

Multi-Sensor-Systeme

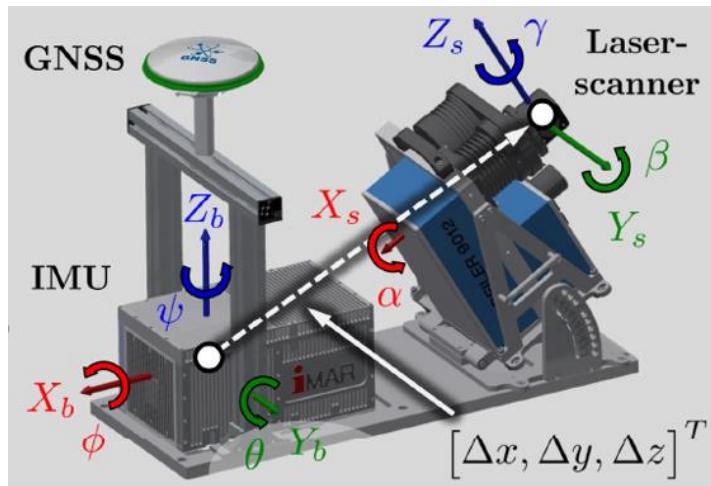
Kalibrierung

Wintersemester 2022/2023

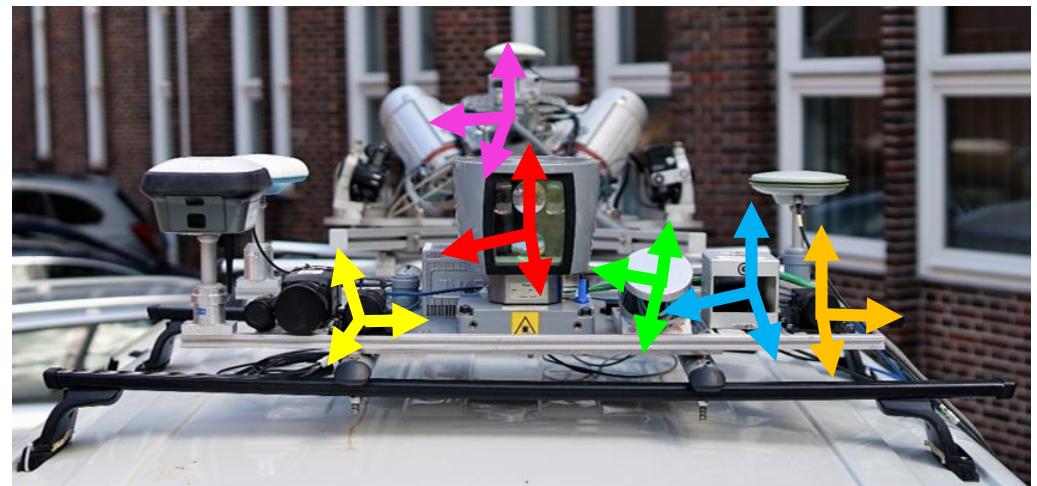
Dr.-Ing. Sören Vogel

Realisierung eines einheitlichen räumlichen Bezuges zwischen den unterschiedlichen Koordinatensystemen eines Multi-Sensor-Systems

- Individuelle sensorspezifische Koordinatensysteme (**Sensor-Frame**)
- Übergeordnetes Plattformkoordinatensystem (**Body-Frame**)
- Globales (Labor-)Koordinatensystem (**World-Frame**) → (Geo-)Referenzierung



Heinz (2021)



Vogel (2020)

