

- **Komponentenkalibrierung**

- Kalibrierung und Stabilitätsanalyse eines Laserscanners
- „Warm-up“-Effekt und Abweichung zu einem Absolutinterferometer

- **Systemkalibrierung**

- Kamera & IMU
- Kamera & Laserscanner
- Laserscanner

} *relativ*  
} *absolut*

- **Selbstkalibrierung**

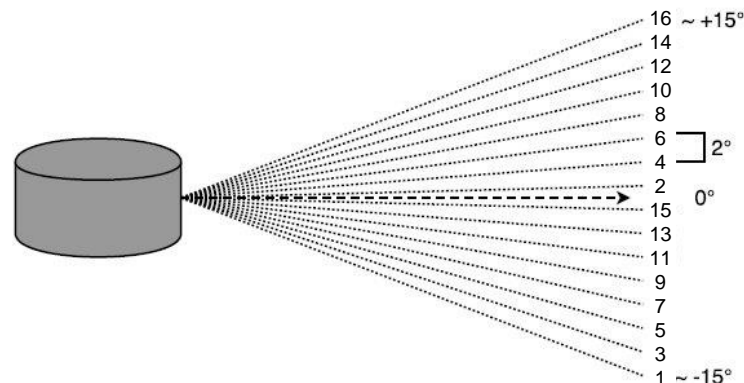
- Automatische Kalibrierung von (multiplen) Laserscannern auf Basis ebener Merkmale in strukturierten Umgebungen

- **Konfigurationsanalyse**

- Für Ebenen-basierte Laserscanner-Kalibrierung

## *Untersuchung der Langzeitstabilität, geometrische Kalibrierung und Einfluss von Temperaturänderungen*

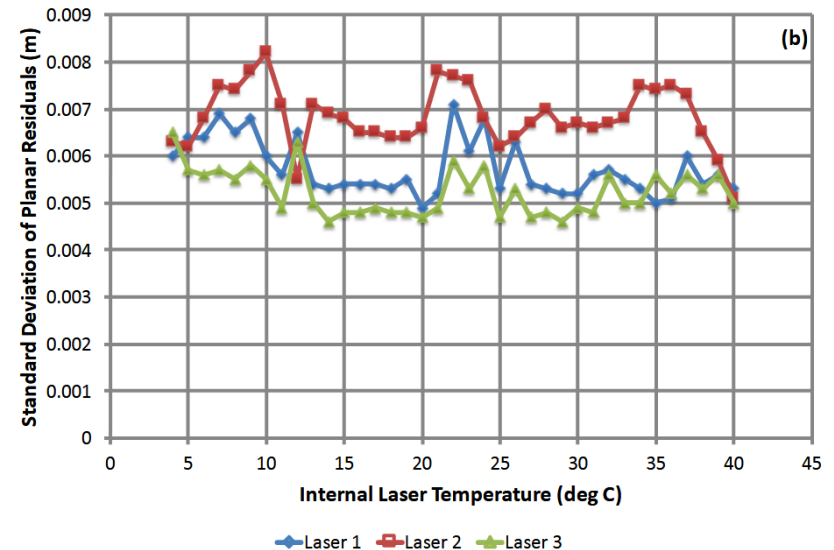
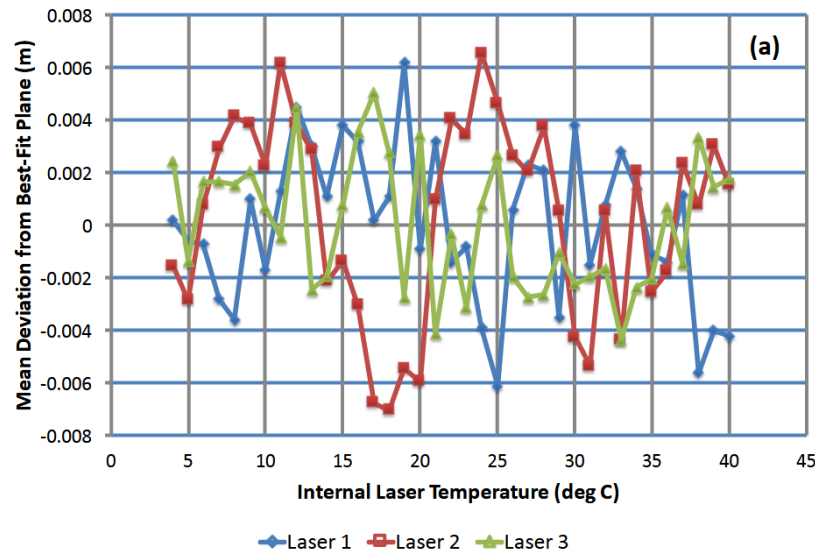
- Verwendung dreier Velodyne VLP-16 Sensoren für allgemeinere Aussage
  - Vergleichbare Ergebnisse für alle drei Sensoren
- Temperaturbereich von 0 bis 40°C
- Betrachtung einzelner Laserstrahlen
  - 2° Inkrement der einzelnen Laserstrahlen innerhalb des 30° FoV



bearbeitet nach Okunsky & Nesterova (2019)

## Temperaturstabilität

- Messung zu ebenen Wänden mit einer Entfernung von 5 Metern
- Dargestellt für drei repräsentative Laserstrahlen



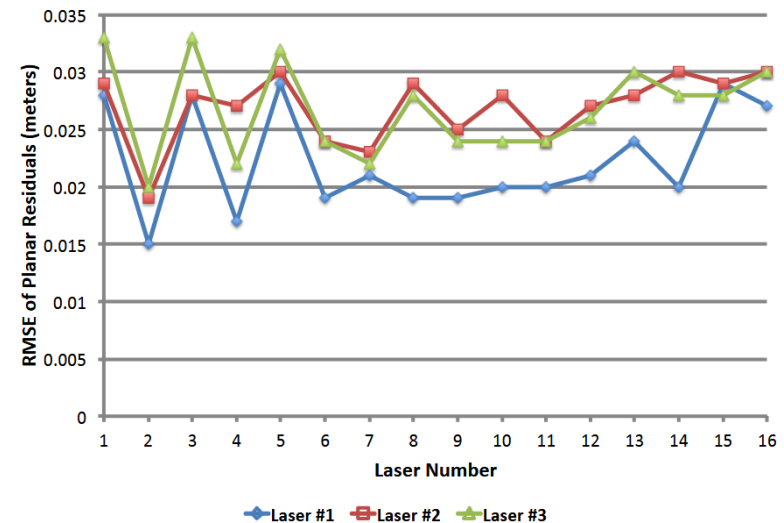
→ Keine Abhängigkeit von der Temperatur zu identifizieren

Glennie et al. (2016)

## Geometrische Kalibrierung

- Innere Parameter laut Hersteller:
  - Horizontale & Vertikale Rotationskorrektur
  - Horizontaler & Vertikaler Offset
  - Offset & Maßstabsfehler der Distanzmessung
- Bestimmung auf Basis von Referenzebenen und Ausgleichung
  - Verbesserung um 10-20% auf Basis des RMSE der Widersprüche
  - Kalibrierparameter jedoch zeitlich nicht stabil
- Rauschverhalten der individuellen Laserstrahlen auf Basis der Residuen
  - Verhalten ist nicht einheitlich

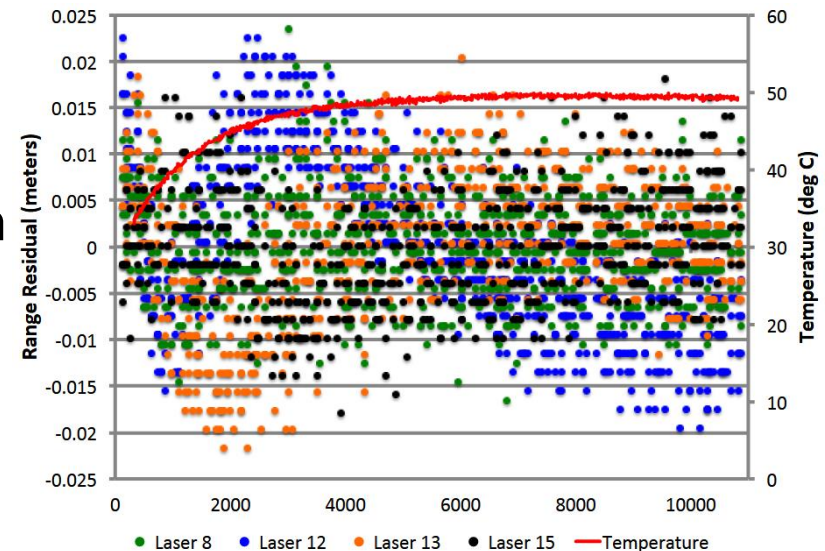
*hoch korreliert*



Glennie et al. (2016)

