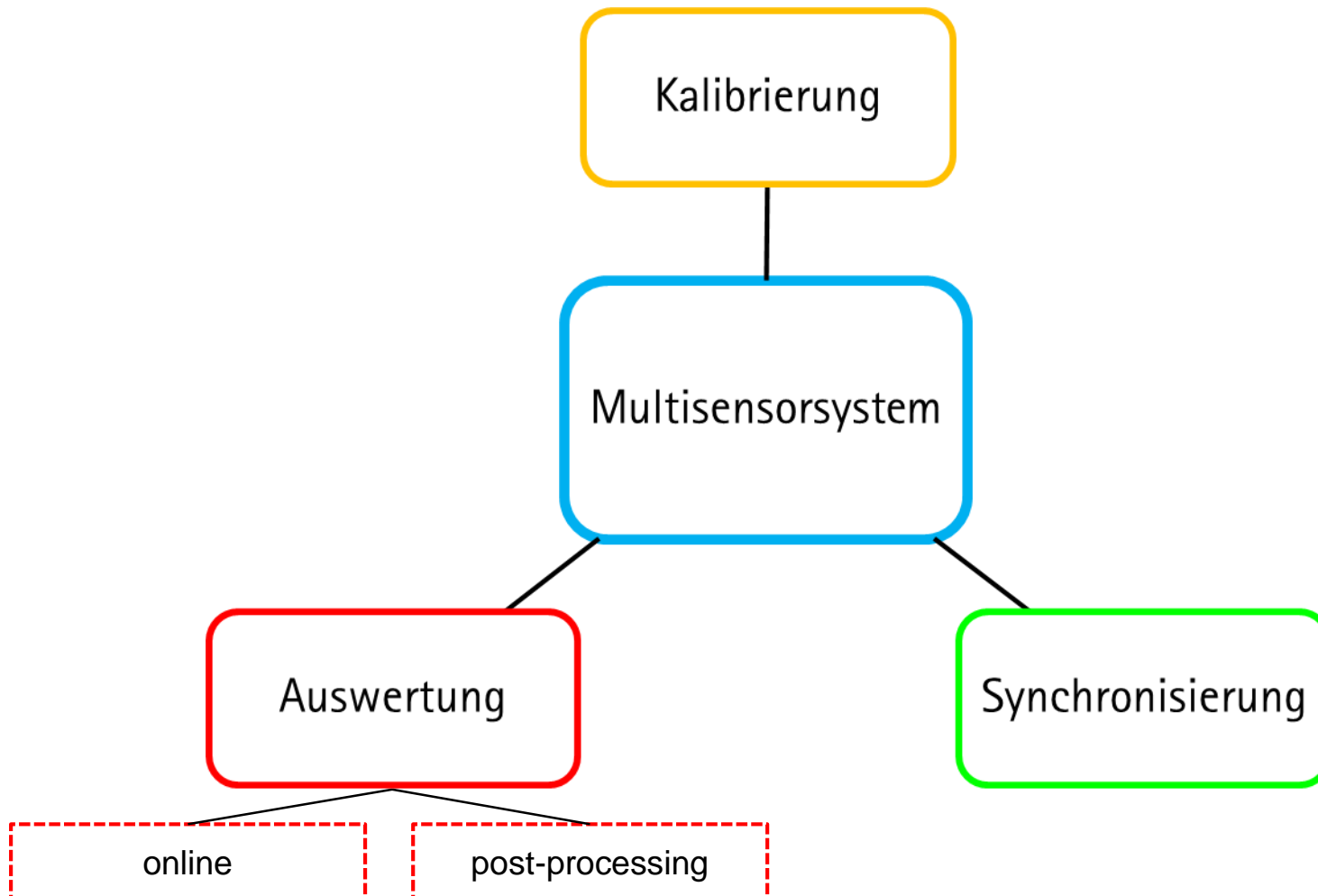


Multi-Sensor-Systeme

Grundlegende Auswertestrategien und Post-processing

Wintersemester 2022/2023

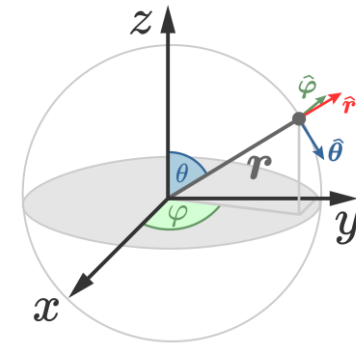
Dr.-Ing. Sören Vogel



In Abhängigkeit der jeweiligen Projekt- / Messaufgabe:

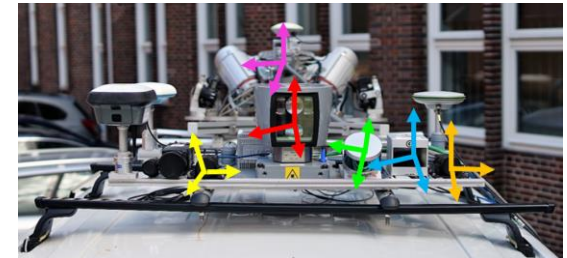
- (Weiter)Verarbeitung der originären Beobachtungsgrößen
- Detektion und Eliminierung von Ausreißern & Messrauschen
- Anbringung von statischen / kinematischen Transformationsparametern
 - z.B. (Geo)referenzierung, Registrierung
- Detektion, Segmentierung und Klassifizierung von (geometrischen) Objekten / Merkmalen in Punktwolken und Bildern
- Berechnung / Bereitstellung abgeleiteter Produkte
 - z.B. 3D Modelle / Visualisierungen der Umgebung
- Qualitätsanalyse
- Validierung des Messsystems
- ...