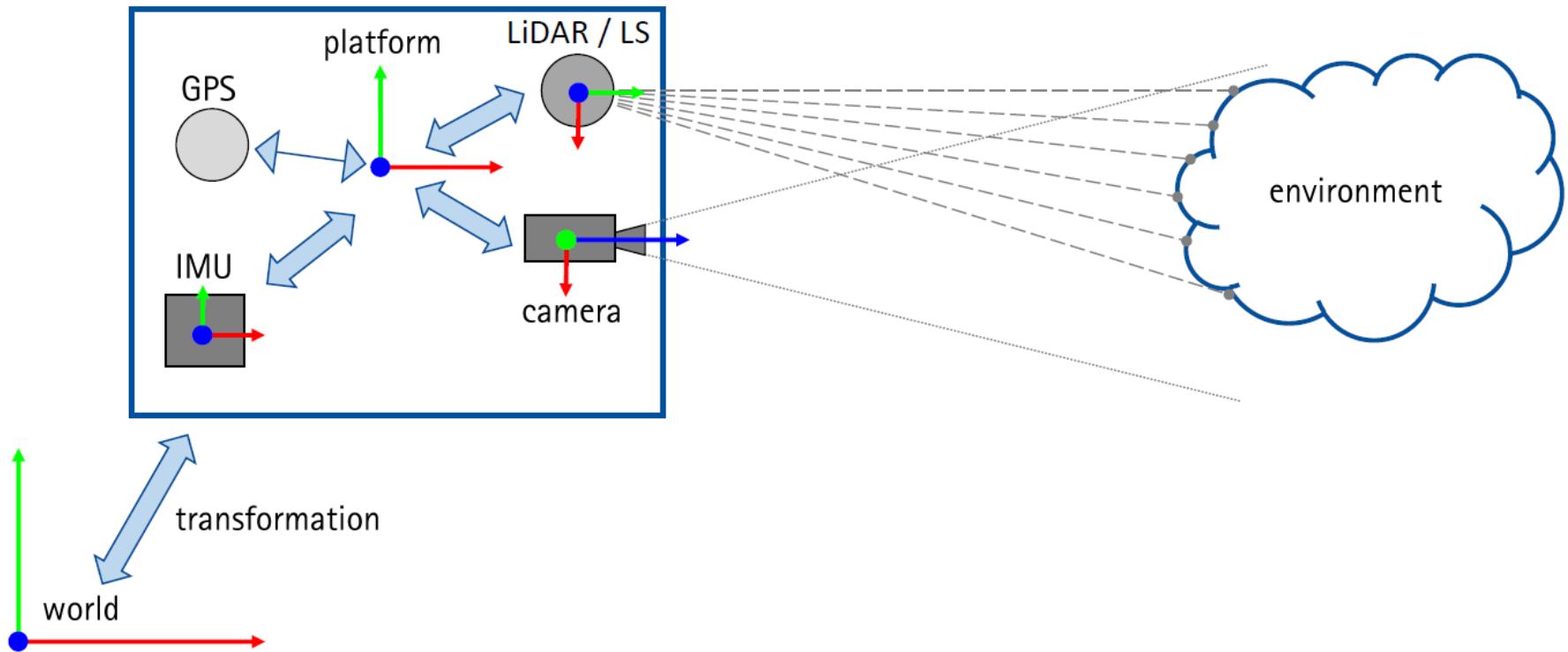


Abbildung: Dominik Ernst 2021

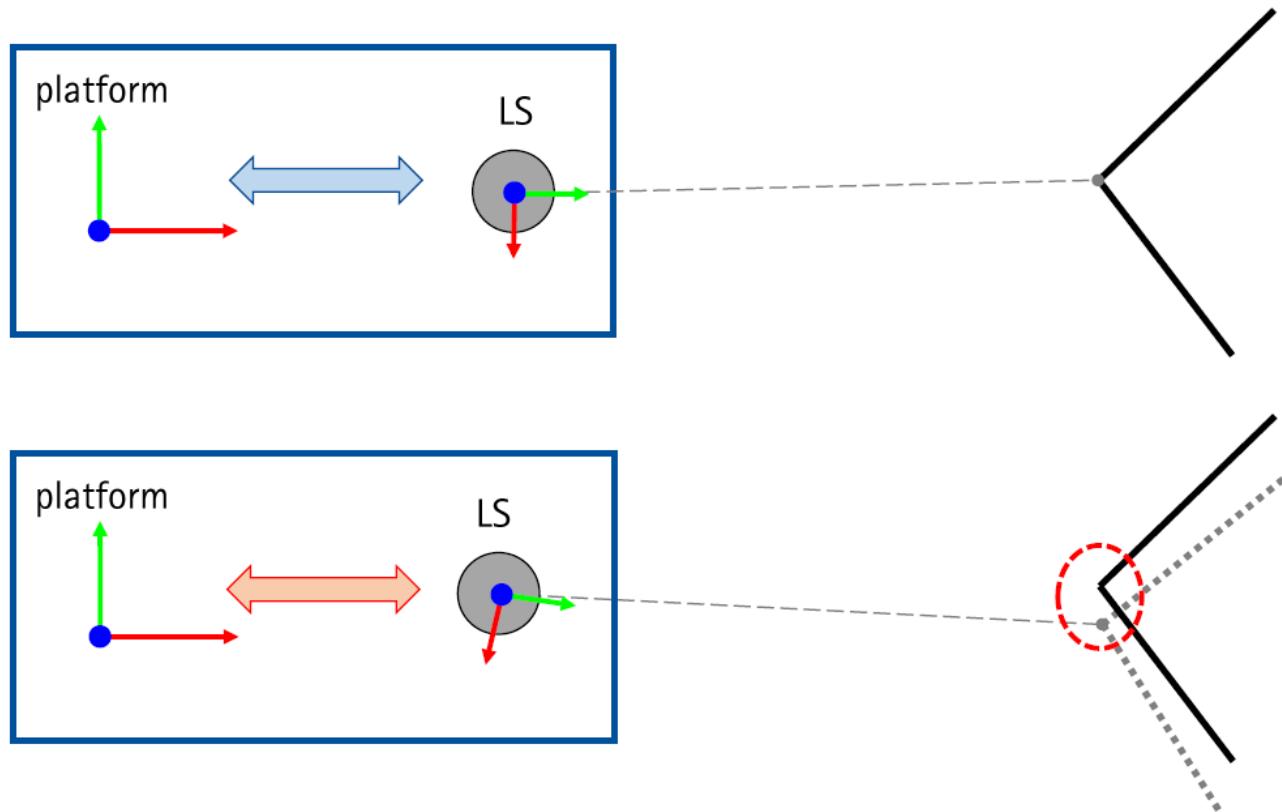


Abbildung: Dominik Ernst 2021

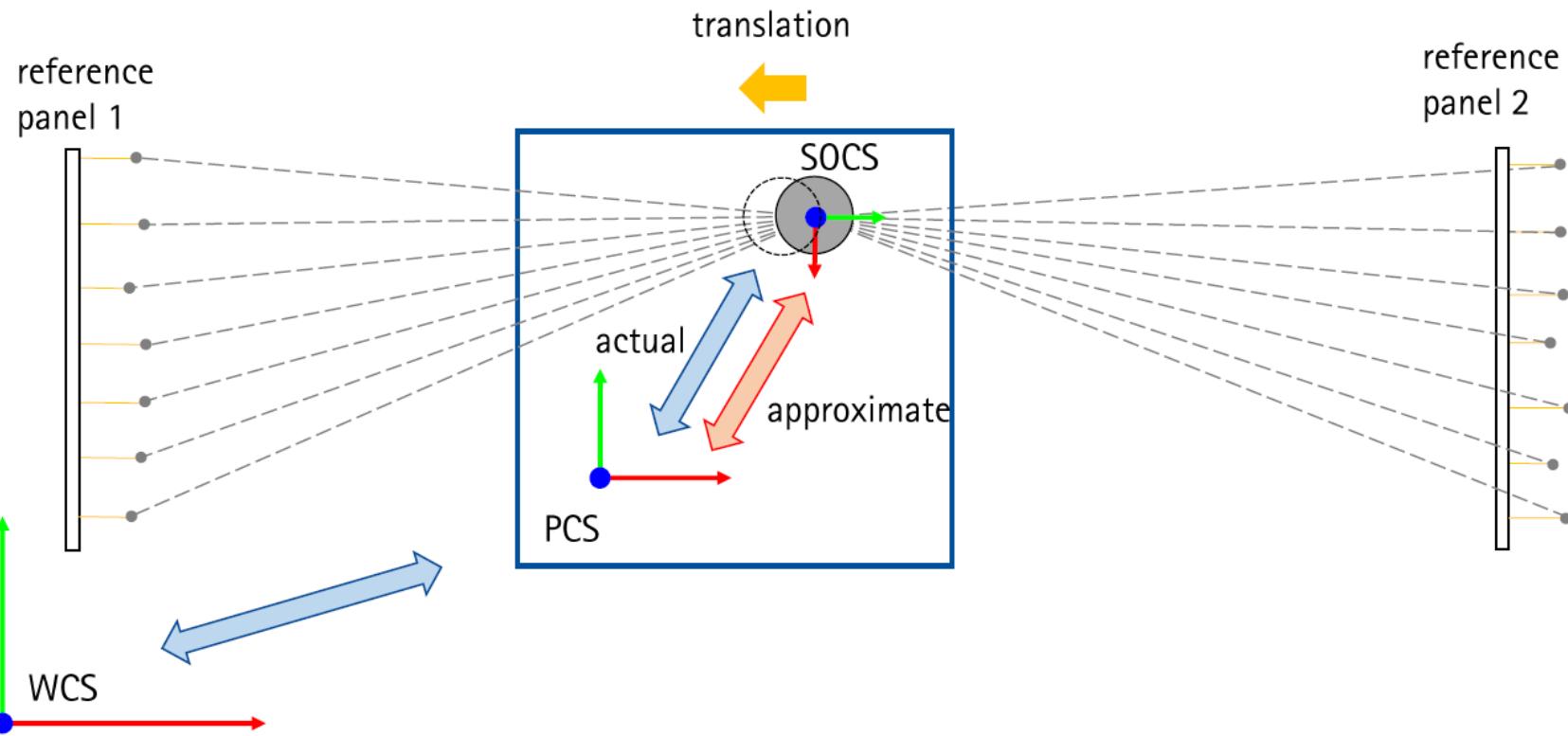
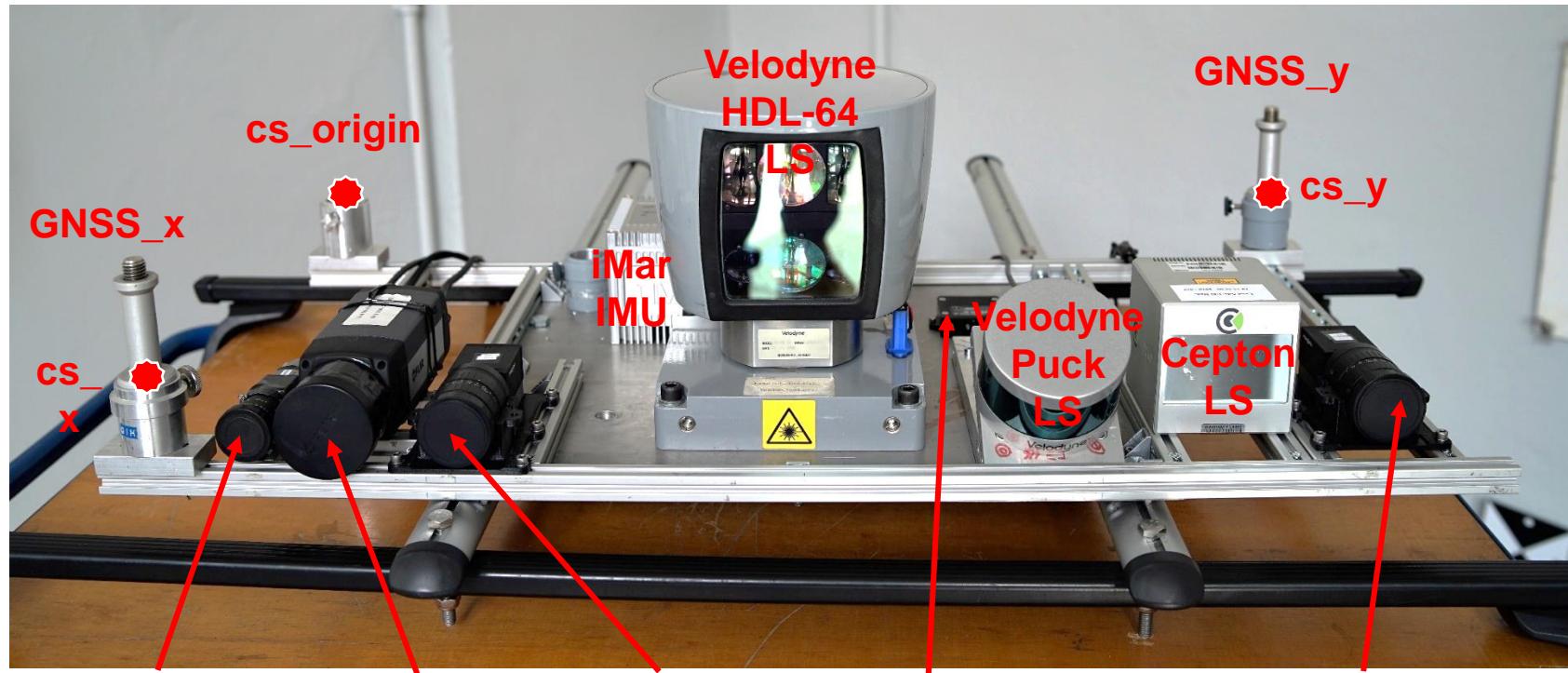


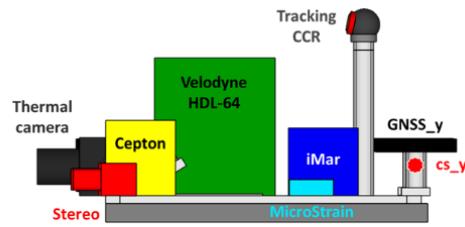
Abbildung: Dominik Ernst 2021

- **Überprüfung des Equipments vor dem Einsatz**
 - Beurteilung der Einsatzbarkeit des Equipments
 - Qualitätssicherung der gesamten Ausrüstung und damit der Messergebnisse
 - Ggf. Effizienzsteigerung durch Vermeidung von Nachmessungen
- **Bei Herstellern**
 - Fertigung kann mechanisch nichts so genau erfolgen, wie es notwendig wäre, um die angestrebte Genauigkeit der Sensoren sicherzustellen → Abhilfe durch Kalibrierung
 - Hochpräzise mechanische Fertigung ist zu teuer → Effizienz / Gewinnmaximierung
- **Steigerung der Qualität von Ergebnissen von Low-Cost-Sensorik**
 - Neue Anwendungsfelder erschließbar
 - Einsparung von Sensorkosten oder mehr Sensoren können eingesetzt werden
- **Zeitliche Veränderung von Kenngrößen bzw. elektronische Bauteilen**
 - Z.B. EDM: Frequenz des Quarzes / Oszillators verändert sich
 - Mechanische Beanspruchung – ggf. sogar durch Stöße oder Vibrationen
- **Anordnung (6DOF) von Sensoren auf Multi-Sensor-Plattformen**

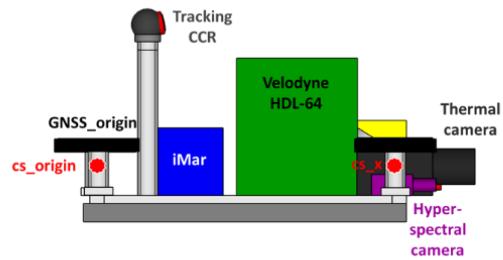
Bestimmung der 6 Freiheitsgrade (engl. Degrees of Freedom (DoF))



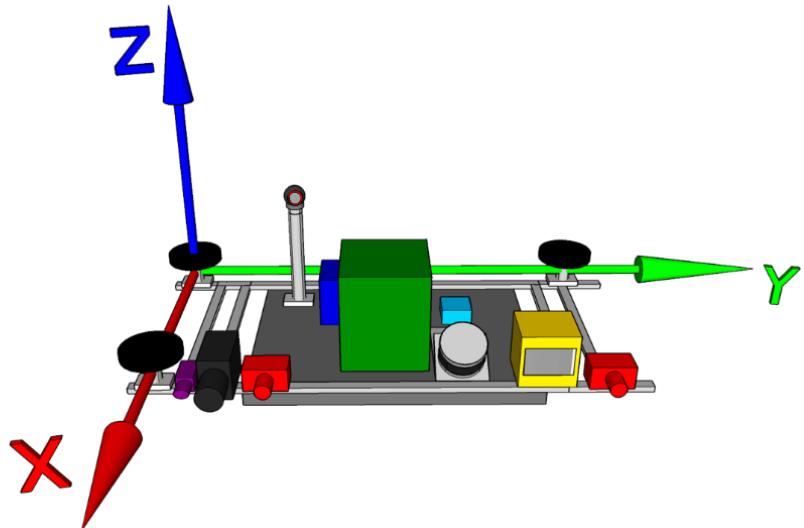
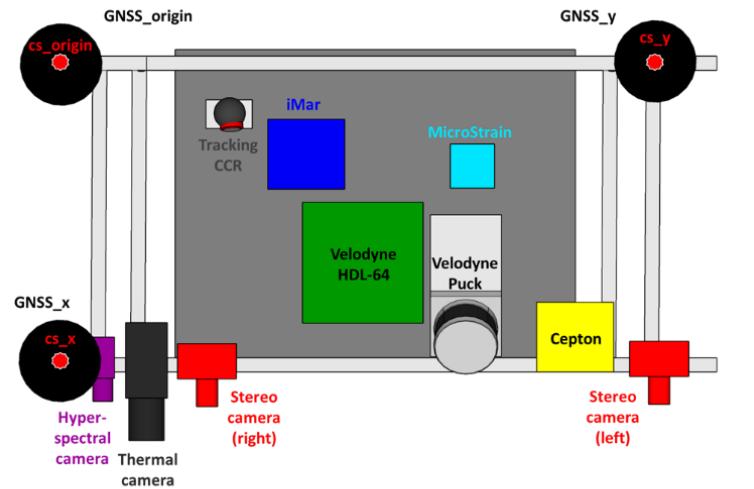
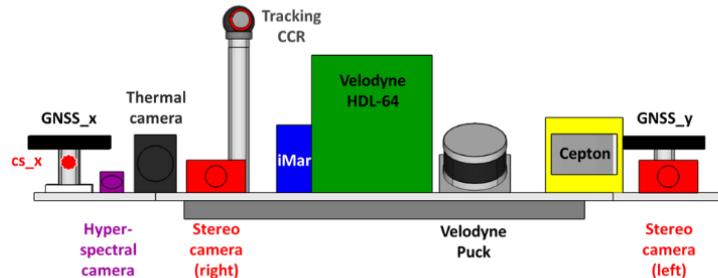
side view (left)



side view (right)



front view



- **Komponentenkalibrierung**
→ Interne / Innere Kalibrierung für einzelne Sensoren

- **Systemkalibrierung**
→ räumlicher Bezug zwischen mehreren Sensoren

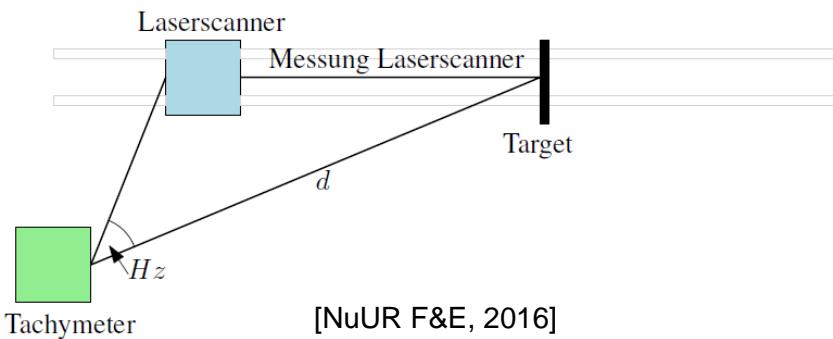
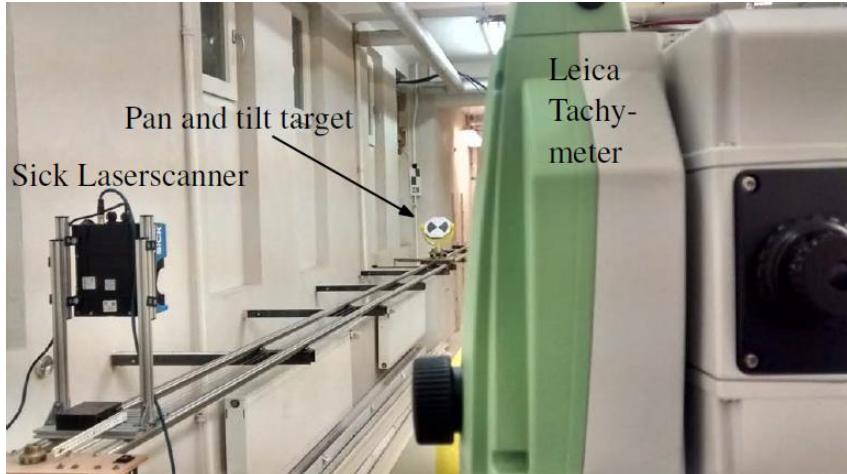
- **Selbstkalibrierung**
→ in-situ-Kalibrierung „on-the-fly“