## Langzeitstabilität

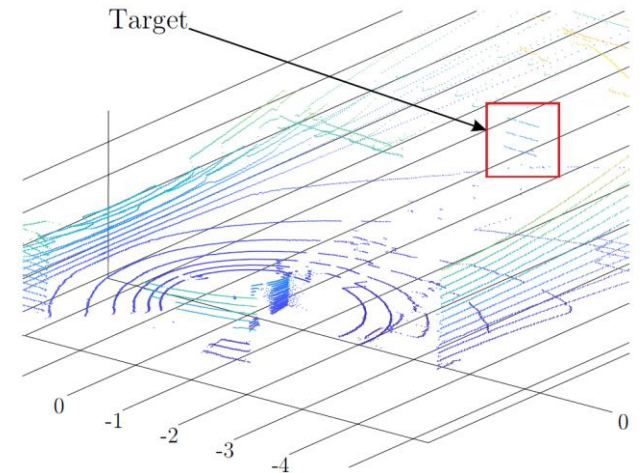
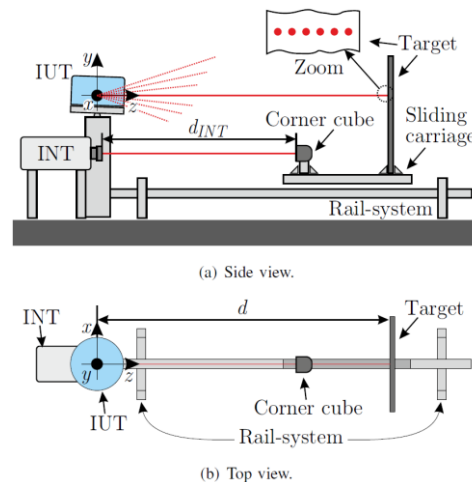
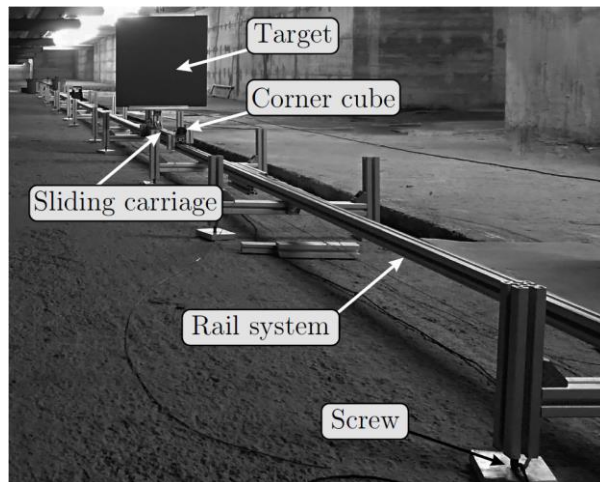
- Durchführung der Untersuchungen für einen Zeitraum von 3 Stunden mit Mittelung der Messdaten jede Minute
- Wertebereich zwischen -2 bis +2 cm
- Kein signifikanter warm-up Effekt
- Beobachtung eines langfristigen Drifts in der Streckenmessung der individuellen Laserstrahlen (aber keine Korrelation mit Temperatur)



Glennie et al. (2016)

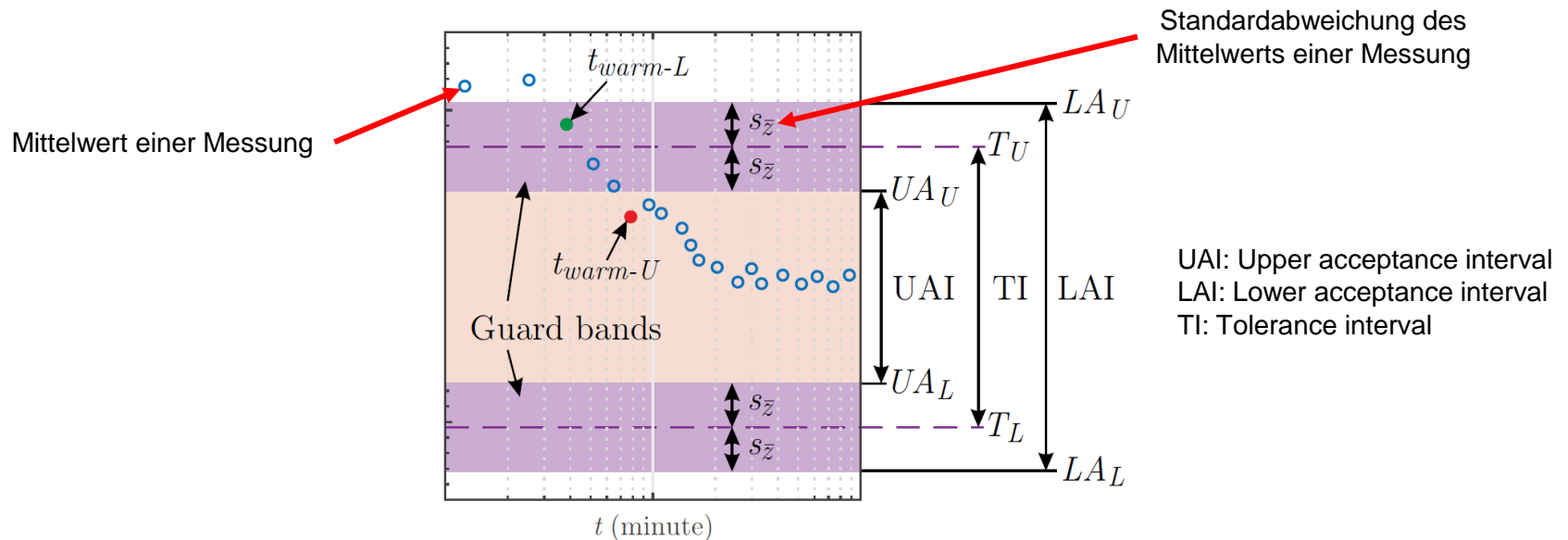
Langzeitstabilität für einen Zeitraum von 12 Stunden

- Vergleich des VLP-16 mit einem Absolutinterferometer
- Referenzfläche mit 72% Reflektivität in 6 m Entfernung
- Konstante Temperatur- und Lichtbedingungen



Cattini et al. (2020)

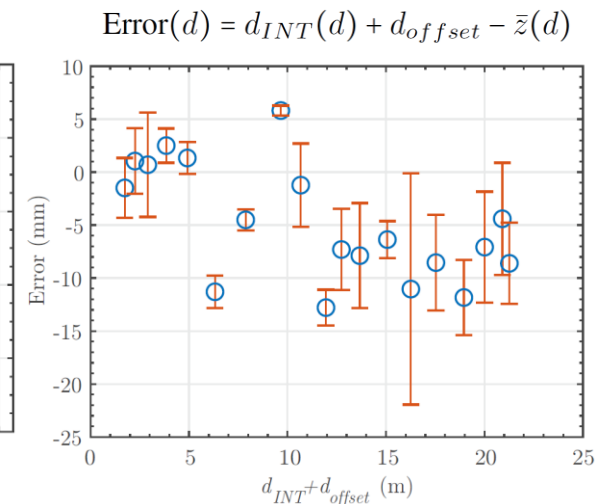
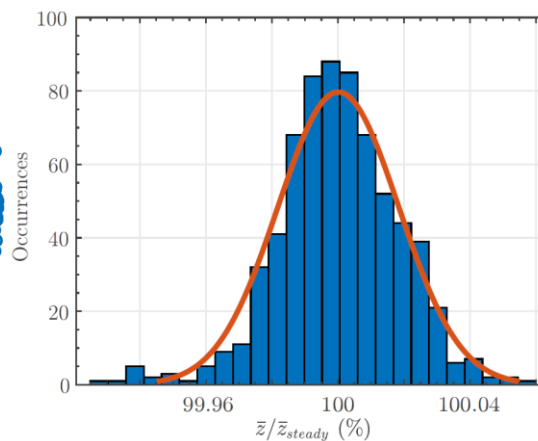
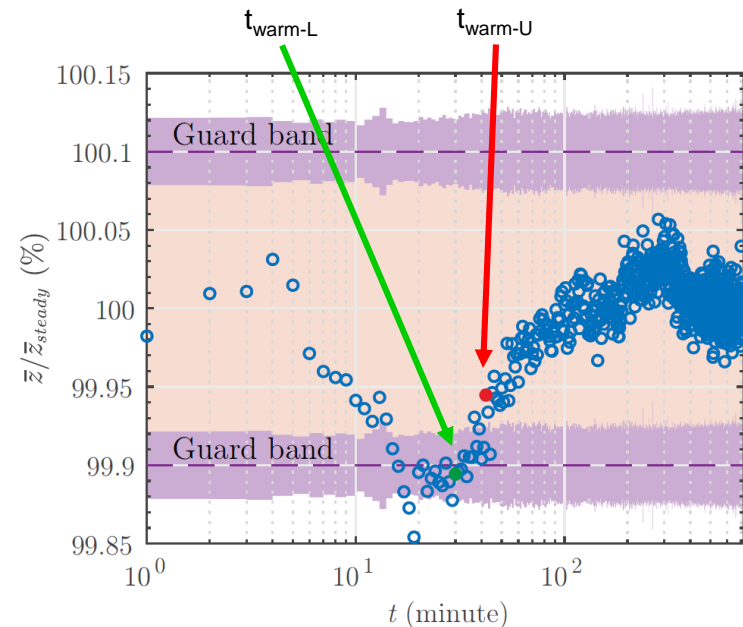
- Der „warm-up“-Effekt wird als die benötigte Zeit definiert, welche es benötigt, damit die Messwerte innerhalb eines gewissen Toleranzbereiches (untere  $T_L$  und obere  $T_U$  Grenze) bleiben



Cattini et al. (2020)