Transformation zu kartesischen Koordinaten



Alexander Fufaeu, 2020

Transformation mit statischen Kalibrierparametern

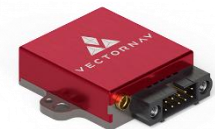


Vogel (2020)

Transformation mit Posen-Parametern zum Zeitpunkt k

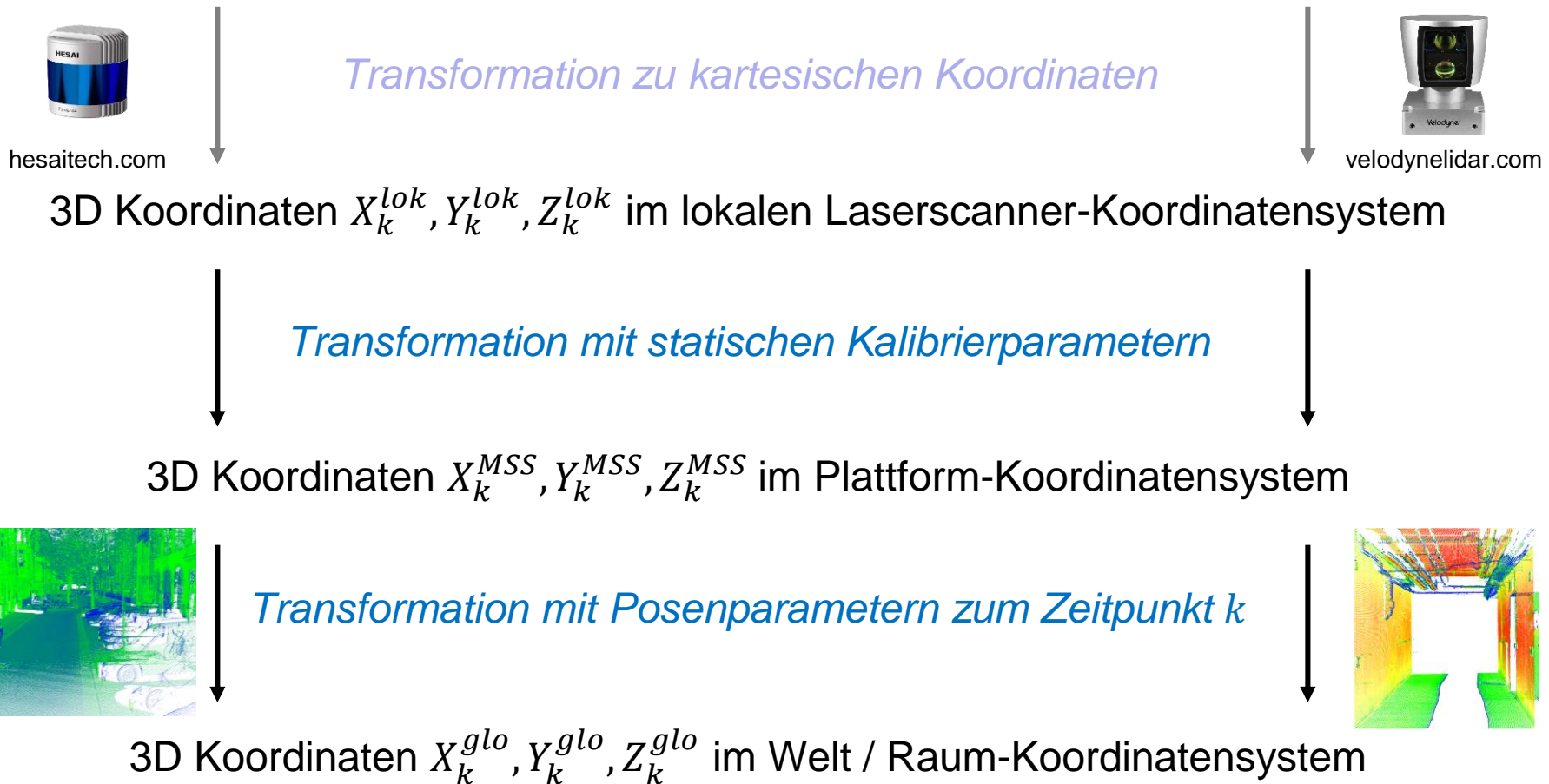


leica-geosystems.com



vectornav.com

Polarelemente d_k, φ_k und θ_k einer Laserscanner-Messung zum Zeitpunkt k



Polarelemente d_k, φ_k und θ_k einer Laserscanner-Messung zum Zeitpunkt k



3D Koordinaten $X_k^{lok}, Y_k^{lok}, Z_k^{lok}$ im lokalen Laserscanner-Koordinatensystem