- Eigenständige Kalibrierung eines individuellen Sensors
- Separierung aller Betrachtungen jeweils auf eine Messgröße
- Vergleich einer originären Messgröße gegen Referenzwerte

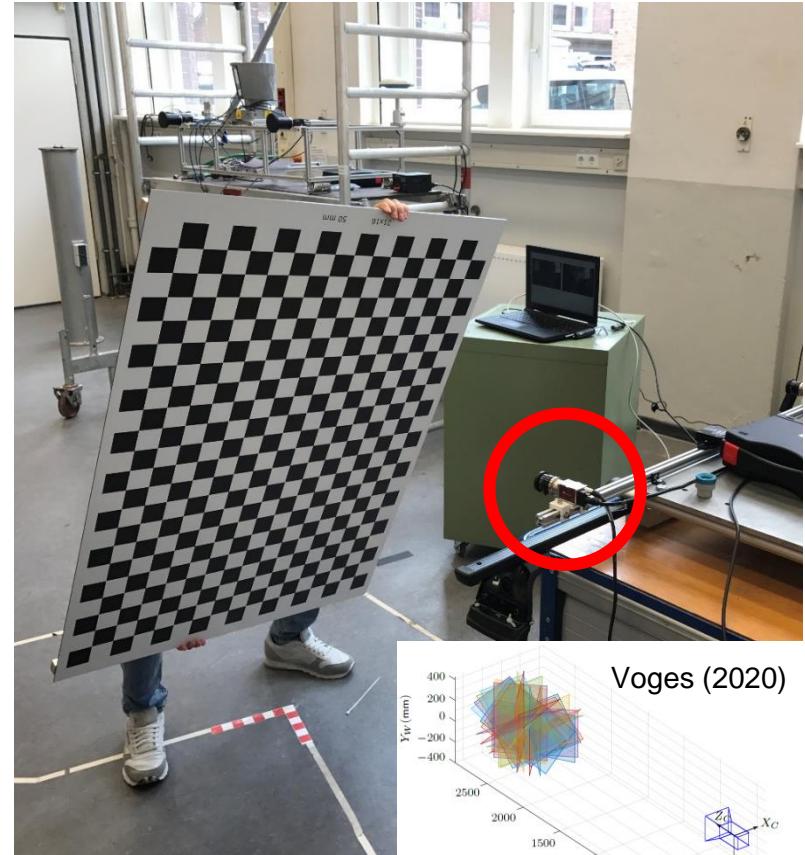
Beispiele

- Laserscanner: Maßstab, Additionskonstante, etc.
- Kamera: Bildhauptpunkt, Kamerakonstante, Verzeichnungsparameter, etc.
- IMU: Drift, Skalierung, etc.
- Tachymeter: Maßstab, Additionskonstante, etc.
- GNSS-Antenne: Offset vom Phasenzentrum zum Antennenreferenzpunkt

Laserscanner



Kamera



Inertiale Messeinheit

imar-navigation.de

GNSS-Antenne



[by FBG / C. Bierwagen]

Vorteile:

- Klare Trennung aller Einflüsse auf die jeweiligen Messgrößen
- Einfache mathematische Modelle für die Bestimmung der Kalibrierparameter

Nachteile:

- i.A. sehr aufwendige Kalibrierroutinen
- Gerade bei vielen Sensoren ineffiziente (kostenintensive) Vorgehensweise
- Vorgehensweise muss nicht zwingend repräsentativ für Anwendungen sein
- Herstellerkalibrierung ab Werk (und in regelmäßigen Wartungsintervallen)
- Wird im Folgenden als bekannt/gegeben angenommen

- Gemeinsame Betrachtungen aller (mind. mehrerer) Messgrößen/Sensoren im Kalibrierprozess
- Vergleich abgeleiteter Größen (i.d.R. Zielgrößen; z.B. Koordinaten) mit Referenzwerten

Anwendung auf ein Multi-Sensor-System in mehreren Elementen:

- Realisierung und Definition eines Plattformkoordinatensystems
- Verknüpfung der individuellen Sensor-Koordinatensysteme mit geeigneten Verfahren
 - *Relativ zwischen den Sensoren*
 - *Absolut mit Bezug zum Plattformkoordinatensystem*
 - *Übergeordnete (Geo-)Referenzierung*

Vorteile:

校准程序

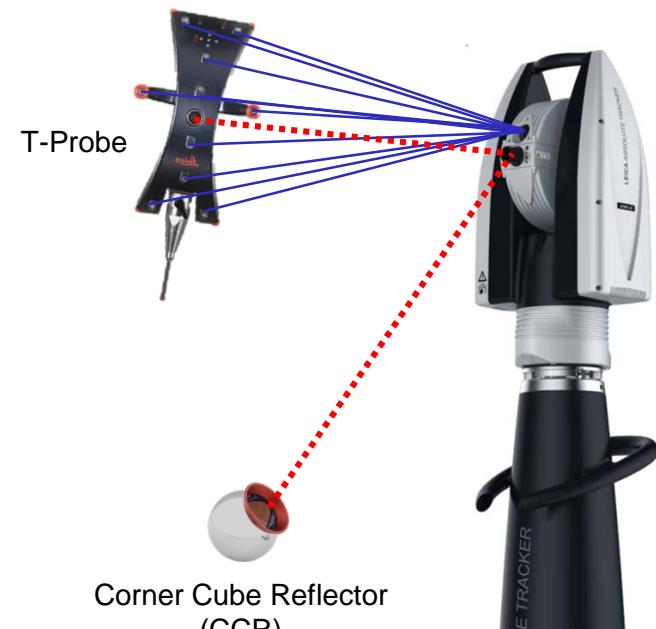
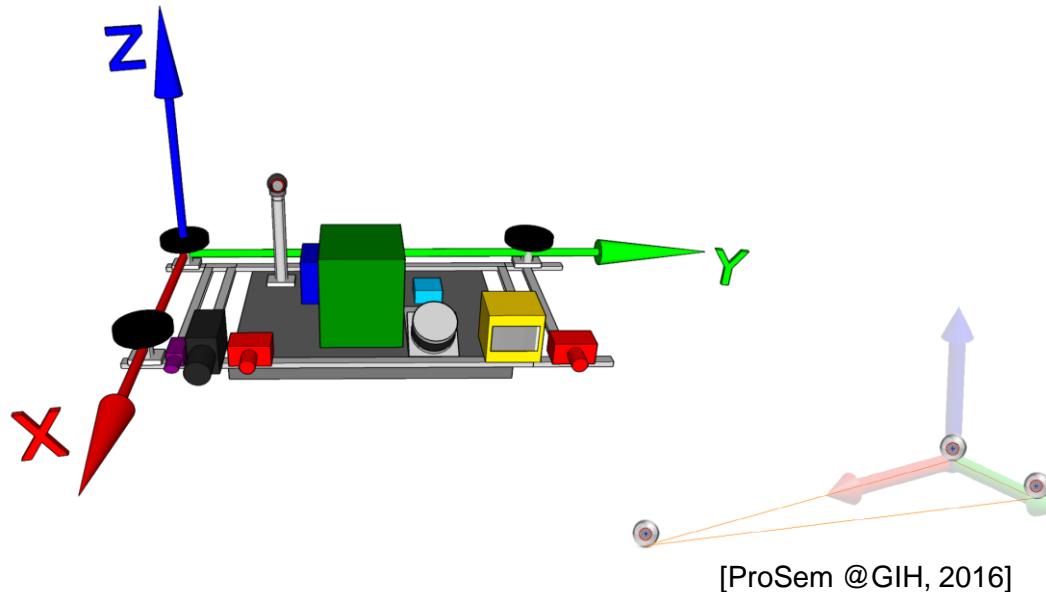
- i.A. weniger aufwendige Kalibrierroutinen im Vergleich zur Komponentenkalibrierung
- i.d.R. deutlich effizienter als Komponentenkalibrierung

Nachteile:

- Schwere Trennung/Zuordnung einzelner Kalibrierparameter auf die Messgrößen
- Komplexere mathematische Modelle für die Bestimmung der Kalibrierparameter
- Kalibrierung sollte regelmäßig und insbesondere vor/nach der Verwendung des MSS erfolgen

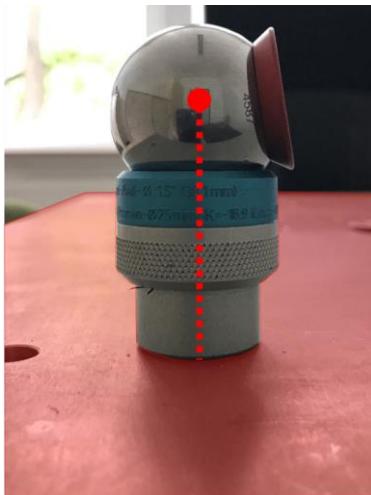
Realisierung eines Plattformkoordinatensystems (PKS)

- 3 Punktkoordinaten zur Definition (über Kreuzprodukt)
- Hoher Anspruch an zeitliche Stabilität für Reproduzierbarkeit 再生性
→ Überprüfung von Veränderungen der Transformationsparameter (6 DoF) vor / nach einer Messkampagne



Realisierung eines Plattformkoordinatensystems (PKS)

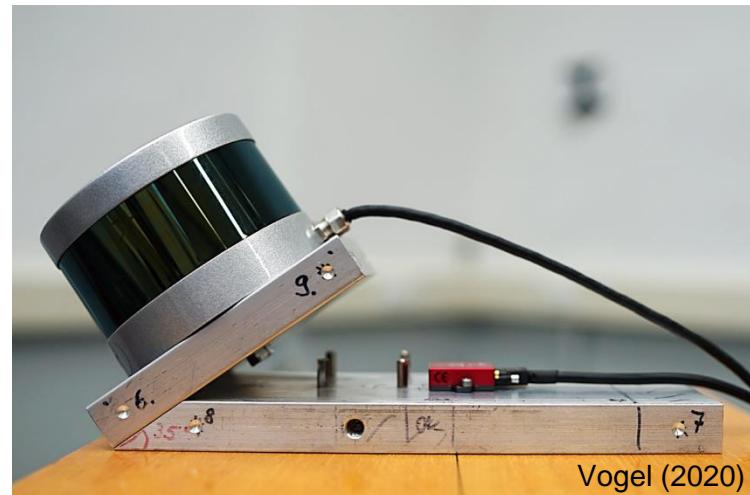
- 3 Punktkoordinaten zur Definition (über Kreuzprodukt)
- Hoher Anspruch an zeitliche Stabilität für Reproduzierbarkeit
→ Überprüfung von Veränderungen der Transformationsparameter (6 DoF) vor / nach einer Messkampagne