## Langzeitstabilität

- $t_{\text{warm-L}}$  nach 30 min und  $t_{\text{warm-U}}$  nach 42 min erreicht
- Histogramm der Distanzen nach dem warm-up beschreiben Normalverteilung
- Abweichungen zur Referenz im mm nach warm-up für bis zu 21 m



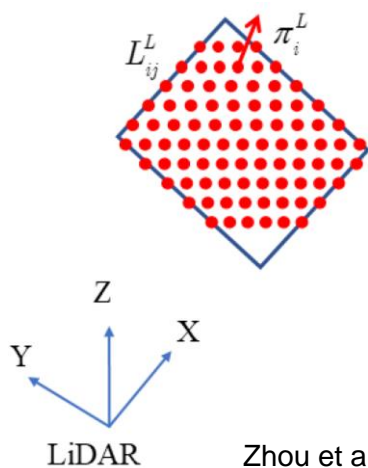
Cattini et al. (2020)



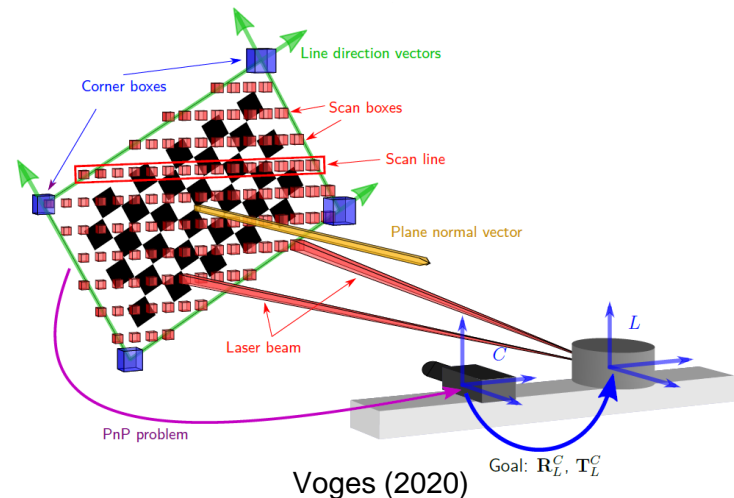
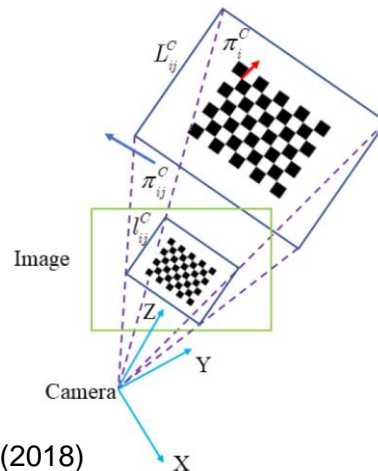
## Bestimmung der 6-DoF Transformationsparameter zwischen Kamera und Laserscanner mittels eines Schachbretts

- Entweder mindestens drei unterschiedliche Ausrichtungen oder eine Ausrichtung mit 3D Linien/Kanten und Ebene
- Geometrische Restriktionen: Kanten  $L_{ij}$  & Ebene  $\pi_i$  in Punktwolke und Kamerabild sind pro Pose  $N$  identisch:

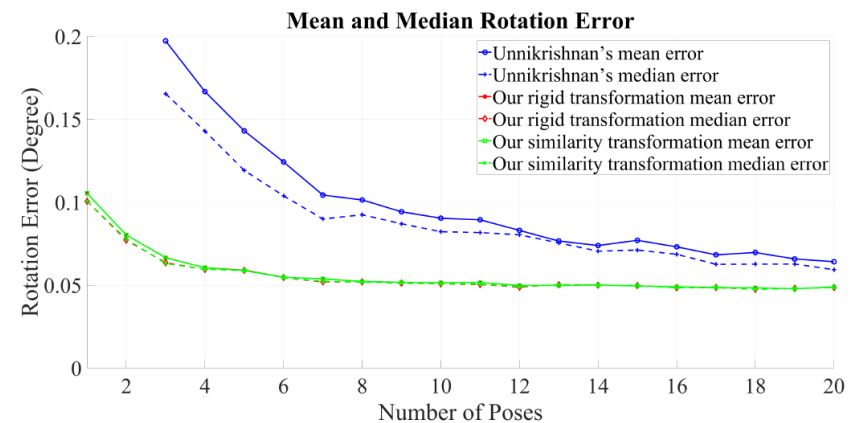
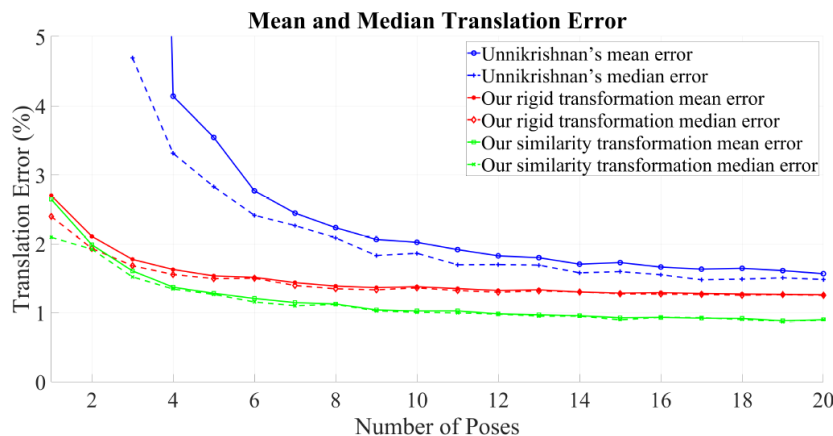
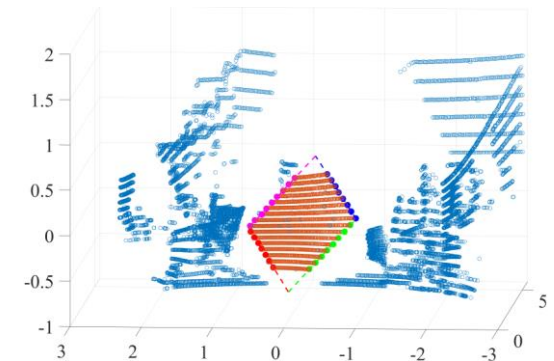
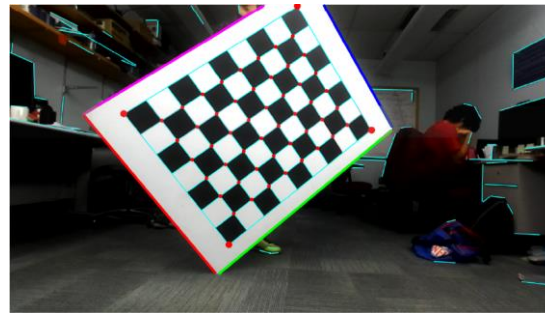
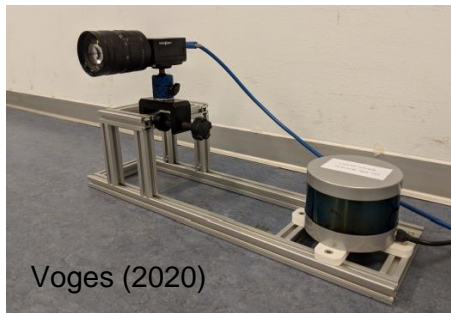
→ Kostenfunktion:  $\tilde{\mathbf{R}}_L^C = \arg \min_{\mathbf{R}_L^C} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^4 \left\| \mathbf{R}_L^C \mathbf{d}_{ij}^L - \mathbf{d}_{ij}^L \right\|^2 + \left\| \mathbf{R}_L^C \mathbf{n}_i^L - \mathbf{n}_i^C \right\|^2$



Zhou et al. (2018)



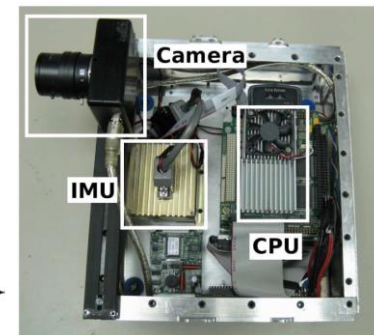
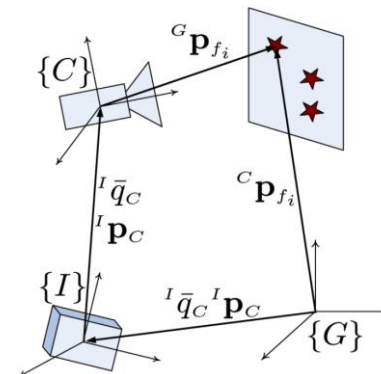
- Erfassung von 32 Posen mit jeweiligen Punktwolken (Velodyne VLP-16) und Kamerabildern



Zhou et al. (2018)

**Extended Kalman Filter (EKF)** für die Bestimmung der 6-DoF Transformationsparameter zwischen Kamera und IMU inklusive Berücksichtigung der zeitlichen Komponente in Echtzeit

- Keine besondere Hardware neben einem Kalibrier-Schachbrett wie z.B. Drehtisch oder referenzierender Sensor (z.B. LS, LT)
- Geometrischer Zusammenhang zwischen Kamera- ( $C$ ), IMU- ( $I$ ) und globalen- ( $G$ ) Koordinatensystem ist gesucht
  - 6-DoF Parameter zwischen  $C$  und  $I$
  - Wissen über bekannte Landmarken im globalen System