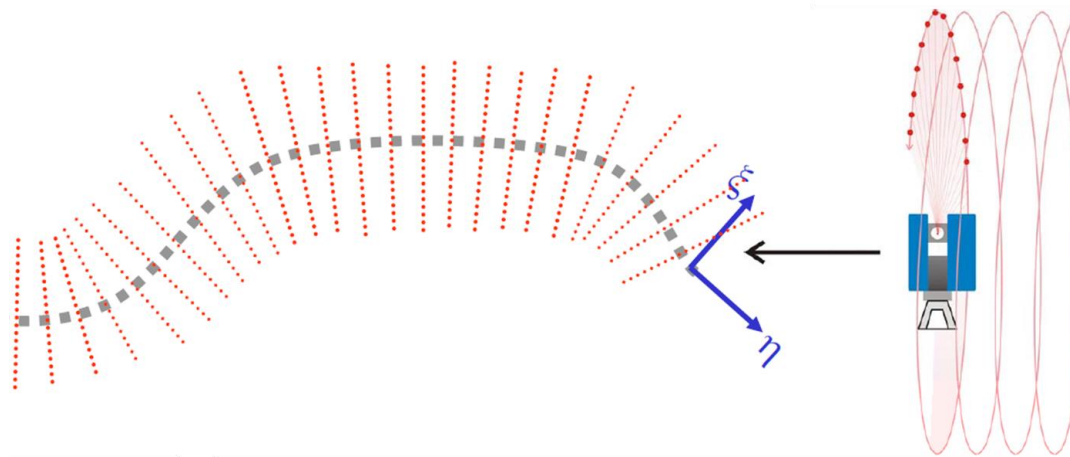


3D Koordinaten $X_k^{MSS}, Y_k^{MSS}, Z_k^{MSS}$ im Plattform-Koordinatensystem



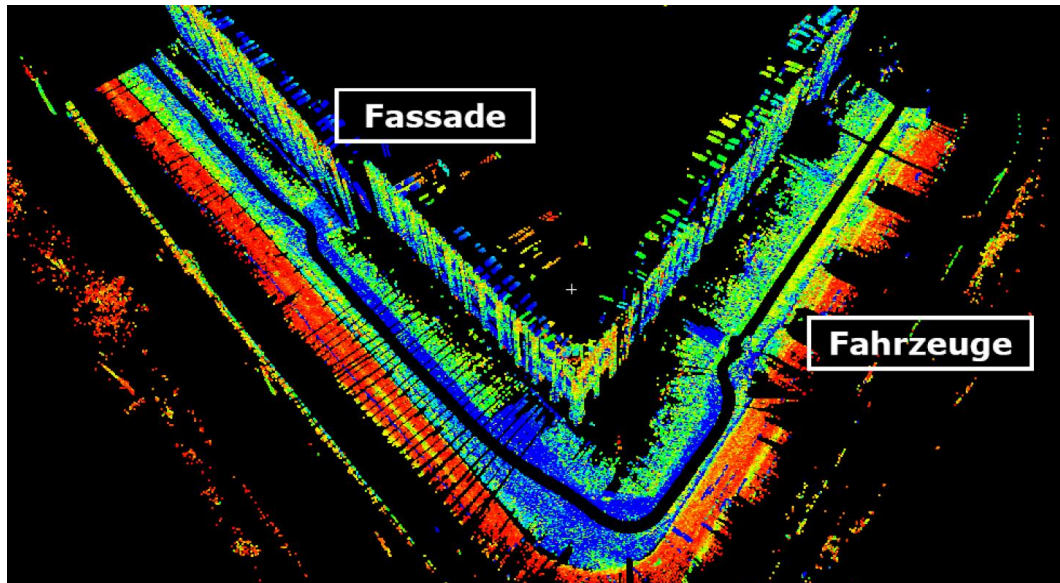
3D Koordinaten $X_k^{glo}, Y_k^{glo}, Z_k^{glo}$ im Welt / Raum-Koordinatensystem

**Lokales Sensor-
Koordinatensystem**



Hesse & Neumann (2007)

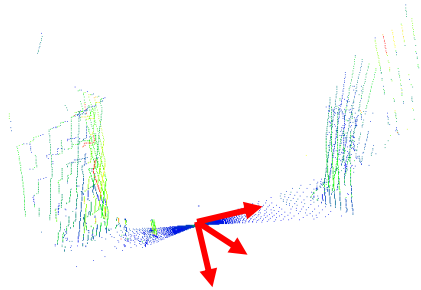
**Globales Welt-
Koordinatensystem**



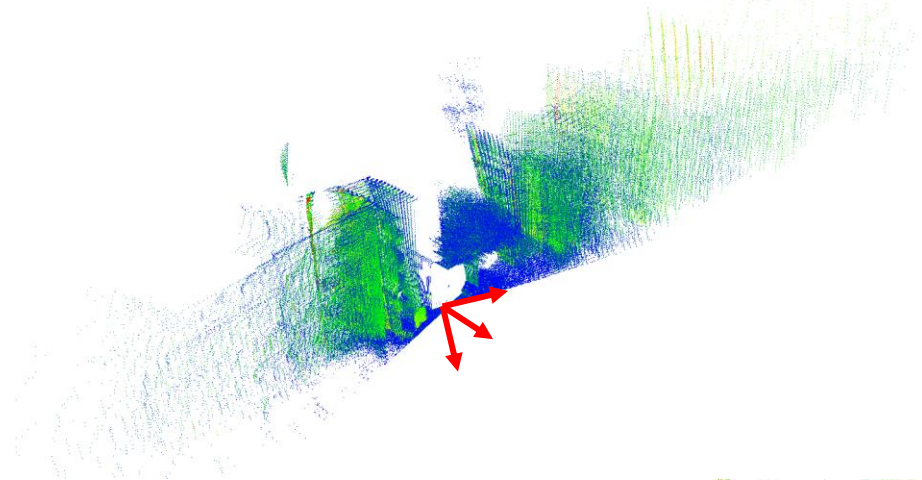
Hesse & Neumann (2007)