CCR-Nest



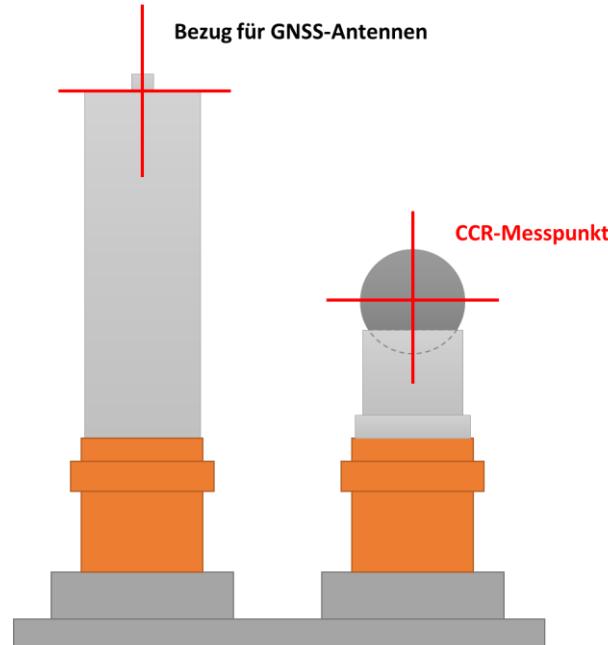
Multi-Sensor-Systeme



Bohrung

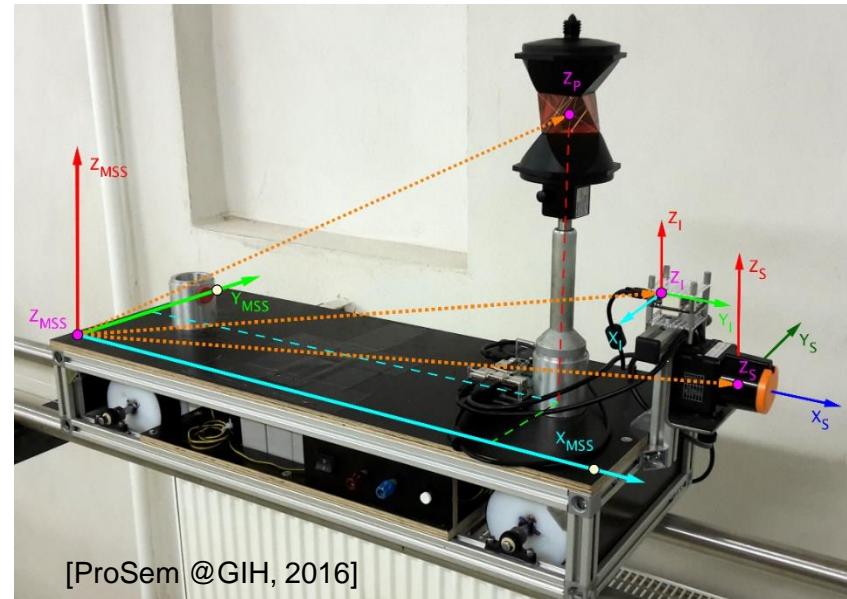
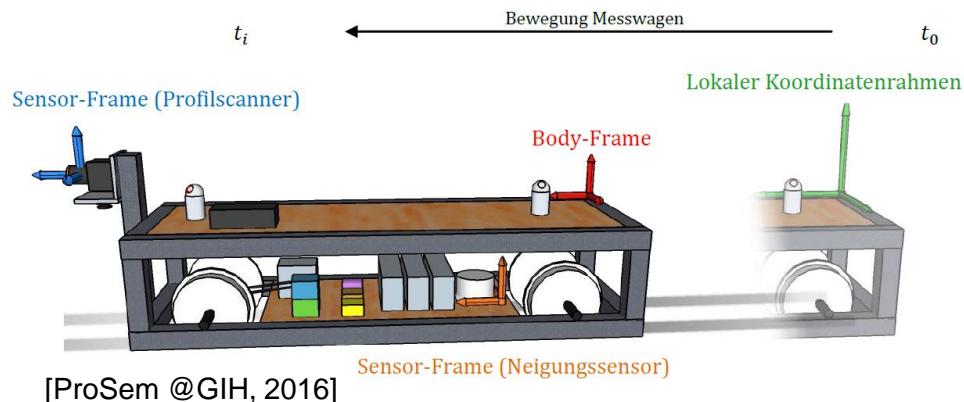
Realisierung eines Plattformkoordinatensystems (PKS)

- 3 Punktkoordinaten zur Definition (über Kreuzprodukt)
- Hoher Anspruch an zeitliche Stabilität für Reproduzierbarkeit
→ Überprüfung von Veränderungen der Transformationsparameter (6 DoF) vor / nach einer Messkampagne



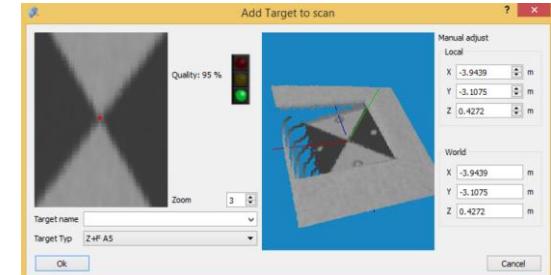
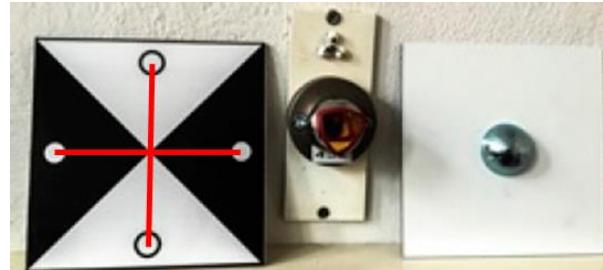
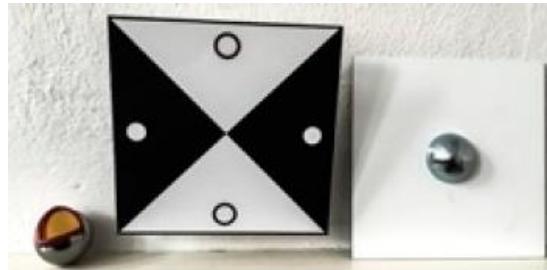
Realisierung eines Plattformkoordinatensystems (PKS)

- Gleismesswagen im Rahmen vom Projektseminar 2015/2016 am GIH
- Hokuyo Laserscanner
- Tinkerforge IMU
- Raspberry PI Kamera
- Neigungssensor
- 360°-Prisma (Tracking)



Räumlicher Bezug zwischen den einzelnen Sensoren eines MSS: Relativ

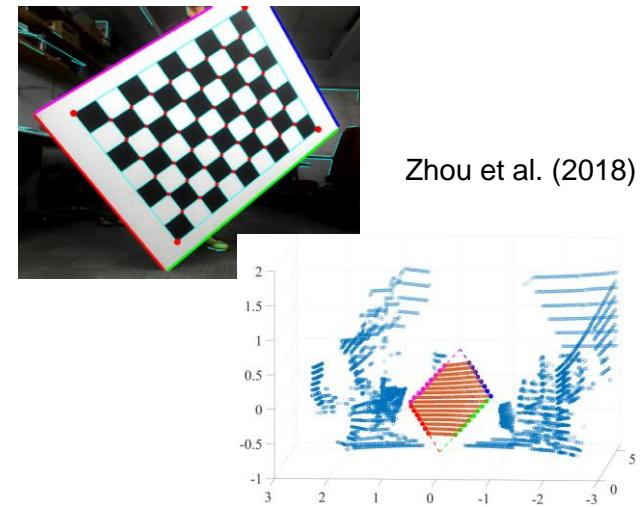
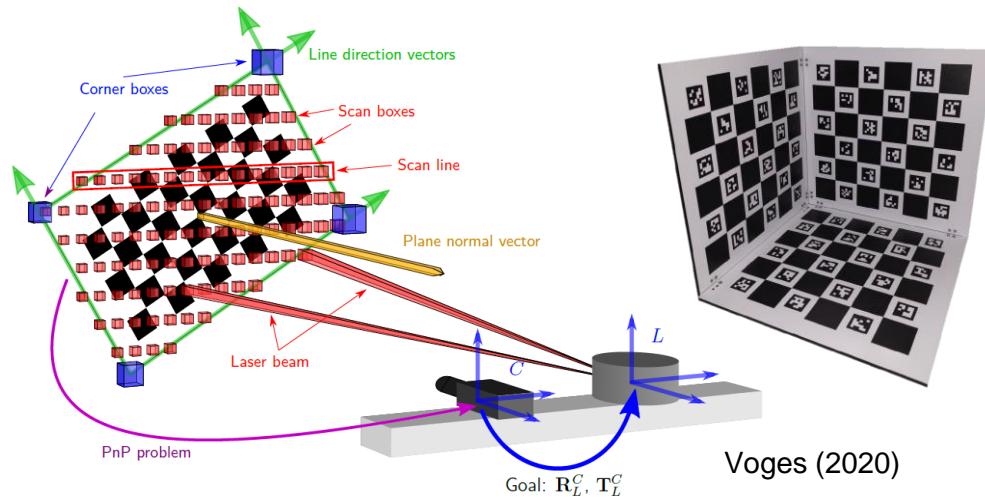
- z.B.: Bezug zwischen Kamera und Laserscanner
- Beobachtung identischer (künstlicher) Objekte/Targets in verschiedenen Szenen mit Laserscanner und Kamera
- Einführung der Bedingung, dass beobachtete Objekte/Targets identische Positionen und Eigenschaften in Kamera- und LS-Messungen haben müssen
 - Optional: Einführung von Lasertrackermessungen



Stenz et al. (2020)

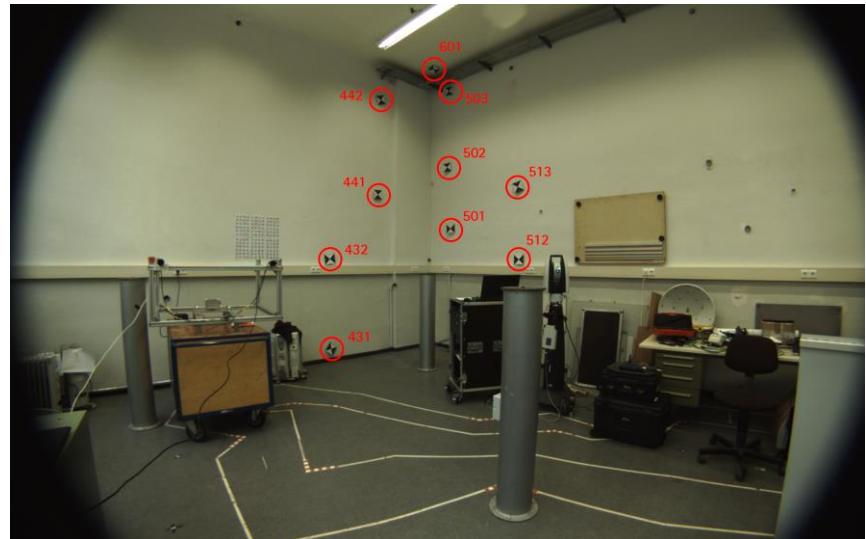
Räumlicher Bezug zwischen den einzelnen Sensoren eines MSS: Relativ

- z.B.: Bezug zwischen Kamera und Laserscanner
- Beobachtung identischer (künstlicher) Objekte/Targets in verschiedenen Szenen mit Laserscanner und Kamera
- Einführung der Bedingung, dass beobachtete Objekte/Targets identische Positionen und Eigenschaften in Kamera- und LS-Messungen haben müssen



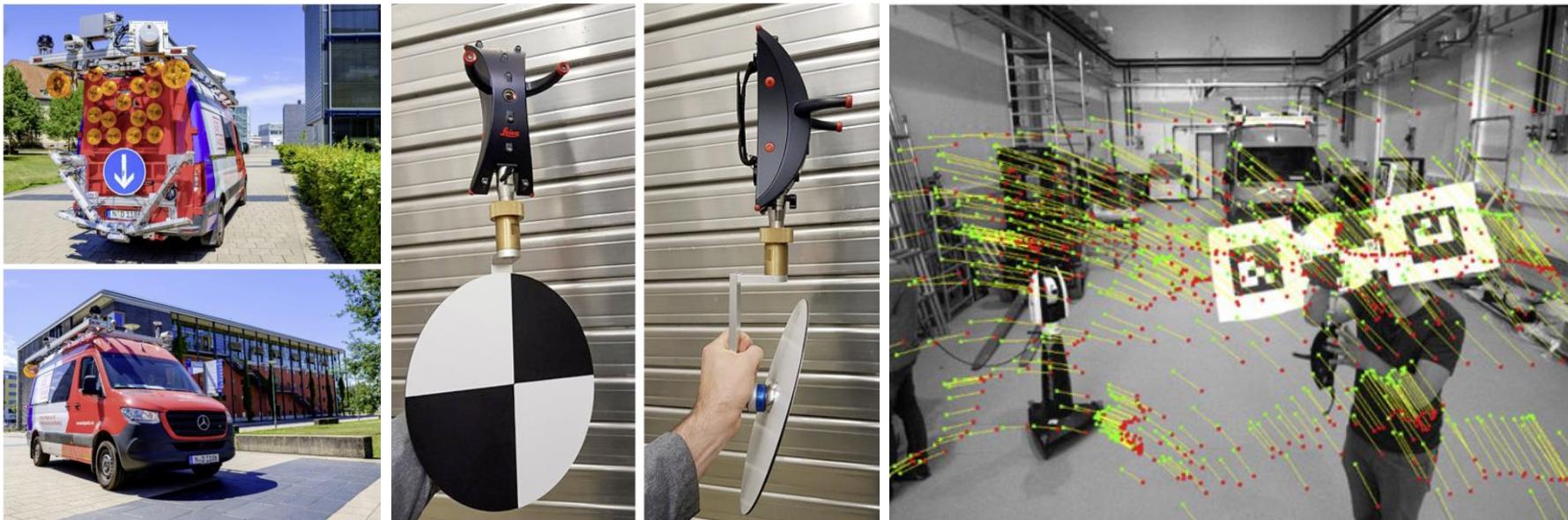
Räumlicher Bezug zwischen den einzelnen Sensoren eines MSS: Absolut