Mirzaei and Roumeliotis (2008)

## Methodisches Vorgehen:

1. Prozessierung der Bilddaten → initiale Schätzung der Kamerapose über Schachbrett-Features (Ecken, Kanten, etc.)
2. Näherungswerte für IMU-Pose (z.B. aus CAD-Modell)
3. Sequentielle Schätzung mit zusätzlichen Messwerten von Kamera und IMU in einem **EKF**

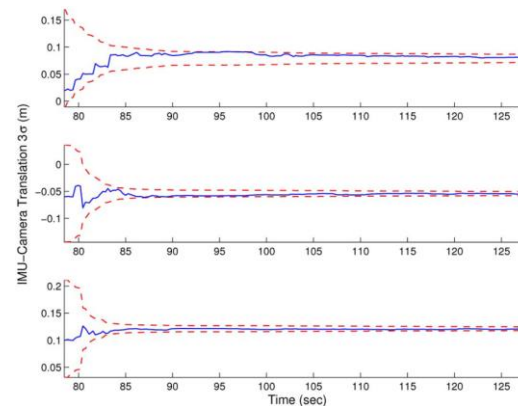
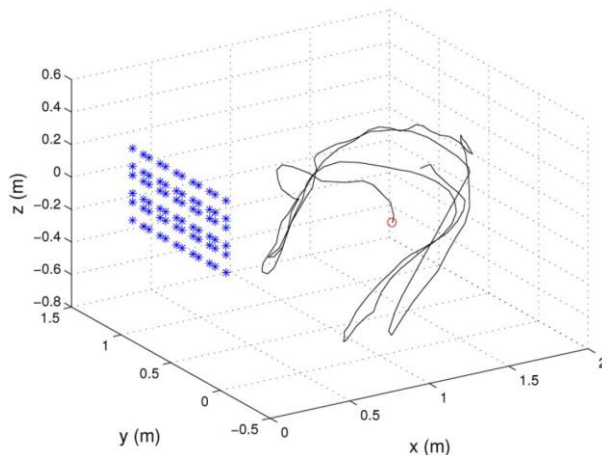
### a. Zustandsvektor

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \overset{\text{Quaternion G zu I}}{I \bar{q}_G^T} & \overset{\text{Bias}_{\text{Gyro}}}{\mathbf{b}_g^T} & \overset{\text{Geschwindigkeit}}{G \mathbf{v}_I^T} & \overset{\text{Bias}_{\text{Acc}}}{\mathbf{b}_a^T} & \overset{\text{Position I}}{G \mathbf{p}_I^T} & \overset{\text{Quaternion C zu I}}{I \bar{q}_C^T} & \overset{\text{Position C}}{I \mathbf{p}_C^T} \end{bmatrix}^T$$

- b. Prädiktion mit Beschleunigungen und Drehraten (100 Hz)
- c. Filterung mit Punktbeobachtungen (Bildkoordinaten) für einzelne Features (3,75 Hz)

Mirzaei and Roumeliotis (2008)

- Initialisierung der Offsets (Drehwinkel- & Beschleunigungssensor) über statische Erfassung für 80 Sekunden
  - → statische Restriktion: keine Änderung der Position und Orientierung
- Nichtlineare Bewegung der Plattform mit ständiger Sicht auf das Schachbrett mit einer Entfernung von 0,5 bis 2,5 Meter in allen Translationen und Orientierungen für 50 Sekunden

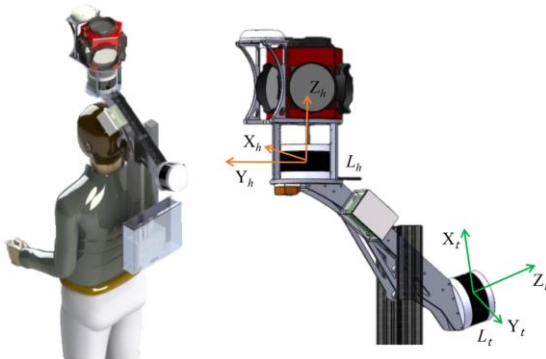


	$x \pm 3\sigma$ (cm)	$y \pm 3\sigma$ (cm)	$z \pm 3\sigma$ (cm)
Initial	$2 \pm 9$	$-6 \pm 9$	$10 \pm 9$
EKF	$7.93 \pm 0.76$	$-5.49 \pm 0.38$	$12.09 \pm 0.35$
BLS	$7.43 \pm 0.15$	$-5.19 \pm 0.13$	$12.12 \pm 0.10$
	$\text{roll} \pm 3\sigma$ (°)	$\text{pitch} \pm 3\sigma$ (°)	$\text{yaw} \pm 3\sigma$ (°)
Initial	$-90 \pm 6$	$0 \pm 6$	$-90 \pm 6$
EKF	$-88.69 \pm 0.07$	$0.40 \pm 0.08$	$-90.89 \pm 0.08$
BLS	$-88.71 \pm 0.02$	$0.38 \pm 0.04$	$-90.93 \pm 0.05$

Mirzaei and Roumeliotis (2008)

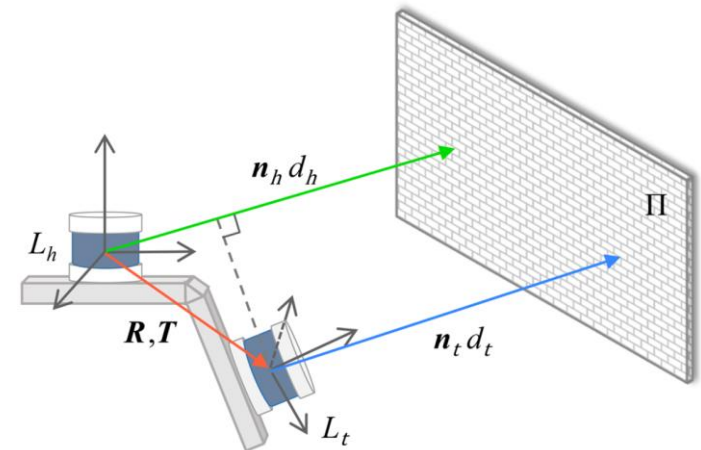
## „Automatische“ Kalibrierung zwischen mehreren Laserscannern

- Erfassung und Verwendung natürlicher ebener Oberflächen in der Umgebung von mehreren unterschiedlichen Posen → geometrische Restriktionen
- Unsicherheit der 6-DoF Kalibrierparameter hängt von der geometrischen Struktur der natürlichen Umgebung/Merkmale ab



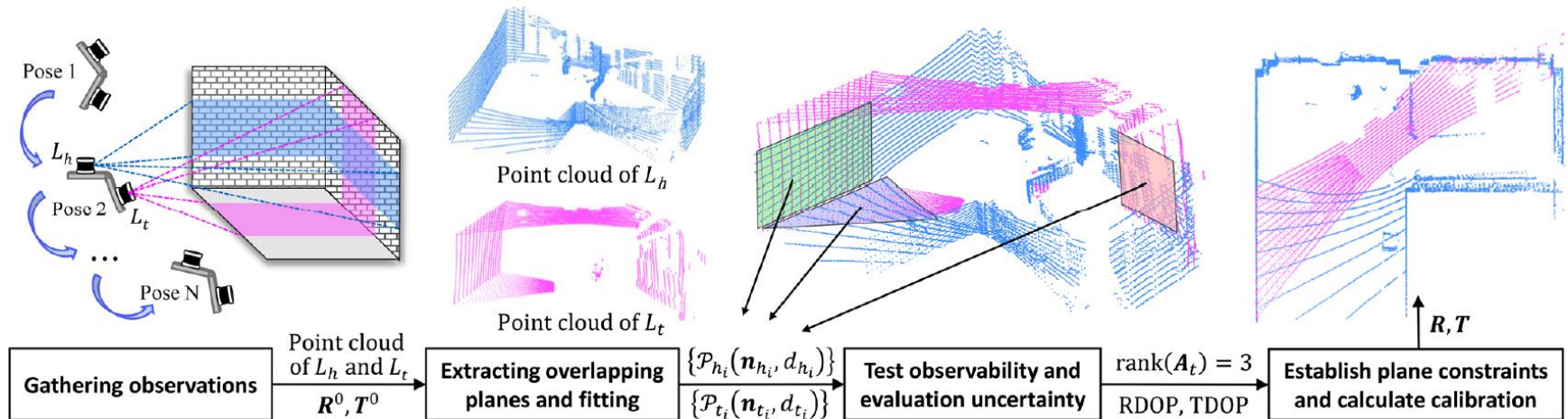
$$\mathbf{n}_h = \mathbf{R}\mathbf{n}_t$$

$$d_h = \mathbf{T}\mathbf{n}_t + d_t$$



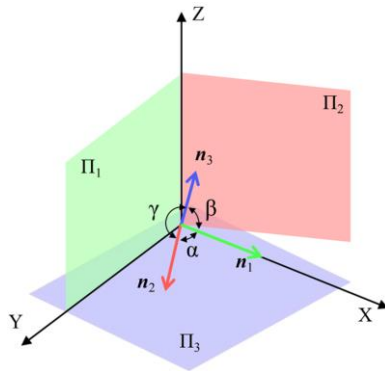


- Mindestens drei Ebenen müssen pro Pose erfasst werden
- Näherungswerte  $R^0$ ,  $T^0$  müssen für das Fitting der Punktwolken bekannt sein
- Check der Datensätze hinsichtlich Beobachtbarkeit
  - Räumliche Verteilung der Ebenen geeignet?
  - Sind genügend Ebenen erfasst?
- Geometrische Restriktionen anbringen