Lokales Sensor-
Koordinatensystem

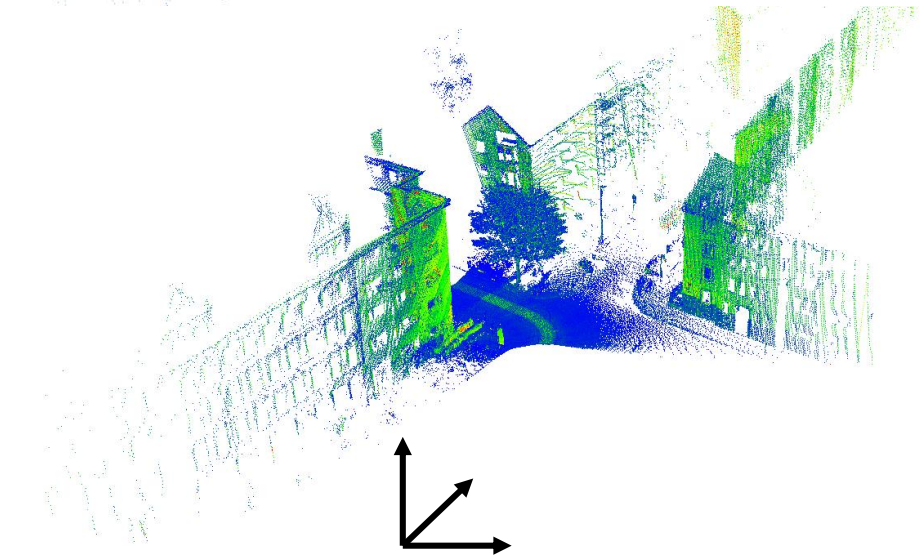
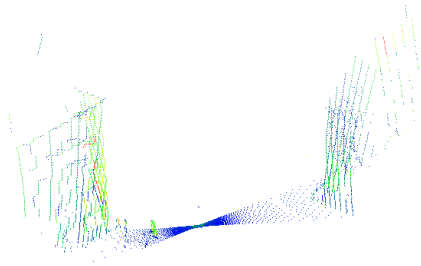
Epoche $k = 1$

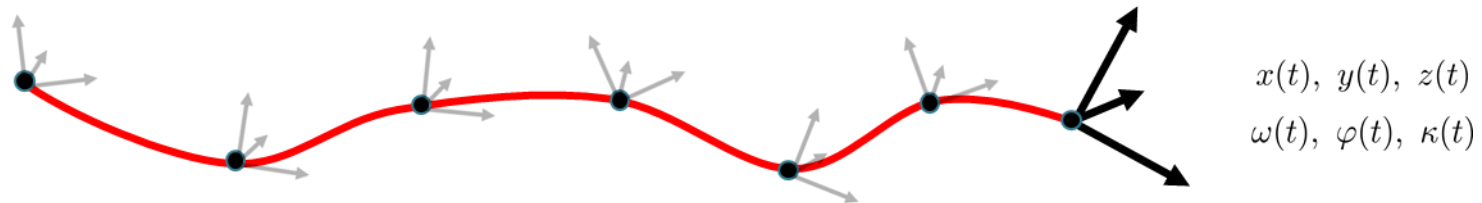


Epoche $k = 1:100$



Globales Welt-
Koordinatensystem





3D Helmert-Transformation

$$[x_{\text{glo}}, y_{\text{glo}}, z_{\text{glo}}]^T = \underbrace{[t_x, t_y, t_z]^T}_{\text{3D Position}} + \underbrace{\mathbf{R}(\omega, \phi, \kappa)}_{\text{3D Orientierung}} \cdot [x_{\text{lok}}, y_{\text{lok}}, z_{\text{lok}}]^T$$

$\mathbf{R}_{3 \times 3} = \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{R}_\phi \cdot \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$

- Skalierung oft nicht beachtet → abhängig von Ausdehnung des Messgebiets und Anforderungen
- Verwendung von Rotationsmatrizen, Quaternionen oder Eulerwinkeln
- Oft eine Verkettung von mehreren Transformationen

$$P_{XYZ}^{\text{global}}(t_k) = T_{MSS}^{\text{global}}(t_k) \cdot T_{\text{lokal}}^{\text{MSS}}(t_k) \cdot P_{XYZ}^{\text{lokal}}(t_k)$$

Sensor-basiert



javad.com



vectornav.com

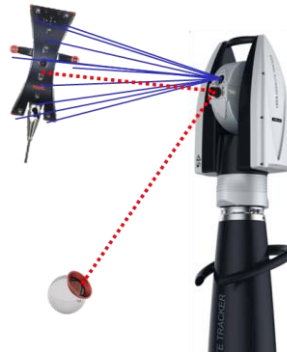


Frei (2014)

GNSS Antenne
Inertialesmesseinheit
Odometer

...

Tracking-basiert



leica-geosystems.com

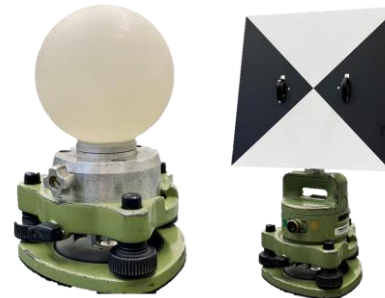


leica-geosystems.com

Tachymeter Lasertracker

...

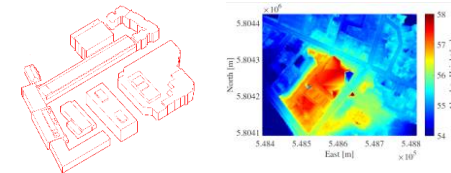
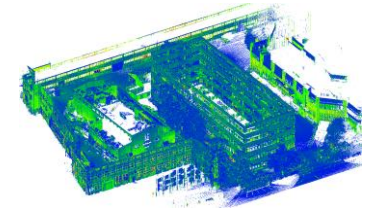
Zielzeichen-basiert



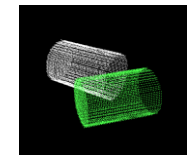
*Laserscanner
(Stereo) Kamera*

...