- Methodik in Abhängigkeit des Sensors zu wählen
 - Verwendung von geometrischen Primitiven im Objektraum für erfassende Sensoren 原始的



Räumlicher Bezug zwischen den einzelnen Sensoren eines MSS: Absolut

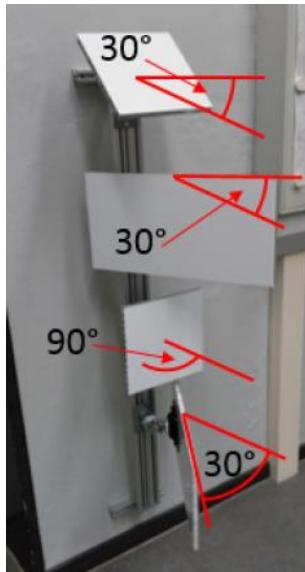
- Methodik in Abhängigkeit des Sensors zu wählen
 - Verwendung von geometrischen Primitiven im Objektraum für erfassende Sensoren



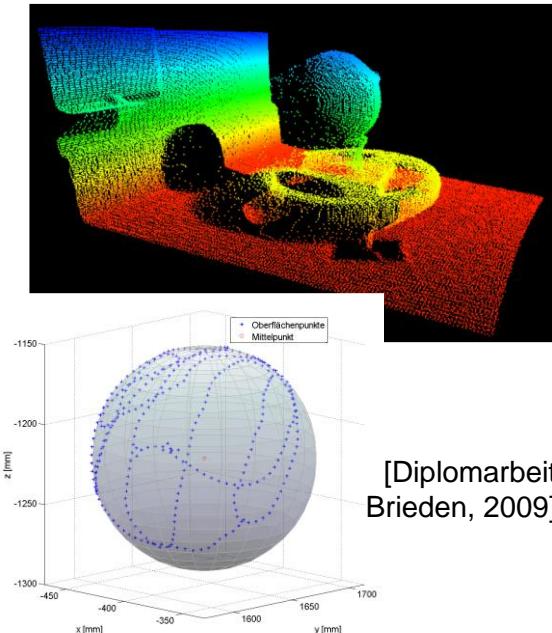
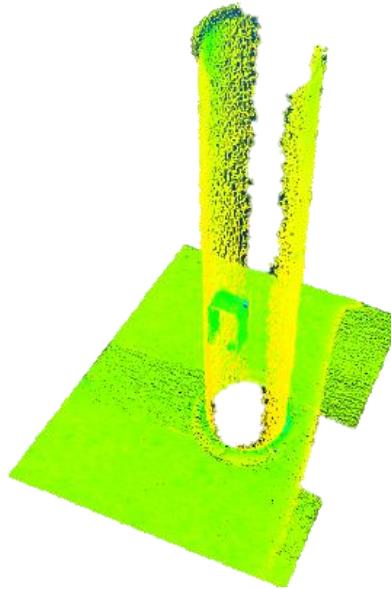
Reiterer et al. (2022)

Räumlicher Bezug zwischen den einzelnen Sensoren eines MSS: Absolut

- Methodik in Abhängigkeit des Sensors zu wählen
 - Verwendung von geometrischen Primitiven im Objektraum für erfassende Sensoren

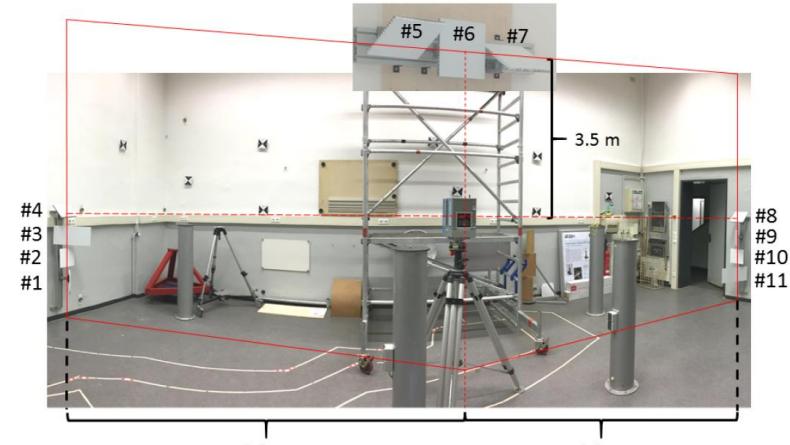
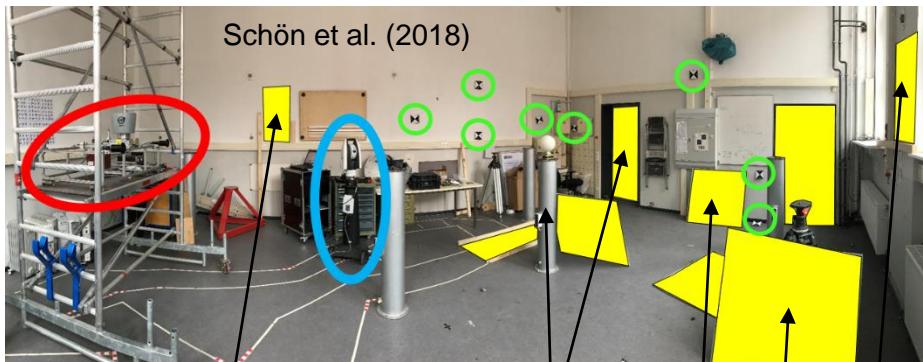


[Bachelorarbeit
Schild, 2019]



Räumlicher Bezug zwischen den einzelnen Sensoren eines MSS: Absolut

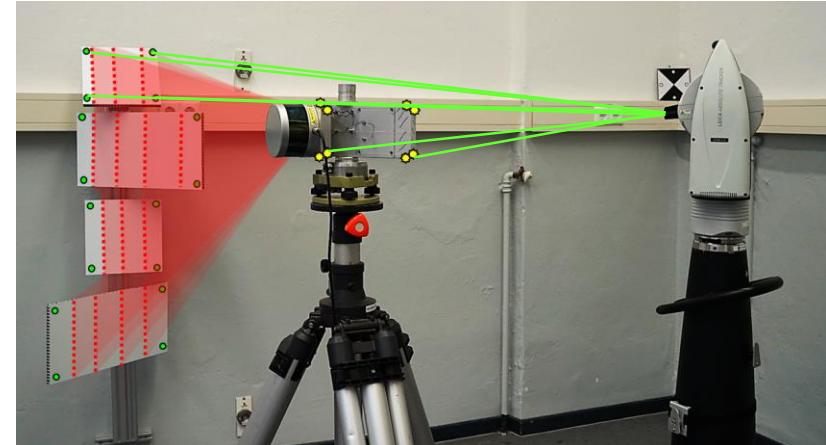
- Methodik in Abhängigkeit des Sensors zu wählen
 - Verwendung von geometrischen Primitiven im Objektraum für erfassende Sensoren



Räumlicher Bezug zwischen den einzelnen Sensoren eines MSS: Absolut

- Methodik in Abhängigkeit des Sensors zu wählen
 - Verwendung von geometrischen Primitiven im Objektraum für erfassende Sensoren

1. PKS mit LT einmessen
2. Referenzebenen mit LT einmessen
[n_x, n_y, n_z, d]
3. Referenzebenen mit LS erfassen
[$\mathbf{x}_{LS}, \mathbf{y}_{LS}, \mathbf{z}_{LS}$]
4. Minimierung der Distanzen zwischen LT- und LS-Beobachtungen
→ 6 DoF: [$t_x, t_y, t_z, \omega, \varphi, \kappa$]

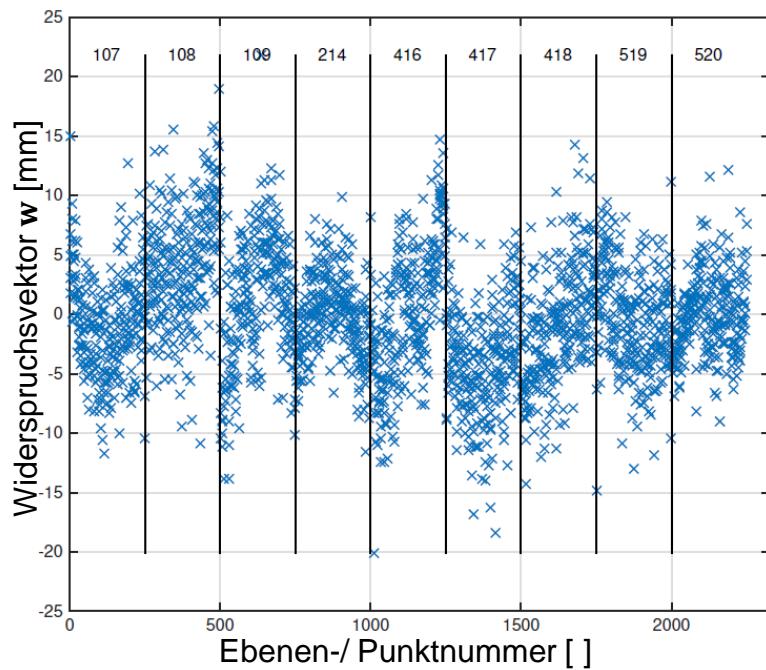


Vogel (2020)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{LT} \\ \mathbf{y}_{LT} \\ \mathbf{z}_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa) \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{LS} \\ \mathbf{y}_{LS} \\ \mathbf{z}_{LS} \end{bmatrix} \quad \text{wobei Widerspruch} \quad \mathbf{w} = n_x \mathbf{x}_{LT} + n_y \mathbf{y}_{LT} + n_z \mathbf{z}_{LT} - \mathbf{d}$$

Räumlicher Bezug zwischen den einzelnen Sensoren eines MSS: Absolut

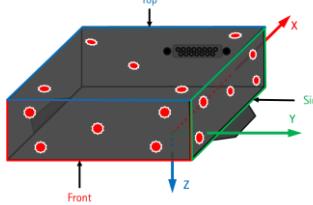
- Methodik in Abhängigkeit des Sensors zu wählen
 - Verwendung von geometrischen Primitiven im Objektraum für erfassende Sensoren



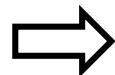
Parameter	\hat{x}	$\sigma_{\hat{x}}$
x [mm]	710.52	0.85
y [mm]	96.79	0.23
z [mm]	63.73	0.16
ω [gon]	-0.198	0.037
φ [gon]	-1.798	0.086
κ [gon]	0.660	0.104

Räumlicher Bezug zwischen den einzelnen Sensoren eines MSS: Absolut

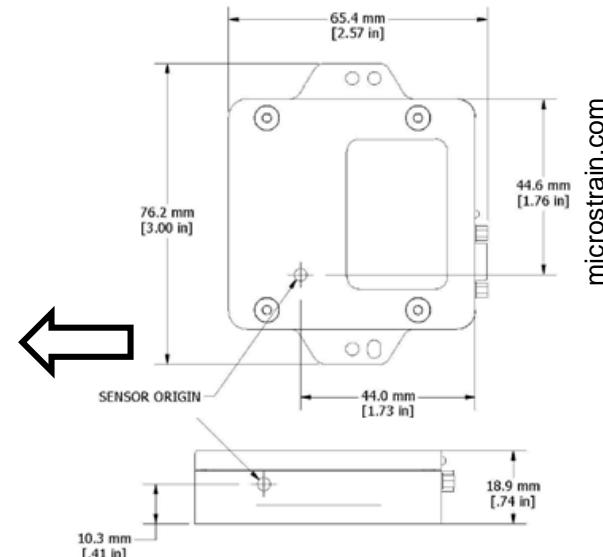
- Methodik in Abhängigkeit des Sensors zu wählen
 - Verwendung von technischen Zeichnungen der Hersteller und Einmessung des Gehäuses



