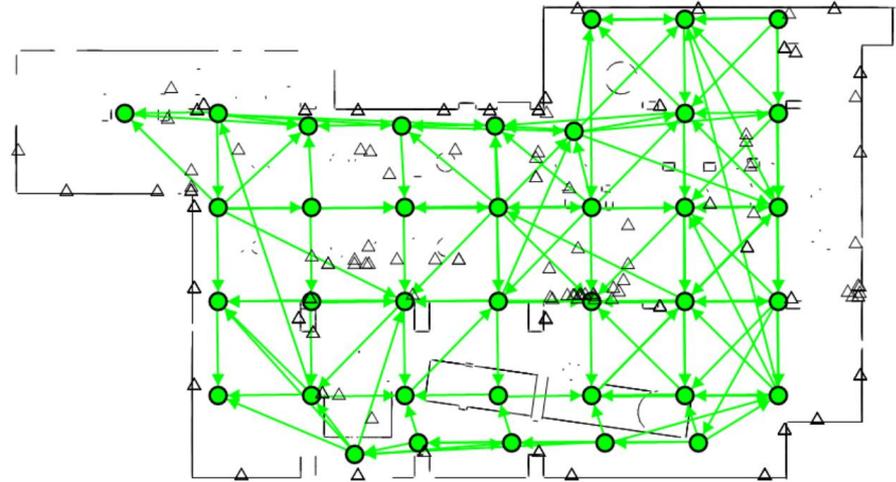
# Ausgangslage des Beispiels

## Die Bausteine des Netzes

- 42 synthetische Scans
- 39 lokale Zielmarken
- 39 virtuelle Anschlusspunkte  
→ Zufällig verrauscht +/- 1 mm ( $3\sigma$ )
- 126 paarweise Registrierungen
- 288 Punktidentitäten zum Anschluss

## Geodätische Eckdaten des Netzes

- Relative Qualitätsmaße  
→ Widersprüche zwischen den Scans
- Absolute Qualitätsmaße (geodätisches Datum)  
→ Um wieviel mm „wackeln“ meine Scans?



Connections (vt)[m]		Stations (sigma t)[m]	
■■■■■■	0.0006 - 0.0007 (2.4%)	■■■■■■	0.0003 - 0.0003 (10.5%)
■■■■■■	0.0005 - 0.0006 (4.0%)	■■■■■■	0.0002 - 0.0003 (60.5%)
■■■■■■	0.0003 - 0.0005 (0.0%)	■■■■■■	0.0002 - 0.0002 (26.3%)
■■■■■■	0.0002 - 0.0003 (3.2%)	■■■■■■	0.0001 - 0.0002 (0.0%)
■■■■■■	0.0001 - 0.0002 (24.6%)	■■■■■■	0.0001 - 0.0001 (0.0%)
■■■■■■	0.0000 - 0.0001 (65.9%)	■■■■■■	0.0000 - 0.0001 (2.6%)

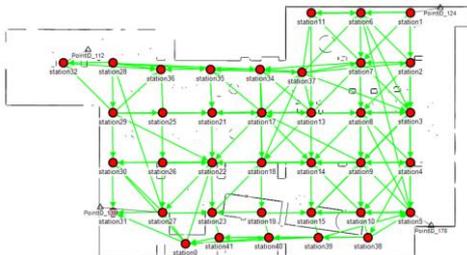
# Der Reduktion erster Teil

## Suche nach einer minimalen Anzahl an Anschlusspunkten

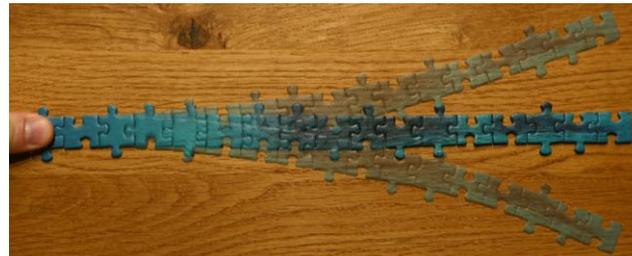
- Geodätisch eingemessene Punkte sind ein großer Kostenfaktor  
→ Suche wirtschaftlichste Lösung bei Einhaltung der Genauigkeitsvorgaben
- Vorwärts-Suche (Greedy-Strategie)
  1. Starte mit vier Punkten, die eine größtmögliche Fläche aufspannen
  2. Suche die Station mit der größten Stationierungsunsicherheit  $\sigma_{t_{max}}$ 
    - a) If  $\sigma_{t_{max}} > \sigma_{t_{soll}}$  : Füge den nächstgelegenen Punkt zur Station mit  $\sigma_{t_{max}}$   
→ Blockausgleichung
    - b) Else: Abbruch → Optimale Lösung gefunden