Daten-basiert



Vogel (2020)



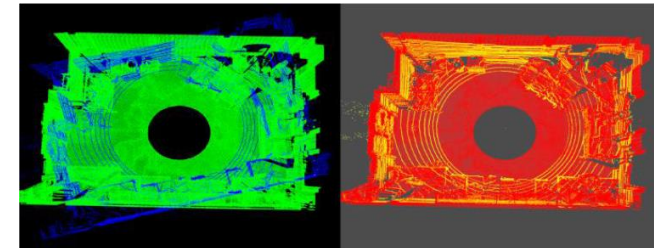
Michael Willet, 2016

Punktwolken
Digitale Gebäudemodelle
Digitale Geländemodelle
Oberflächenmodelle

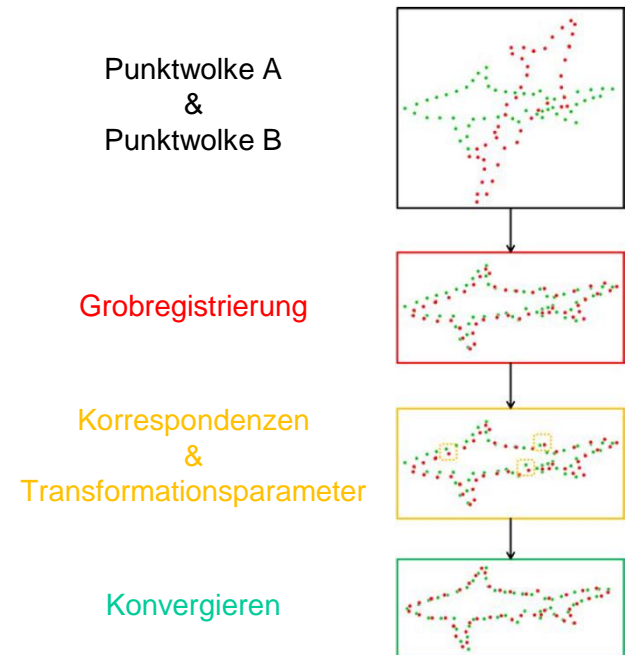
■ ■ ■

Iterative Closest Point (ICP)

- Ziel: Bestimmung von Transformationsparametern zwischen zwei Punktwolken auf Basis von bekannten oder automatisch detektierten Korrespondenzen
- Einflussgrößen:
 - Schwellwerte
 - Vergleichbare Punktdichte
 - Hinreichend genaue Startwerte
 - Zeitliche/räumliche Korrespondenz der beiden Punktwolken
 - Wahre Korrespondenzen existieren i.d.R. nicht, da nie exakt der selbe Punkt zweimal gemessen wird
 - Konvergieren kann in lokalem Minimum enden



Tazir et al. (2018)



Bearbeitet nach Wujanz (2016)

Bestimmung von Position und Orientierung (6 DoF) mit Bezug zu einem übergeordneten (erdfesten) Koordinatensystem in jeder Epoche k

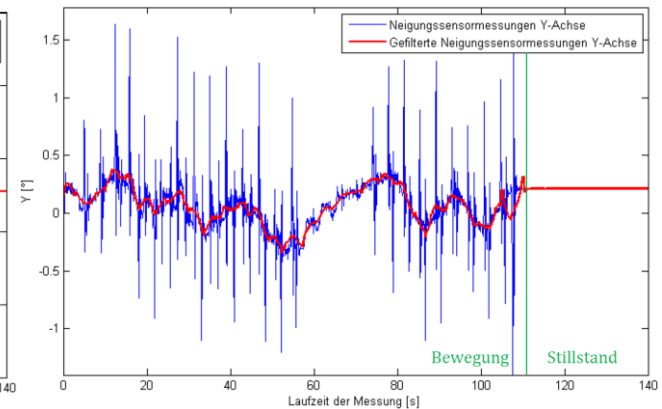
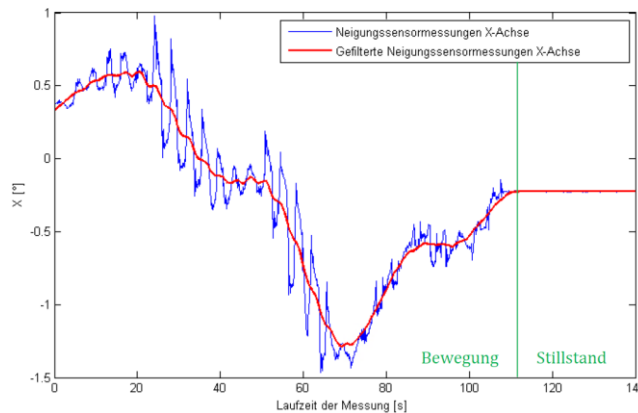
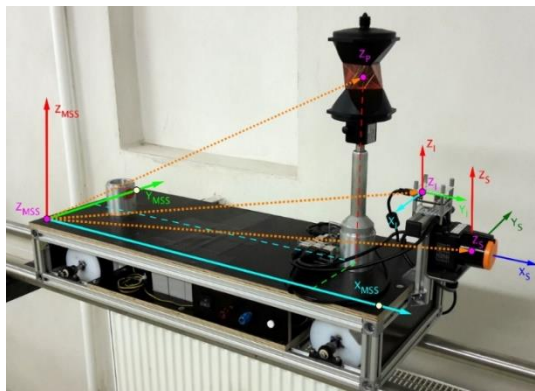
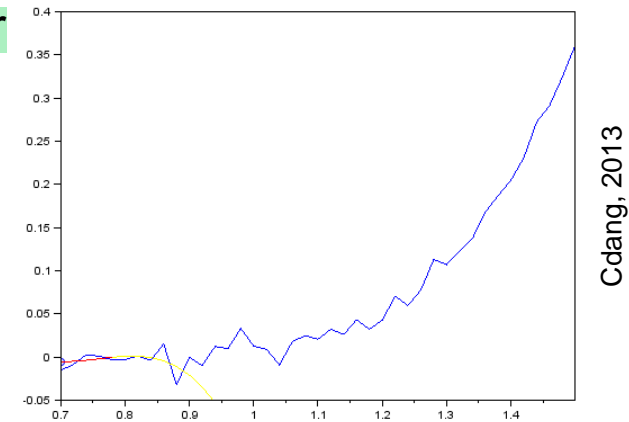
Unterschiede der einzelnen Vorgehensweisen / Strategien hinsichtlich