Einmessung des Gehäuses



Definition
Sensorkoordinatensystem

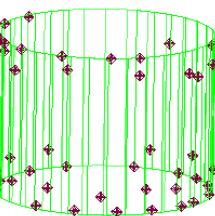


Technische Zeichnung

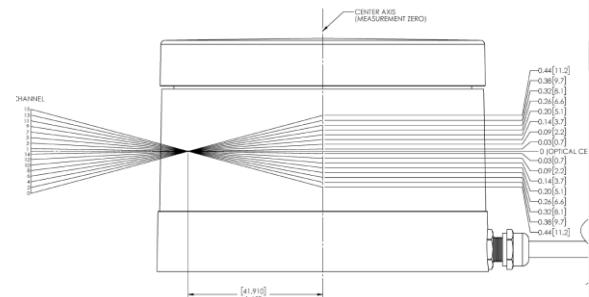
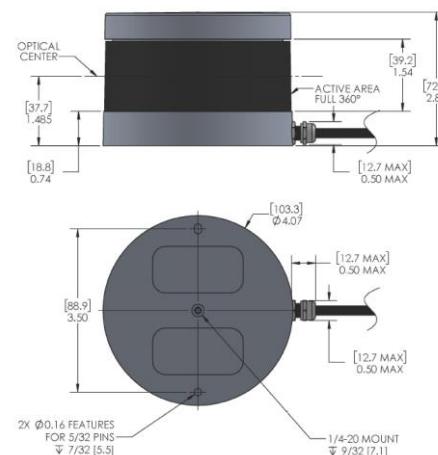
microstrain.com

Räumlicher Bezug zwischen den einzelnen Sensoren eines MSS: Absolut

- Methodik in Abhängigkeit des Sensors zu wählen
 - Verwendung von technischen Zeichnungen der Hersteller und Einmessung des Gehäuses



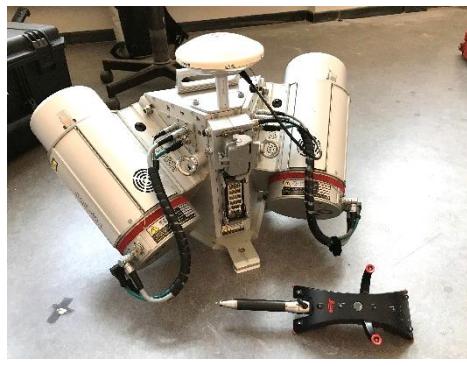
Einmessung des Gehäuses



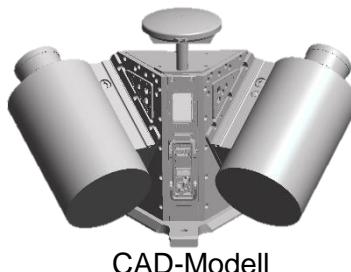
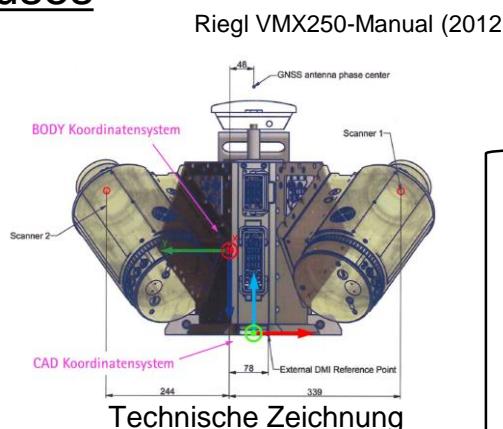
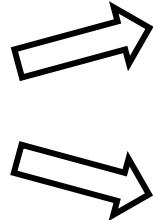
Technische Zeichnung

Räumlicher Bezug zwischen den einzelnen Sensoren eines MSS: Absolut

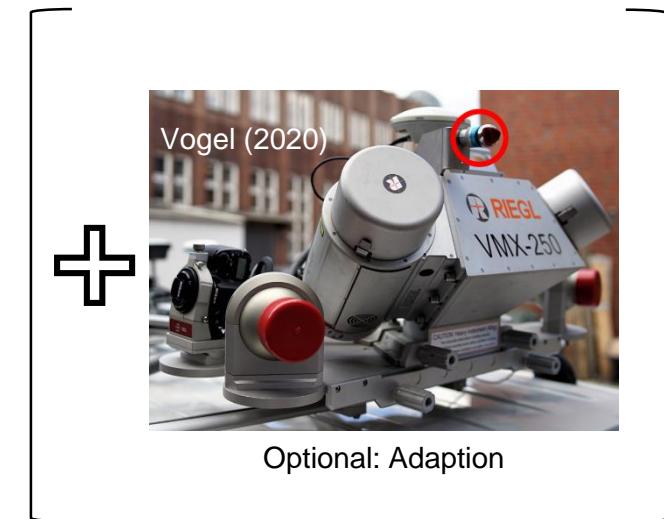
- Methodik in Abhängigkeit des Sensors zu wählen
 - Verwendung von technischen Zeichnungen der Hersteller und Einmessung des Gehäuses



Einmessung des Gehäuses



Multi-Sensor-Systeme



Räumlicher Bezug zu einem weiteren/übergeordnetem Koordinatensystem:

- (Geo-)Referenzierung zu Raum- oder Weltkoordinatensystem



Räumlicher Bezug zu einem weiteren/übergeordnetem Koordinatensystem:

- Zwischen mehreren Plattformen
→ Verknüpfung über bekannte Punkte aus der jeweiligen Plattformkalibrierung



Räumlicher Bezug zu einem weiteren/übergeordnetem Koordinatensystem:

- Zu einem Fahrzeugkoordinatensystem
 - Messung markanter Punkte mit Bezug zum Plattformkoordinatensystem (ggf. Fahrzeugkoordinatensystem vom Autohersteller (Radachsen etc.))



icsens (2020)



Sören Vogel (12-2022)

Multi-Sensor-Systeme

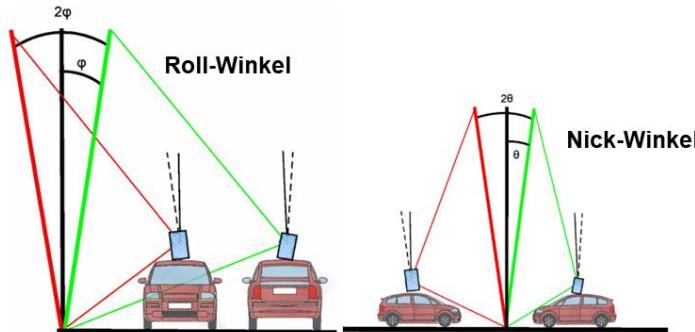
Vogel (2020)



- Als Systemkalibrierung während des eigentlichen Messprozesses zu verstehen
- Vergleich abgeleiteter Größen (i.d.R. Zielgrößen; z.B. Koordinaten) mit Referenzwerten

Beispiele:

- Pose zusammen mit Kalibrierparametern schätzen (z.B. LS-Kalibrierung über das Ebenenverfahren)
- Punktwolkenmatching (LS \leftrightarrow LS, LS \leftrightarrow Kamera)
- Kalibrierparameter direkt aus der Punktwolke bestimmen



Keller & Sternberg (2013)

Vorteile:

- Sehr effiziente Lösung, da quasi vollständiger Verzicht auf zusätzliche Kalibriermessungen
- Berücksichtigung der Situation Vor-Ort

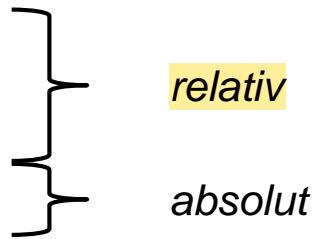
Nachteile:

- i.A. (mathematisch) sehr komplexe Kalibrierroutinen
- Schwere Trennung/Zuordnung einzelner Kalibrierparameter auf die Messgrößen
- Vorgehensweise muss nicht zwingend repräsentativ für Anwendungen sein
- Vielfach angewendet aber nachteilig hinsichtlich der Integrität

Mehrere Gegebenheiten können u.U. Einfluss auf die Qualität der Kalibrierparameter haben

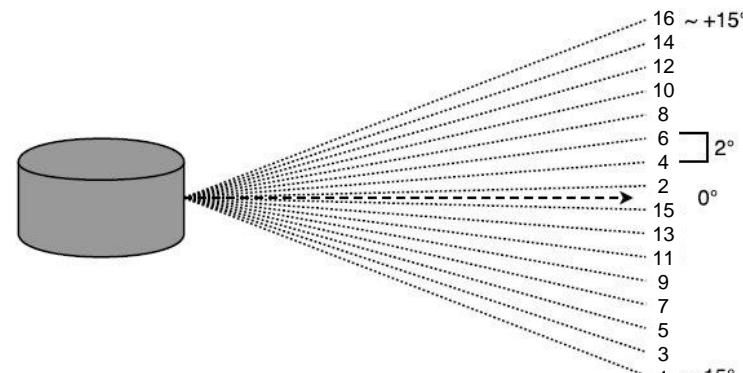
- **Temperatureffekte** (z.B. hinsichtlich Ausdehnung)
- Cross-sensitivity (Ausschlag in x-Richtung beeinflusst bspw. auch Ausschlag in y-Richtung)
- Messvolumen nicht charakteristisch im Hinblick auf die spätere Anwendung
- Vibrationen während der Kalibrierung oder während der Messung
- **Zeitliche Stabilität sämtlicher Kalibrierparameter**
- Einfluss von Hebelarme
- **Unterscheidung** zwischen Präzision und Genauigkeit/Richtigkeit
 精确

- **Komponentenkalibrierung**
 - Kalibrierung und Stabilitätsanalyse eines Laserscanners
 - „Warm-up“-Effekt und Abweichung zu einem Absolutinterferometer
- **Systemkalibrierung**
 - Kamera & IMU
 - Kamera & Laserscanner
 - Laserscanner
- **Selbstkalibrierung**
 - Automatische Kalibrierung von (multiplen) Laserscannern auf Basis ebener Merkmale in strukturierten Umgebungen
- **Konfigurationsanalyse** 配置分析
 - Für Ebenen-basierte Laserscanner-Kalibrierung



Untersuchung der Langzeitstabilität, geometrische Kalibrierung und Einfluss von Temperaturänderungen