Shi et al. (2021)

## Einfluss der räumlichen Verteilung der Ebenen



Num	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha$ (deg)	90	70	110	50	100	60	20	60	10	70
$\beta$ (deg)	90	80	120	90	120	100	90	60	90	110
$\gamma$ (deg)	90	90	120	110	130	130	90	60	90	150

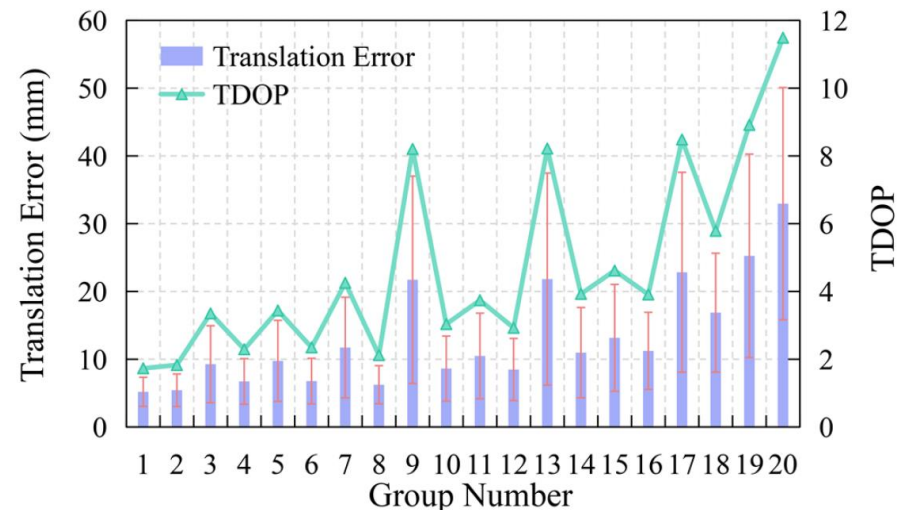
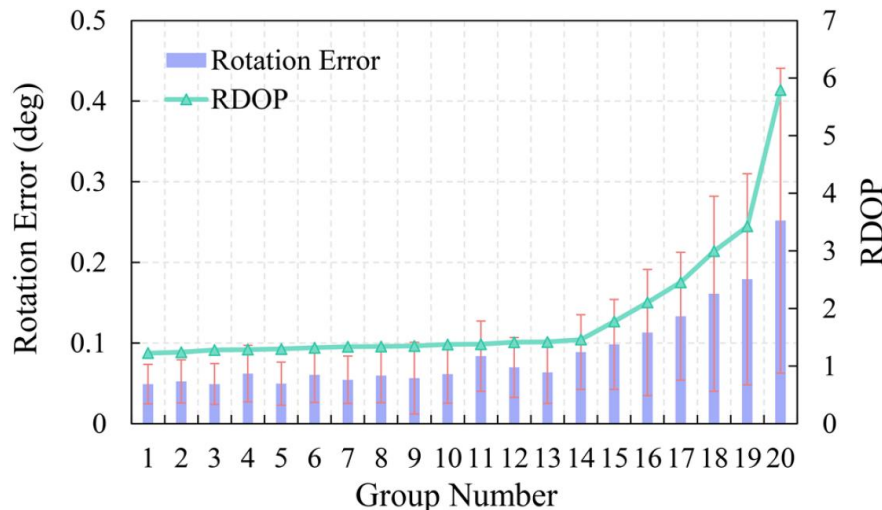
Num	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$\alpha$ (deg)	40	40	70	40	30	30	10	20	10	10
$\beta$ (deg)	80	50	110	40	30	30	30	20	20	10
$\gamma$ (deg)	50	70	170	70	50	30	30	20	20	10

$$A_t = [n_{t_1} \ n_{t_2} \ \dots \ n_{t_m}]^T$$

$$D_t = A_t^T A_t, F_T = D_t^{-1}$$

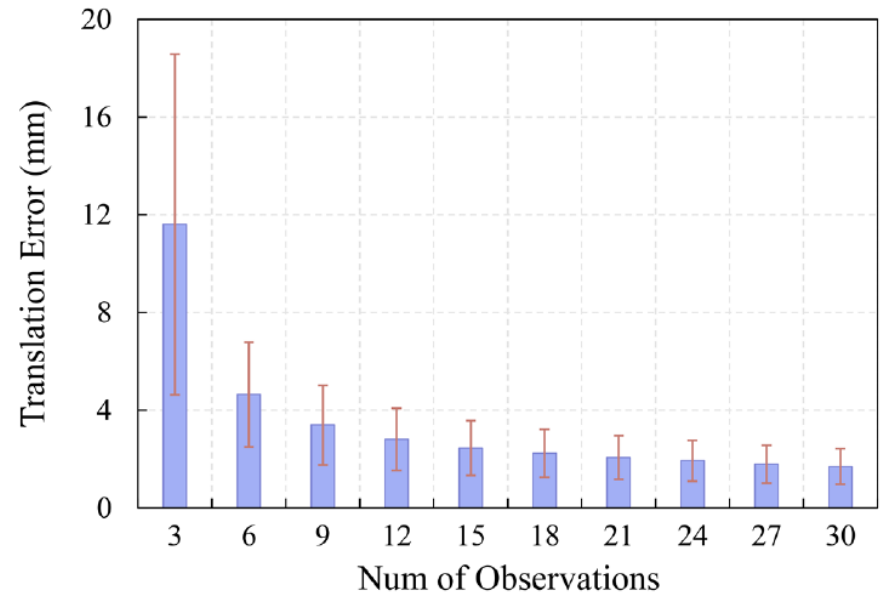
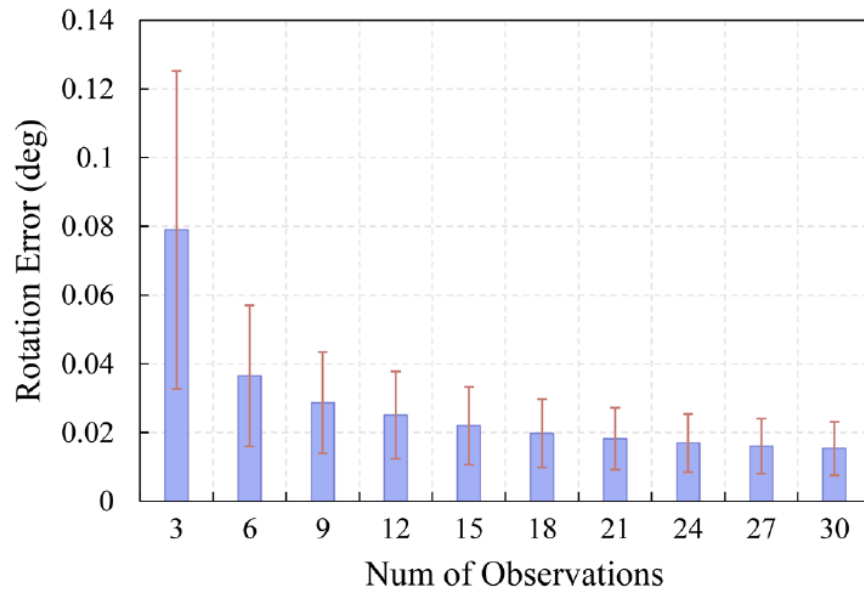
$$RDOP = \sqrt{tr(F_R)}$$

$$TDOP = \sqrt{tr(F_T)}$$



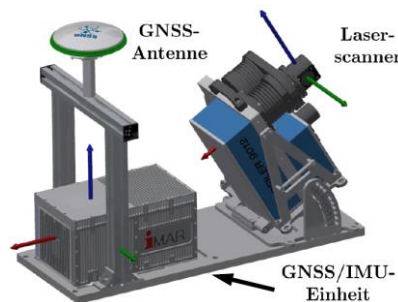


## Einfluss der Anzahl an Ebenen



## *Konfigurationsanalyse für Ebenen-basierte Kalibrierung eines Profillaserscanners für genaue, zuverlässige/robuste und sensitive Schätzung mit geringen Korrelationen*

- Verwendung eines dauerhaft installierten Kalibrierfelds (5 m x 20 m) aus Mauerscheiben mit Sichtbetonoberflächen mit hoher Planarität