- Qualität
- Zuverlässigkeit
- Aufwand (Realisierung & Auswertung)
- Messkonfiguration
- Zugänglichkeit
- Redundanz
- Notwendigkeit von initialen Startwerten
- etc.

过滤
Zur Glättung von Messwerten mit einem Tiefpassfilter

低通滤波器

- Gleitender Mittelwert
- Savitzky-Golay-Filter im Zeitraum
→ Polynomiale Regression (hier 3. Grades) für fortlaufende Auswahl (variable Fensterbreite) an Messwerten

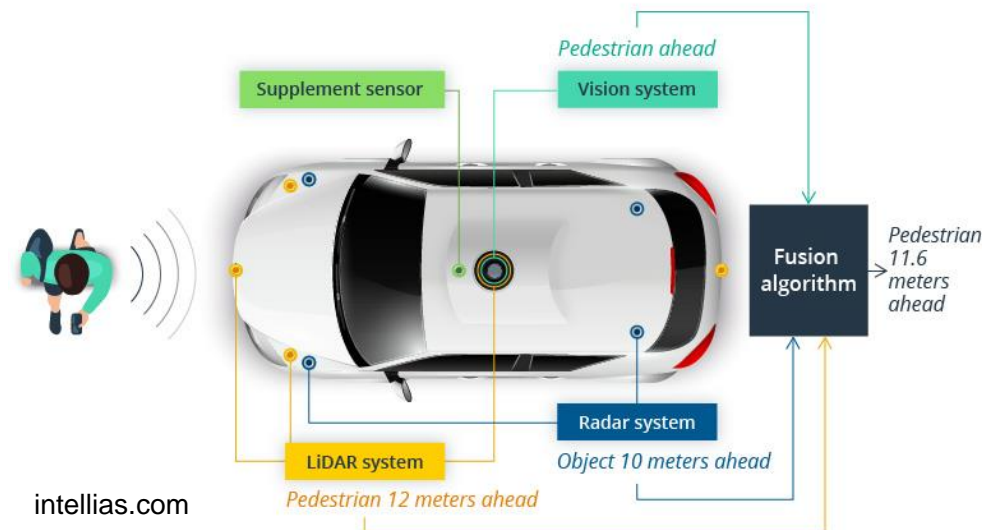


[ProSem @GIH, 2016]

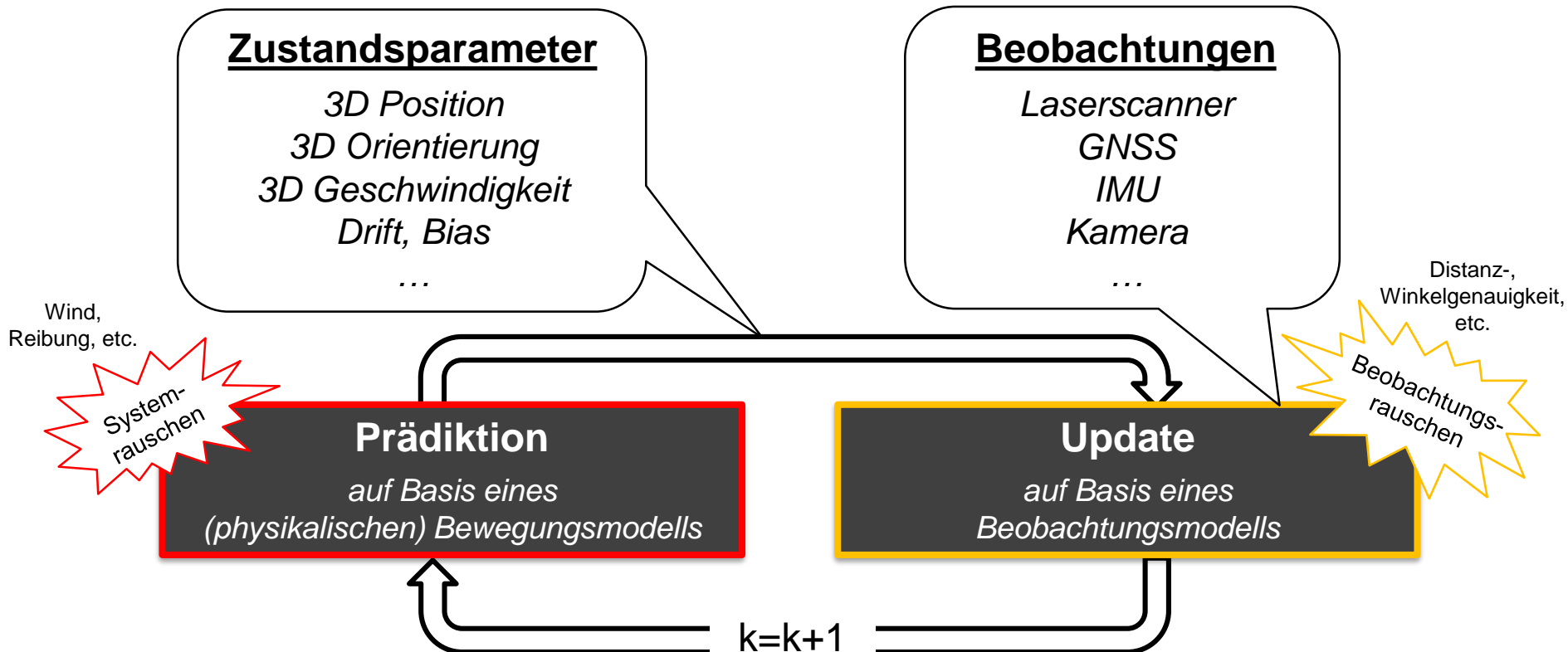
Zur (Geo)referenzierung mittels Kalman Filter zur Sensordatenfusion