Connections (vt)[m]	Stations (sigma t)[m]
0.0005 - 0.0006 (3.1%)	0.0009 - 0.0010 (28.6%)
0.0004 - 0.0005 (3.1%)	0.0007 - 0.0009 (67.9%)
0.0003 - 0.0004 (1.5%)	0.0005 - 0.0007 (0.0%)
0.0002 - 0.0003 (7.7%)	0.0003 - 0.0005 (0.0%)
0.0001 - 0.0002 (15.4%)	0.0002 - 0.0003 (0.0%)
0.0000 - 0.0001 (69.2%)	0.0000 - 0.0002 (3.6%)

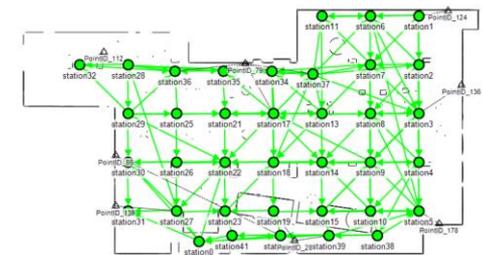
4 Punkte |  $\sigma_{t_{max}} = 1,4 \text{ mm}$



$\sigma_t \geq 1 \text{ mm}$  | Binäre Farbskala |  $\sigma_t \leq 1 \text{ mm}$



Optimum: 8 Punkte |  $\sigma_{t_{max}} = 1,0 \text{ mm}$

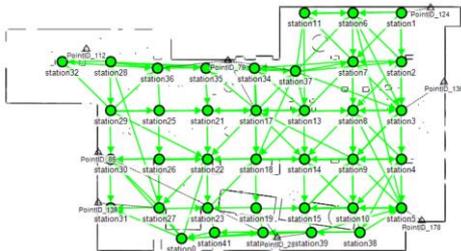


# Der Reduktion zweiter Teil

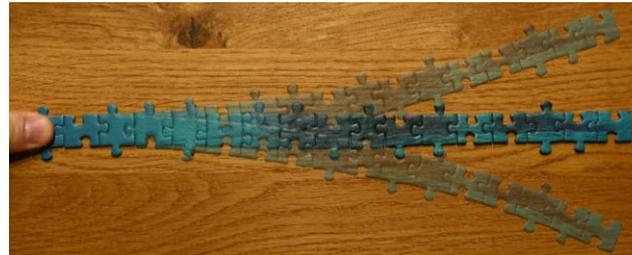
## Suche nach einer minimalen Anzahl an Standpunkten

- Scan-Standpunkte sind ein großer Kostenfaktor
- Anlaufen / Anfahren der Wegpunkte gehen zu Lasten des Akkus
- Rückwärtselimination
  1. Starte mit allen Stationen
  2. Entferne die Station mit dem größten repräsentativen Redundanzanteil  $\bar{r}_{i,max}$ 
    - a) If  $\sigma_{t,max} < \sigma_{t,soll}$  : Go to 2  $\rightarrow$  Blockausgleichung
    - b) Else: Abbruch - Reaktive letzten Punkt, abschließende Ausgleichung  
 $\rightarrow$  Optimale Lösung gefunden

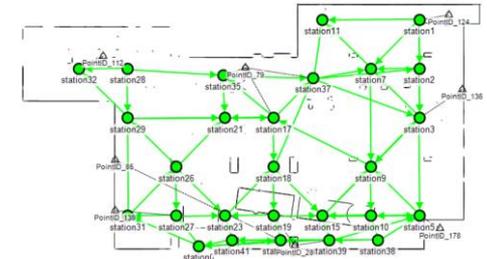
8 Punkte | 42 Scans |  $\sigma_{t,max} = 1,0$  mm