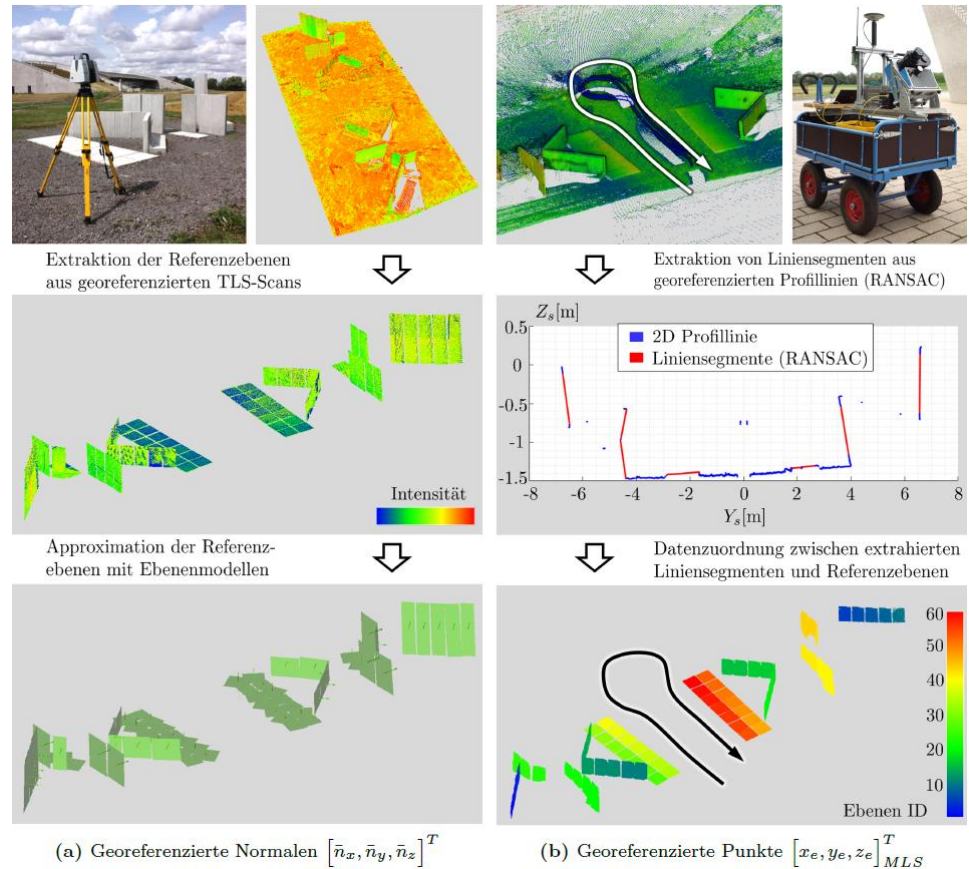
## 1. Bestimmung von Referenzwerten für Normalen der Ebenenanordnung

$$\begin{bmatrix} x_l & y_l & z_l \end{bmatrix}_{TLS} \cdot \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} - d_n \stackrel{!}{=} 0$$

## 2. Georeferenzierte Punkte des MSS müssen Ebenengleichung erfüllen

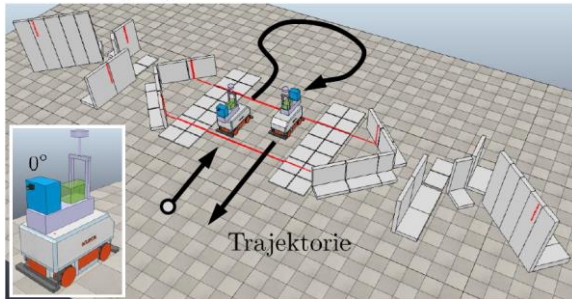
$$\underbrace{\begin{bmatrix} t_e \\ t_n \\ t_h \end{bmatrix} + R_b^n(\phi, \theta, \psi) \cdot \left( R_s^b(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} 0 \\ (d_s + d_0) \cdot \sin b_s \\ (d_s + d_0) \cdot \cos b_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \right)}_{[x_l, y_l, z_l]_{MLS}^T} \cdot \begin{bmatrix} \bar{n}_x \\ \bar{n}_y \\ \bar{n}_z \end{bmatrix} - 1 \stackrel{!}{=} 0$$

## 3. Ausgleichung der Kalibrierparameter nach MdkQ im Gauß-Helmert Modell

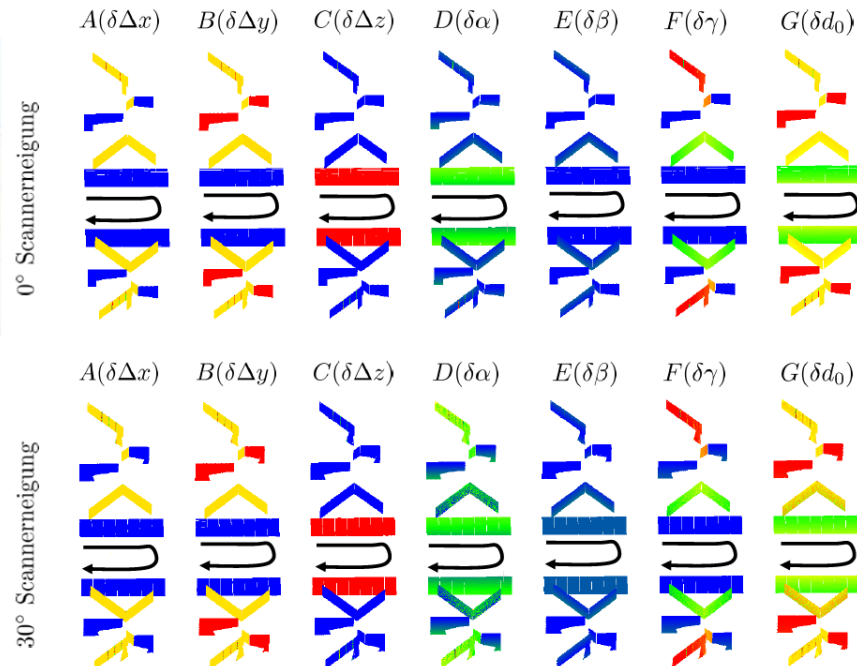
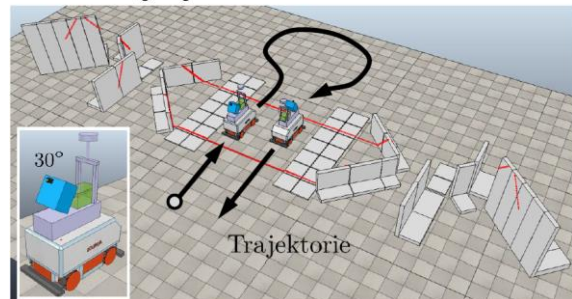


- Anordnung der Ebenen hat signifikanten Einfluss auf die Qualität der Kalibrierparameter
- Realer Kalibrierprozess wird für zwei Konfigurationen simuliert
- ➔ Einfluss wenn Kalibrierparameter von wahren Werten abweichen

Neigung Profilaserscanner 0°



Neigung Profilaserscanner 30°



## Simulierte Abweichungen

Fall A:  $\delta\Delta x = 5 \text{ mm}$

Fall B:  $\delta\Delta y = 5 \text{ mm}$

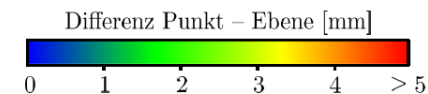
Fall C:  $\delta\Delta z = 5 \text{ mm}$

Fall D:  $\delta\alpha = 0,05^\circ$

Fall E:  $\delta\beta = 0,05^\circ$

Fall F:  $\delta\gamma = 0,05^\circ$

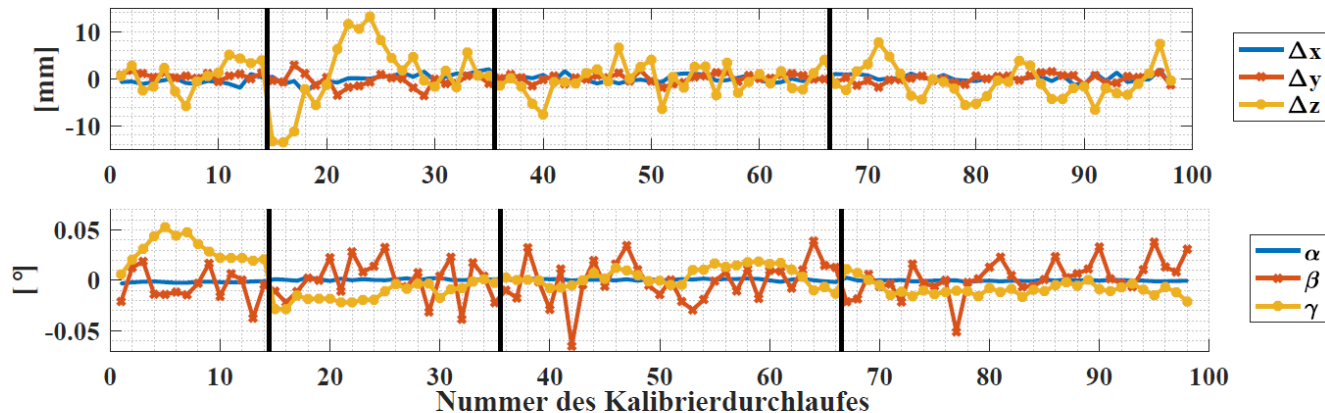
Fall G:  $\delta d_0 = 5 \text{ mm}$



## Schätzung und Langzeitstabilität der 6-DoF Kalibrierparameter



Block	Datum	GPS-Zeit	Durchläufe
1	31.07.2019	13:40 – 13:55	14
2	05.08.2019	09:05 – 09:25	21
3	05.08.2019	10:30 – 10:50	31
4	05.08.2019	11:45 – 12:10	32