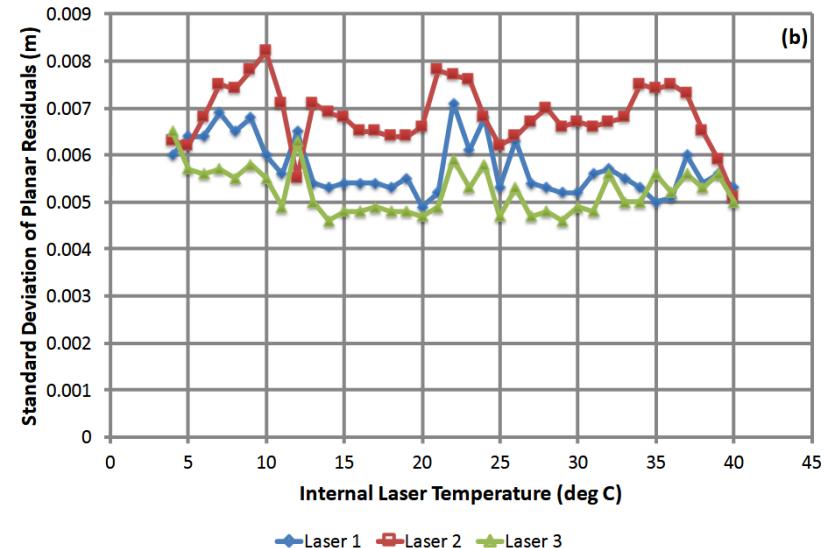
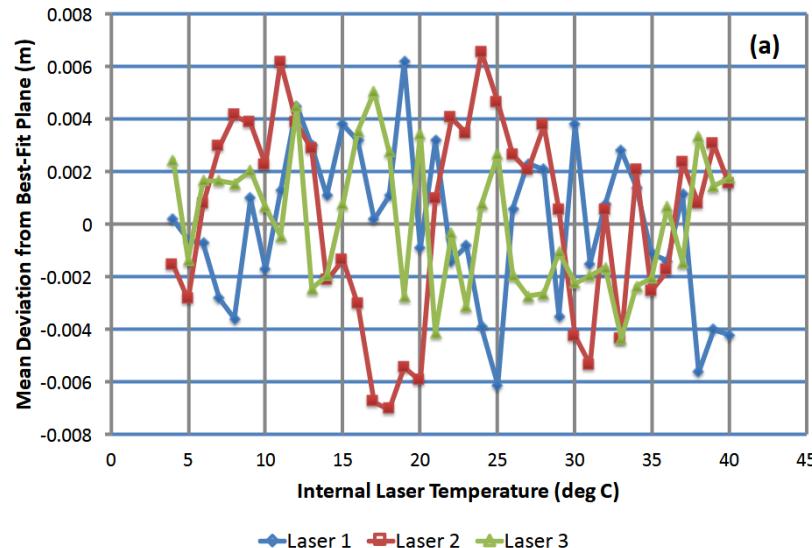
- Verwendung dreier Velodyne VLP-16 Sensoren für allgemeinere Aussage
 - Vergleichbare Ergebnisse für alle drei Sensoren
- Temperaturbereich von 0 bis 40°C
- Betrachtung einzelner Laserstrahlen
 - 2° Inkrement der einzelnen Laserstrahlen innerhalb des 30° FoV



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

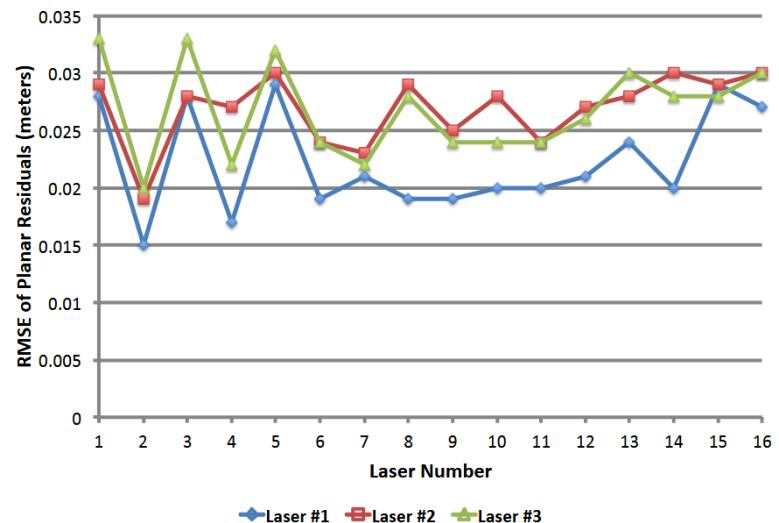
Glennie et al. (2016)

Geometrische Kalibrierung

- Innere Parameter laut Hersteller:
 - Horizontale & Vertikale Rotationskorrektion
 - 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

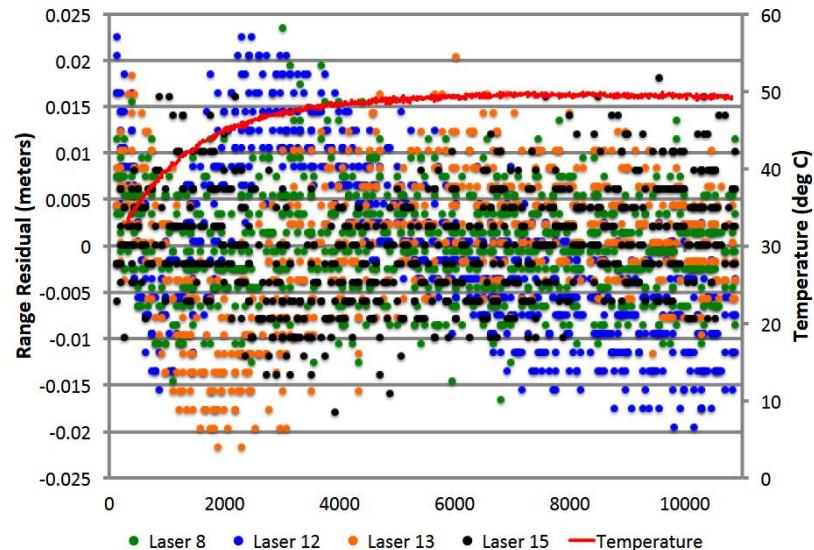
}

hoch korreliert



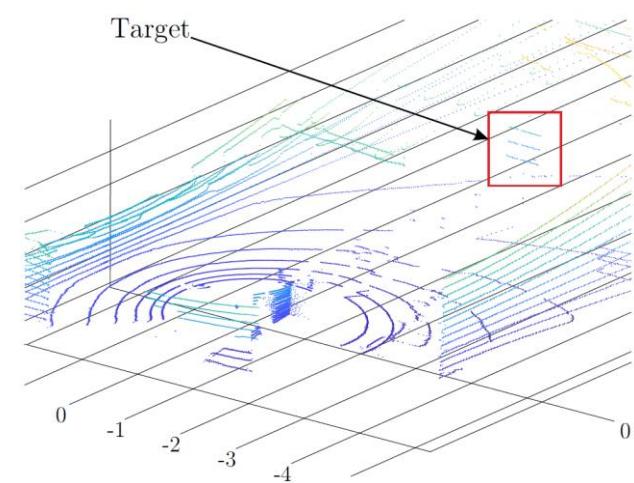
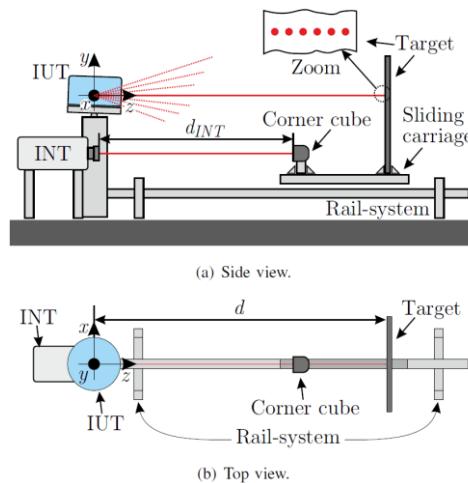
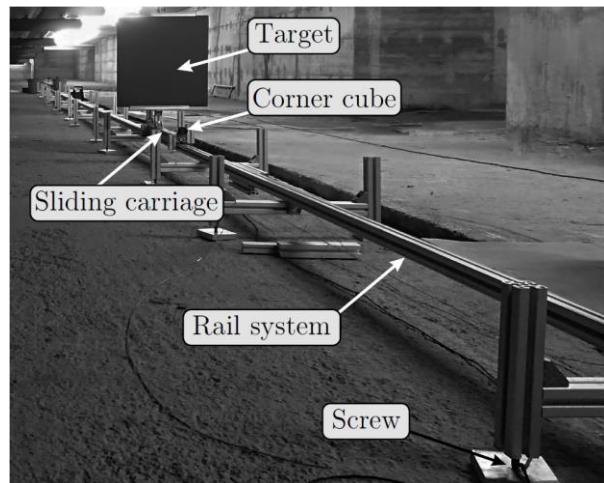
Langzeitstabilität

- 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)



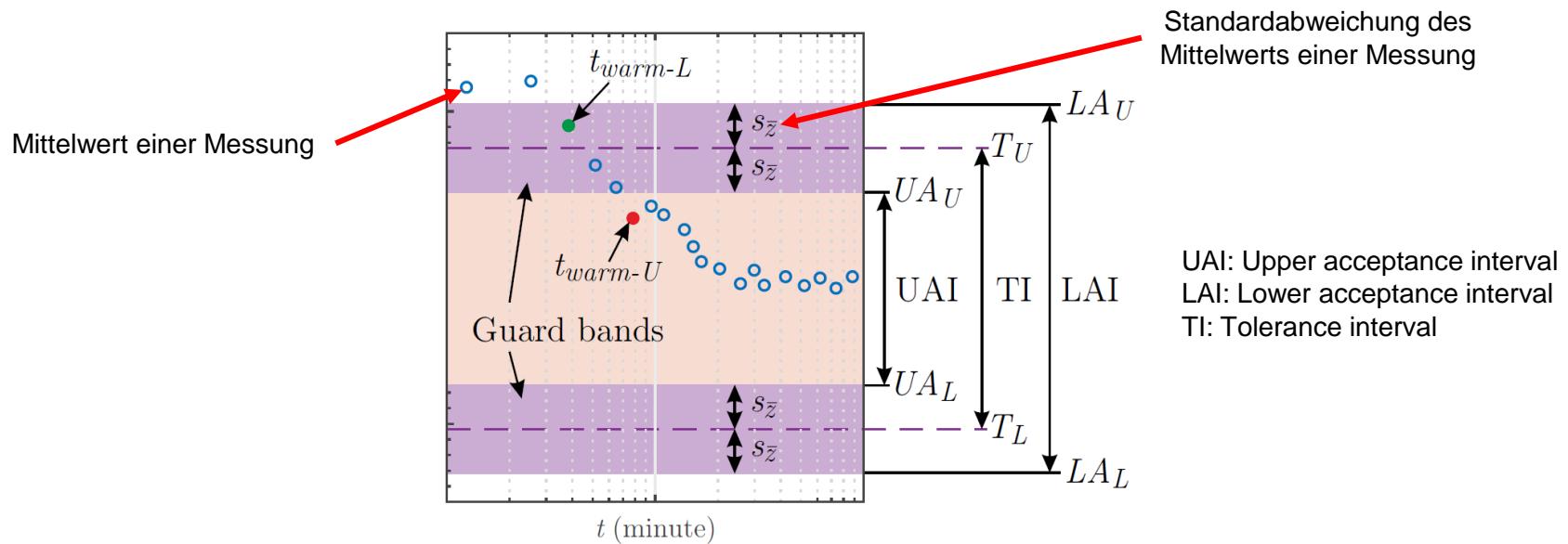
Langzeitstabilität für einen Zeitraum von 12 Stunden

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



Cattini et al. (2020)

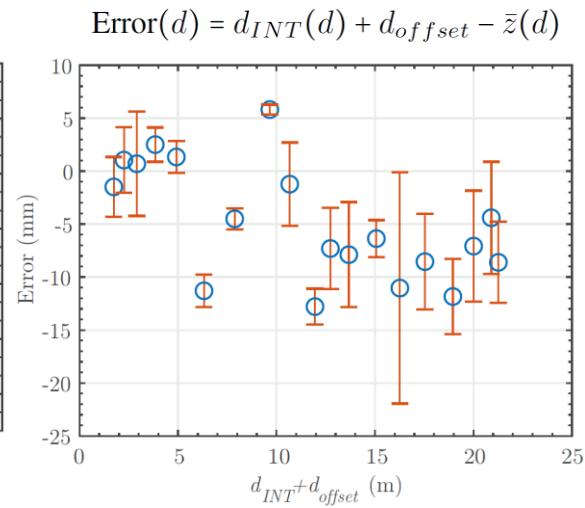
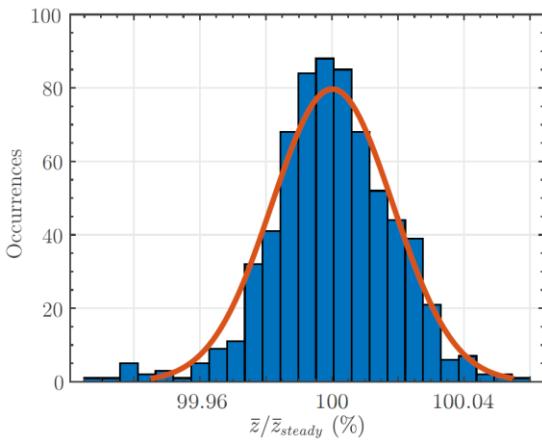
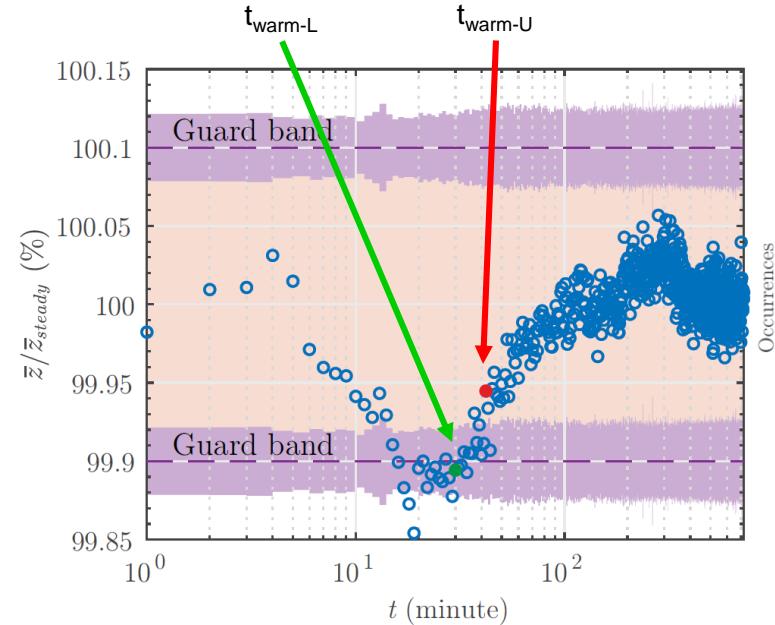
- Der „warm-up“-Effekt wird als die benötigte Zeit definiert, welche es benötigt, damit die Messwerte innerhalb eines gewissen Toleranzbereiches (untere T_L und obere T_U Grenze) bleiben