$\sigma_t \geq 1$  mm | Binäre Farbskala |  $\sigma_t \leq 1$  mm



Optimum: 8 Punkte | 27 Scans |  $\sigma_{t,max} = 1,0$  mm



## Durchführung einer Robotermission

1. Berechnung eines Wegpunktplans aus den optimalen Standpunkten  
→ Das Problem des Handlungsreisenden
2. Transformation des Roboterkoordinatensystems in das Zielkoordinatensystem
3. Ansteuerung der Wegpunkte und Datenerfassung  
→ Perspektivenproblem

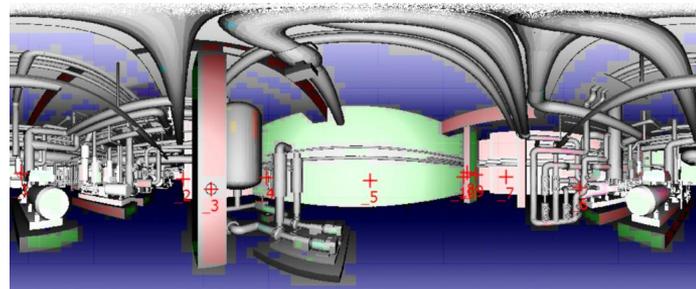
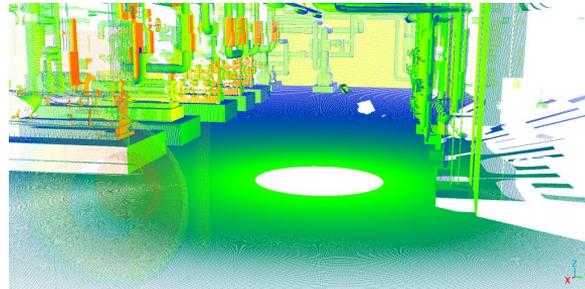
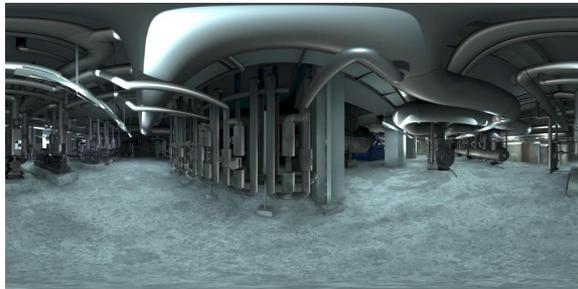
## Schwachpunkt des vorgestellten Algorithmus

- Pro:
  - Wirtschaftlich günstige Ergebnisse
  - Geometrisch / geodätisch fundiert
- Contra:
  - Lässt den zu erfassenden Objektraum noch außer Acht  
→ Berücksichtigung der lokalen Auflösung



## Zusammenfassung

- Modellbasierte Erzeugung von synthetischen Laserscans
- Ein erster Algorithmus zur geodätischen Netzplanung für Robotermissionen
- Algorithmus eignet sich ebenfalls für die Planung & Analyse von
  - statischen Scanning-Netzen
  - kinematischen Scanning-Netzen
  - kombinierten Netzen



## Geodätische Netzplanung für Robotermissionen basierend auf synthetischen Laserscans

Daniel WUJANZ<sup>1</sup>, Felix GRUNER<sup>2</sup>, Vladyslav BURIKOVSKIY<sup>3</sup>, Denys GORKOVCHUK<sup>4</sup>, Maria CHIZHOVA<sup>6</sup>,  
Darius POPOVAS<sup>4</sup>, Eric BERGHOLZ<sup>3</sup>, Frank GIELSDORF<sup>1</sup>, Christian CLEMEN<sup>2</sup>, Thomas LUHMANN<sup>5</sup>

<sup>1</sup>technet GmbH    <sup>2</sup>HTW Dresden    <sup>3</sup>Laserscanning Europe  
<sup>4</sup>spm3d    <sup>5</sup>IAPG, Jade Hochschule    <sup>6</sup>Otto-Friedrich-Universität Bamberg

Oldenburger 3D-Tage, Jade Hochschule Oldenburg, Oldenburg, 01.02.2022