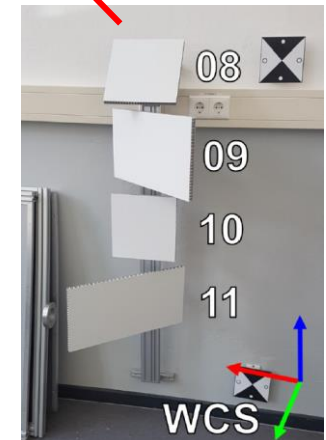
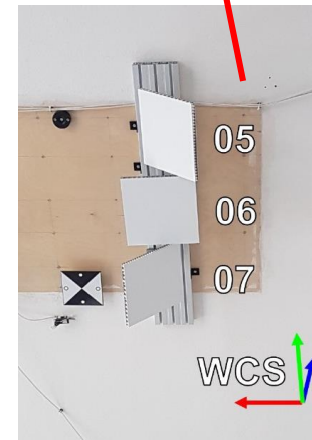
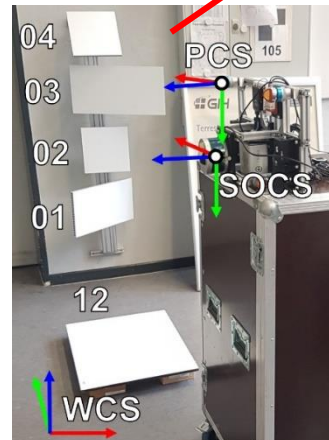
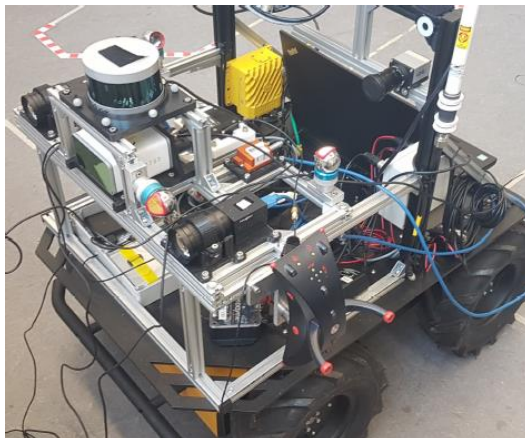
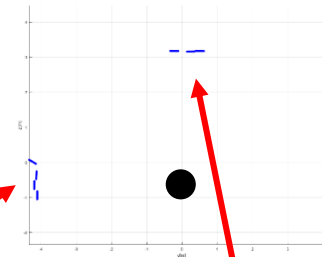


Parameter	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$d_0$
Mittelwert	-0,5559 m	0,0452 m	0,2994 m	0,1420°	-29,9620°	0,0058°	-0,05 mm
Zielgenauigkeit ( $\sigma$ )	1,0 mm	1,0 mm	1,5 mm	0,0050°	0,0050°	0,0050°	0,1 mm
1 Durchlauf ( $\hat{\sigma}$ )	0,9 mm	1,1 mm	4,5 mm	0,0012°	0,0188°	0,0166°	0,08 mm
15 Durchläufe ( $\bar{\sigma}_{15}$ )	0,2 mm	0,3 mm	1,2 mm	0,0003°	0,0049°	0,0043°	0,02 mm

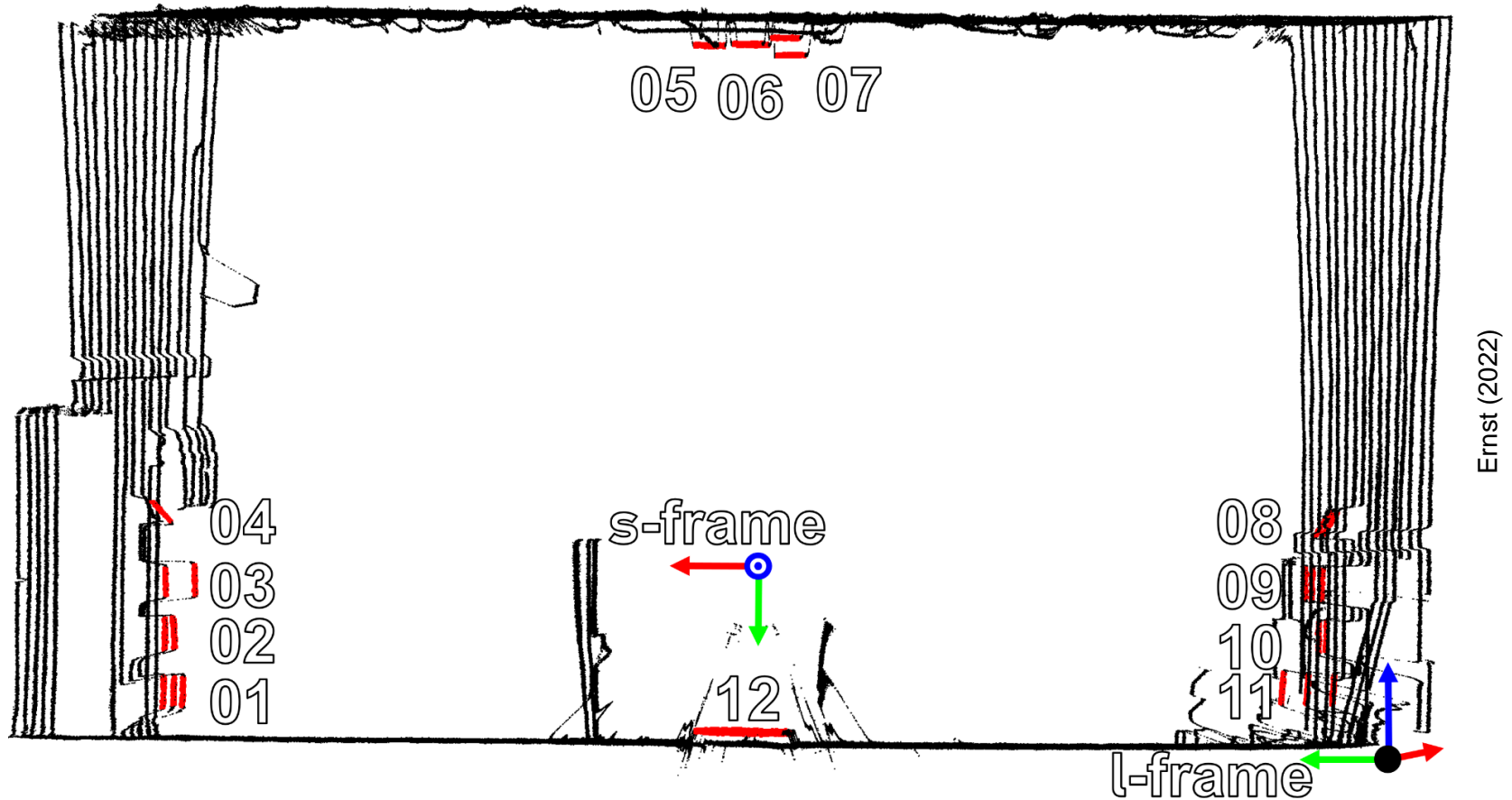


## *Korrelationsuntersuchung bei den 6-DoF Kalibrierparametern*

- Möglichst unabhängige Bestimmung der Transformationsparameter
- Verwendung mehrere unterschiedlicher Standpunkte um geometrische Konfiguration zu variieren

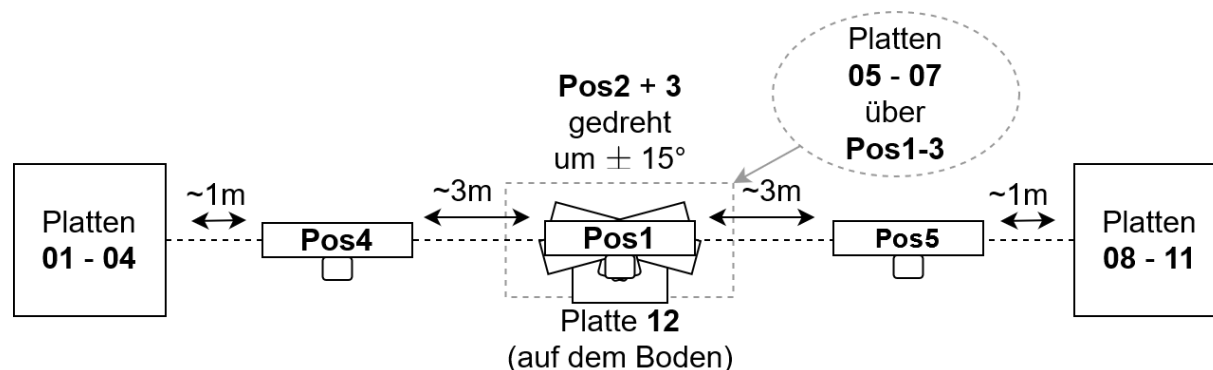


## Korrelationsuntersuchung bei den 6-DoF Kalibrierparametern



## *Korrelationsuntersuchung bei den 6-DoF Kalibrierparametern*

- Möglichst unabhängige Bestimmung der Transformationsparameter
- Verwendung mehrere unterschiedlicher Standpunkte um geometrische Konfiguration zu variieren
  - Kurze Distanzen für Translationen
  - Lange Zielweiten für Orientierungen
  - Gespiegelte Aufstellungen für etwaige Distanzoffsets
  - Verwendung originärer Messelemente