- Ein Multi-Sensor-System erfasst stochastische Prozesse zeitgleich mit mehreren Sensoren für z.B. die
 - Lokalisierung und Umgebungserfassung eines autonomen Fahrzeugs per IMU, GNSS, Kamera, Laserscanner, Odometrie etc.

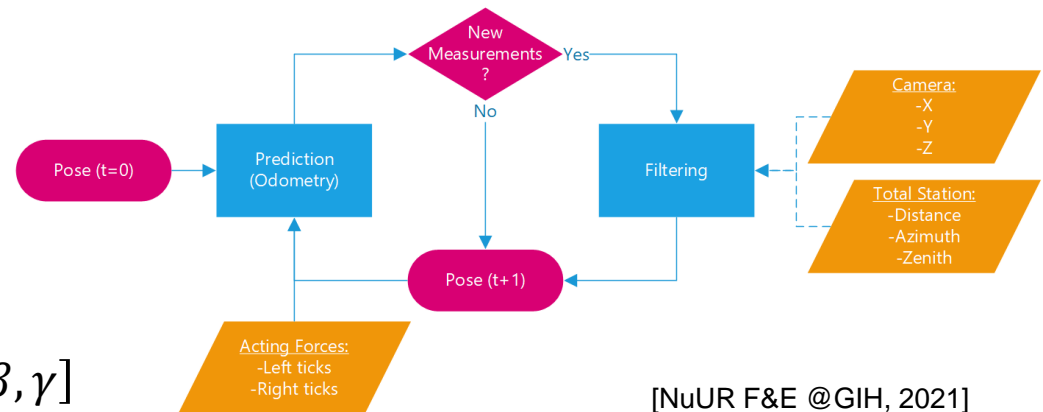
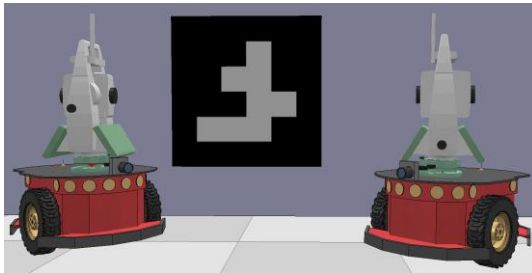
- Generelle Idee der Datenfusion:
 - Kombination der einzelnen Beobachtungsgrößen zur optimalen Schätzung der gesuchten Größen in einem (nichtlinearen) Filteransatz



Zur (Geo)referenzierung mittels *Kalman Filter*

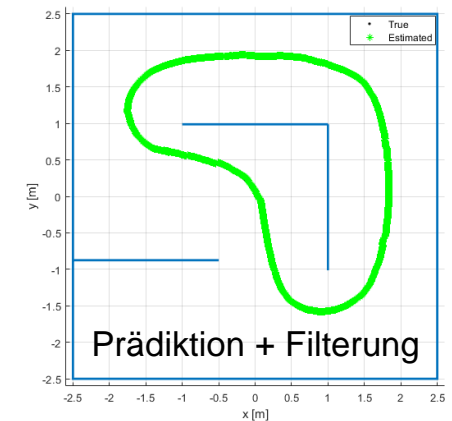
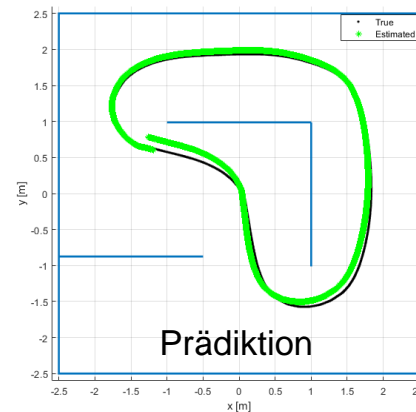
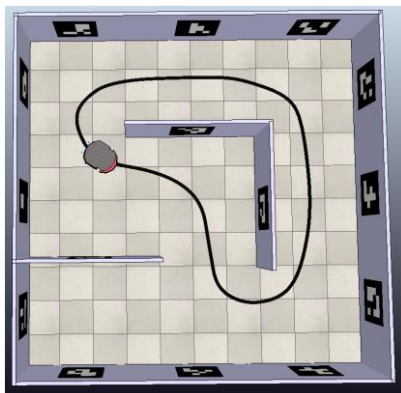