Cattini et al. (2020)

Langzeitstabilität

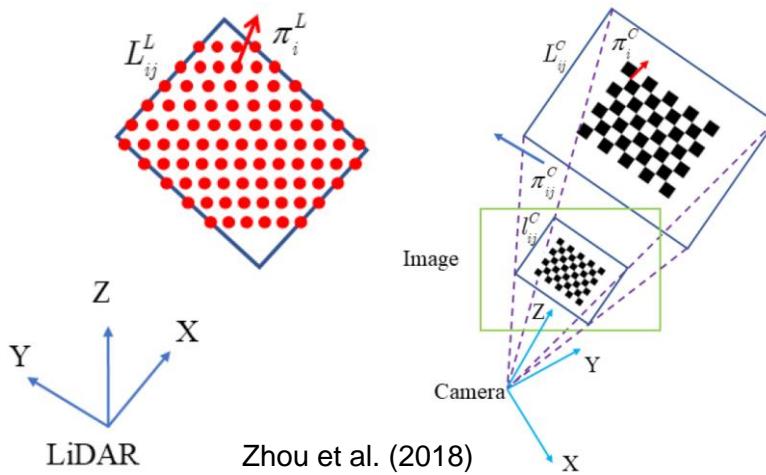
- $t_{\text{warm-L}}$ nach 30 min und $t_{\text{warm-U}}$ nach 42 min erreicht
- Histogramm der Distanzen nach dem warm-up beschreiben Normalverteilung
- Abweichungen zur Referenz im mm nach warm-up für bis zu 21 m



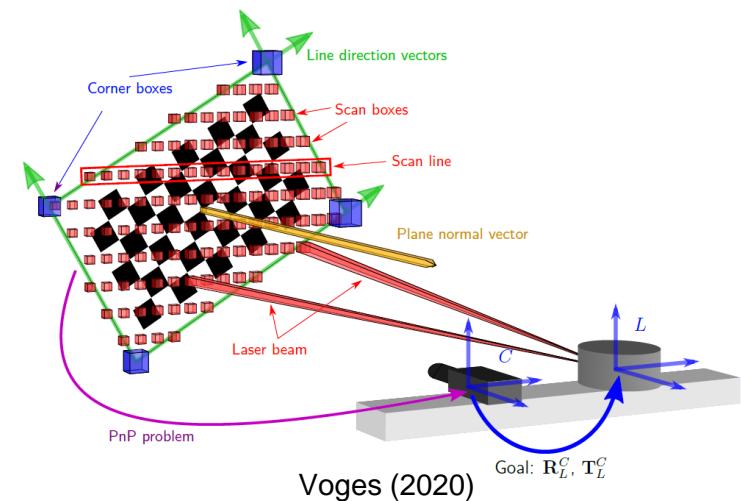
Bestimmung der 6-DoF Transformationsparameter zwischen Kamera und Laserscanner mittels eines Schachbretts

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

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

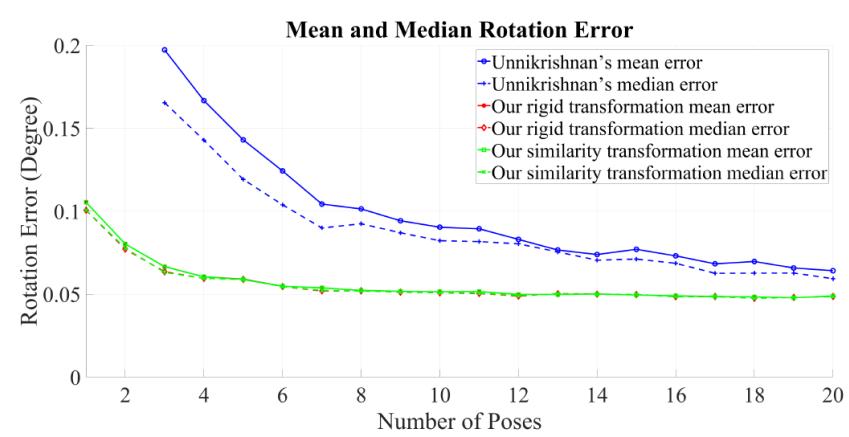
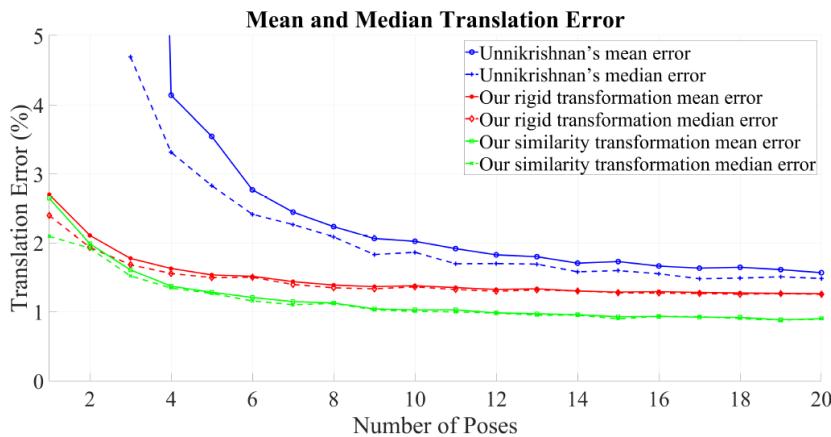
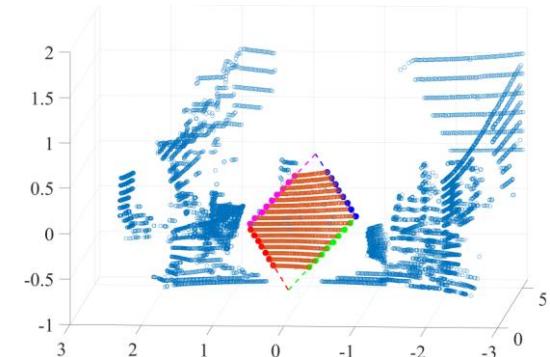
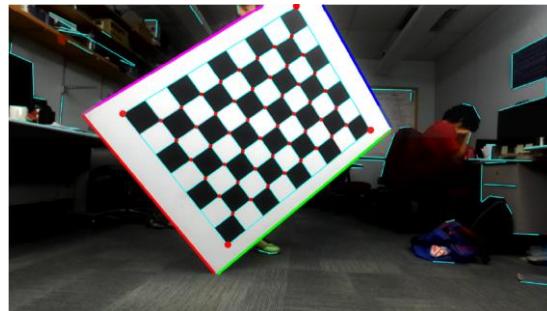
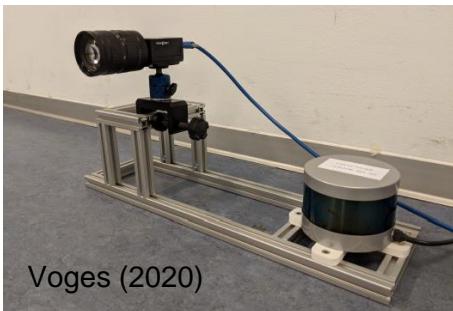


Zhou et al. (2018)



Voges (2020)

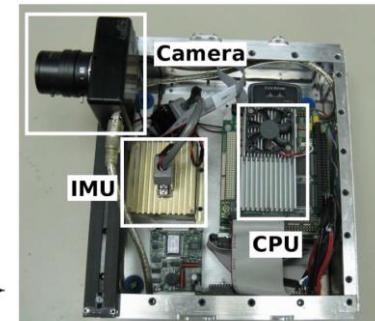
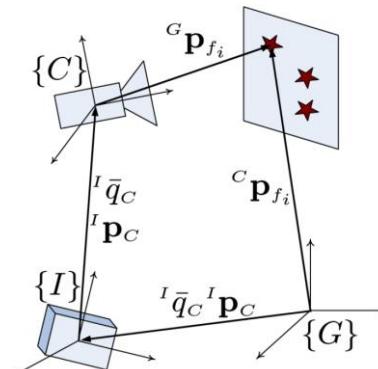
- Erfassung von 32 Posen mit jeweiligen Punktwolken (Velodyne VLP-16) und Kamerabildern



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)

有计划的实施

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

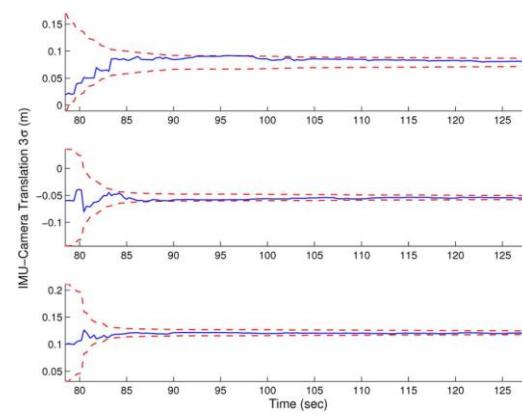
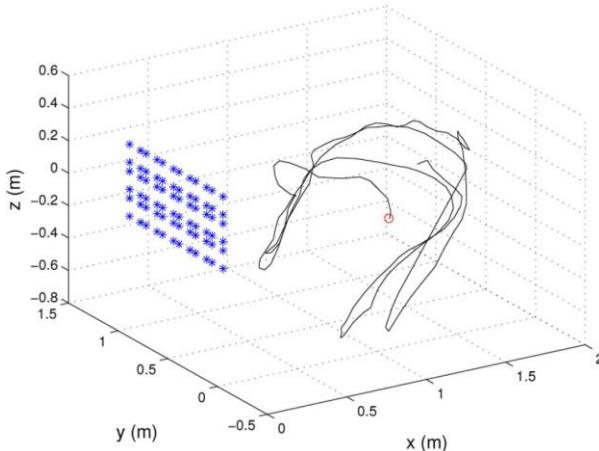
$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \text{Quaternion G zu I} \\ \mathbf{b}_g^T \\ \text{Bias}_{\text{Gyro}} \\ {}^G \mathbf{v}_I^T \\ \mathbf{b}_a^T \\ \text{Bias}_{\text{Acc}} \\ {}^G \mathbf{p}_I^T \\ {}^I \bar{\mathbf{q}}_C^T \\ {}^I \mathbf{p}_C^T \end{bmatrix}^T$$

Geschwindigkeit Position I Position C

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

Mirzaei and Roumeliotis (2008)

Wir freuen uns über wichtiges Feedback und hilfreiche Anregungen, damit wir uns weiter verbessern können. Die Evaluation ist daher auch für Sie und Ihre nachfolgenden Kommilitonen*innen sehr wichtig.

Vielen Dank 😊