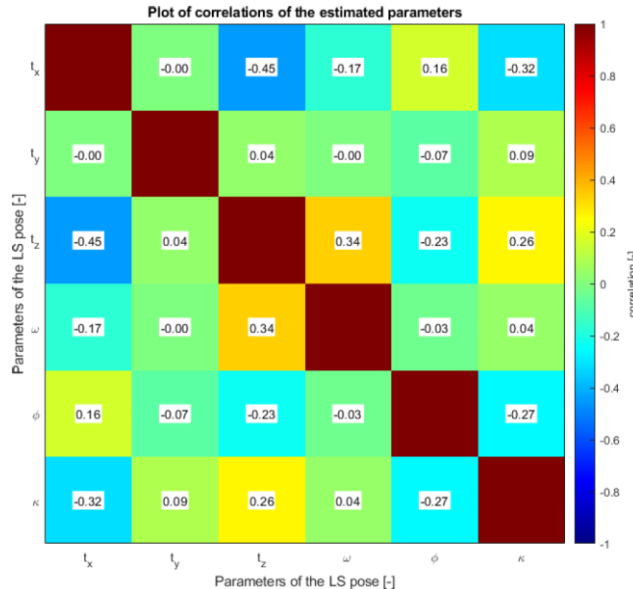




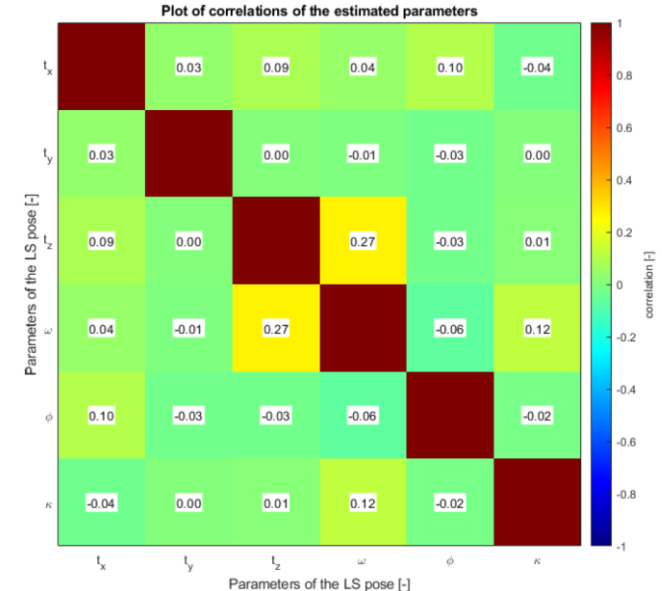
## Korrelationsuntersuchung bei den 6-DoF Kalibrierparametern

- Möglichst unabhängige Bestimmung der Transformationsparameter
- Verwendung mehrere unterschiedlicher Standpunkte um geometrische Konfiguration zu variieren

### Verwendung von Position 1



### Verwendung von Position 1 bis 5



- Okunsky, M. V., and N. V. Nesterova. "Velodyne LIDAR method for sensor data decoding." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 516. No. 1. IOP Publishing, 2019.
- Glennie, C. L.; Kusari, A. und Facchin, A. (2016): CALIBRATION AND STABILITY ANALYSIS OF THE VLP-16 LASER SCANNER. In: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XL-3/W4, 55–60.
- On Chan, T.; Lichti, D. D.; Roesler, G.; Cosandier, D. und Al-Durgham, K. (2019): RANGE SCALE-FACTOR CALIBRATION OF THE VELODYNE VLP-16 LIDAR SYSTEM FOR POSITION TRACKING APPLICATIONS. In: The 11th International Conference on Mobile Mapping Technology (MMT 2019), 1–6.
- Cattini, S.; Rovati, L.; Di Cecilia, L. und Ferrari, L. (2020): Comparison of the VLP-16 LiDAR system with an absolute interferometer. In: I2MTC 2020, IEEE. Piscataway, NJ, USA, 1–6.
- Ouyang, C.; Shi, S.; You, Z.; Zhao, K. Extrinsic Parameter Calibration Method for a Visual/Inertial Integrated System with a Predefined Mechanical Interface. Sensors 2019, 19, 3086.
- F. M. Mirzaei and S. I. Roumeliotis, "A Kalman Filter-Based Algorithm for IMU-Camera Calibration: Observability Analysis and Performance Evaluation," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 24, no. 5, pp. 1143-1156, Oct. 2008.
- Cui, J., Niu, J., Ouyang, Z., He, Y., & Liu, D. (2020). ACSC: Automatic Calibration for Non-repetitive Scanning Solid-State LiDAR and Camera Systems. arXiv preprint arXiv:2011.08516.
- Voges, R. (2020): Bounded-error visual-LiDAR odometry on mobile robots under consideration of spatiotemporal uncertainties. Ph.D. Thesis. Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover.
- Zhou, L.; Li, Z. und Kaess, M. (2018): Automatic Extrinsic Calibration of a Camera and a 3D LiDAR Using Line and Plane Correspondences. In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 5562–5569.
- Shi, B., Yu, P., Yang, M., Wang, C., Bai, Y., & Yang, F. (2021). Extrinsic Calibration of Dual LiDARs Based on Plane Features and Uncertainty Analysis. IEEE Sensors Journal, 21(9), 11117-11130.
- Heinz, E. (2021): Beiträge zur Kalibrierung und Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning. Ph.D. Thesis. Bonn.
- Ernst, D. (2021): Development of a quality model for the uncertainty judgement of a kinematic TLS-based multi-sensor system. Master Thesis (unpublished). Leibniz Universität Hannover. Geodätisches Institut.
- Ernst, D., Vogel, S., Neumann, I. und Alkhatib, H. (2022): Analyse unterschiedlicher Positionskombinationen zur intrinsischen und extrinsischen Kalibrierung eines Velodyne VLP-16. In: AVN (Allgemeine Vermessungs-Nachrichten). Akzeptiert.

- Strübing, T. und Neumann, I. (2013): Positions- und Orientierungsschätzung von LIDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen. . In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement. Strübing, Thorsten; Neumann, Ingo. 138 3, 210–221.
- Schön, S.; Brenner, C.; Alkhatib, H.; Coenen, M.; Dbouk, H.; Garcia-Fernandez, N.; Fischer, C.; Heipke, C.; Lohmann, K.; Neumann, I.; Nguyen, U.; Paffenholz, J.-A.; Peters, T.; Rottensteiner, F.; Schachtschneider, J.; Sester, M.; Sun, L.; Vogel, S.; Voges, R. und Wagner, B. (2018): Integrity and Collaboration in Dynamic Sensor Networks. . In: Sensors. Schön, Steffen; Brenner, Claus; Alkhatib, Hamza; Coenen, Max; Dbouk, Hani; Garcia-Fernandez, Nicolas; Fischer, Colin; Heipke, Christian; Lohmann, Katja; Neumann, Ingo; Nguyen, Uyen; Paffenholz, Jens-André; Peters, Torben; Rottensteiner, Franz; Schachtschneider, Julia; Sester, Monika; Sun, Ligang; Vogel, Sören; Voges, Raphael; Wagner, Bernardo. 18 7, 21.
- Keller, F. und Sternberg, H. (2013): Multi-Sensor Platform for Indoor Mobile Mapping: System Calibration and Using a Total Station for Indoor Applications. . In: Remote Sensing. Keller, Friedrich; Sternberg, Harald. 5 11, 5805–5824.
- Hartmann, J.; Gösseln, I. von; Schild, N.; Dorndorf, A.; Paffenholz, J.-A. und Neumann, I. (2019): OPTIMISATION OF THE CALIBRATION PROCESS OF A K-TLS BASED MULTI-SENSOR-SYSTEM BY GENETIC ALGORITHMS. . In: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Hartmann, J.; Gösseln, I. von; Schild, N.; Dorndorf, A.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I. XLII-2/W13, pp. 1655–1662.
- Vogel, S. (2020): Kalman Filtering with State Constraints Applied to Multi-sensor Systems and Georeferencing. Ph.D. Thesis. München. DGK, Reihe C. 856.
- Heinz, E. (2021): Beiträge zur Kalibrierung und Evaluierung von Multisensorsystemen für kinematisches Laserscanning. Ph.D. Thesis. Bonn.
- Pandey, G.; McBride, J. R.; Savarese, S. und Eustice, R. M. (2012): Automatic Targetless Extrinsic Calibration of a 3D Lidar and Camera by Maximizing Mutual Information. . In: Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence, 2053–2059.
- Schneider, D.; Maas, H.-G. (2007): Integrated Bundle Adjustment of Terrestrial Laser Scanner Data and Image Data with Variance Component Estimation. The Photogrammetric Journal of Finland, Volume 20/2007, pp. 5 - 15.
- Stenz, U.; Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I. High-Precision 3D Object Capturing with Static and Kinematic Terrestrial Laser Scanning in Industrial Applications—Approaches of Quality Assessment. Remote Sens. 2020, 12, 290.
- Voges, R. (2020): Bounded-error visual-LiDAR odometry on mobile robots under consideration of spatiotemporal uncertainties. Ph.D. Thesis. Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover.
- Zhou, L.; Li, Z. und Kaess, M. (2018): Automatic Extrinsic Calibration of a Camera and a 3D LiDAR Using Line and Plane Correspondences. . In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 5562–5569.