Zur (Geo)referenzierung mittels Kalman Filter

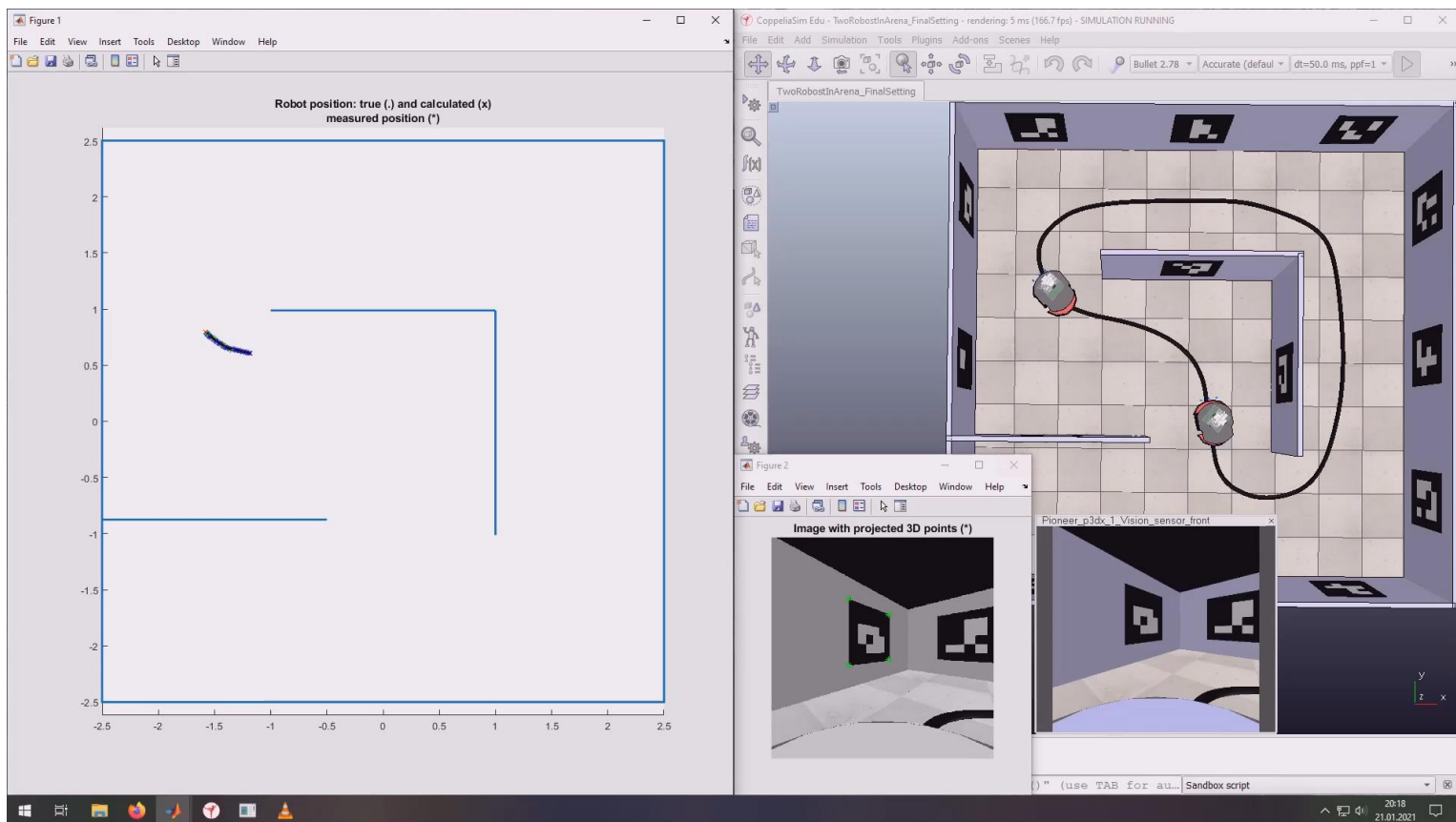


Pose des Roboters $[X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma]$

[NuUR F&E @GIH, 2021]



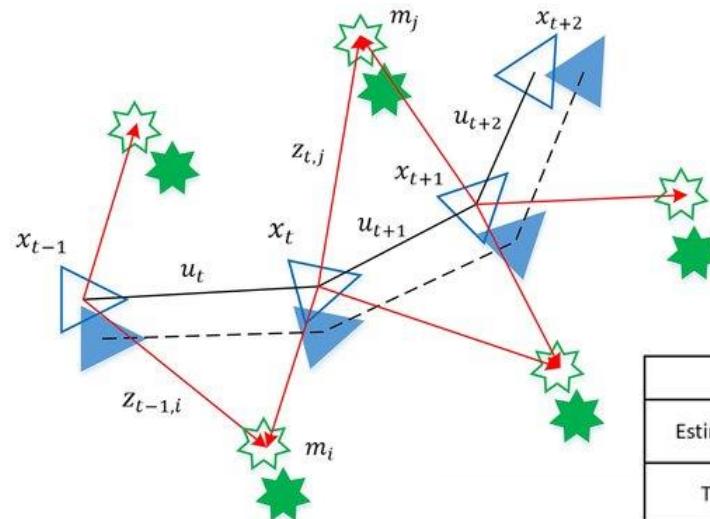
Zur (Geo)referenzierung mittels Kalman Filter







[NuUR F&E @GIH, 2021]

Zur (Geo)referenzierung mittels *Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)*

- Gleichzeitige (Geo)referenzierung eines Multisensorsystems und Erfassung einer unbekannten Umgebung (per Laserscanner / Kamera)
 - Herausforderung: beide Aufgaben bedingen sich eigentlich gegenseitig und Unsicherheiten wirken sich entsprechend aus

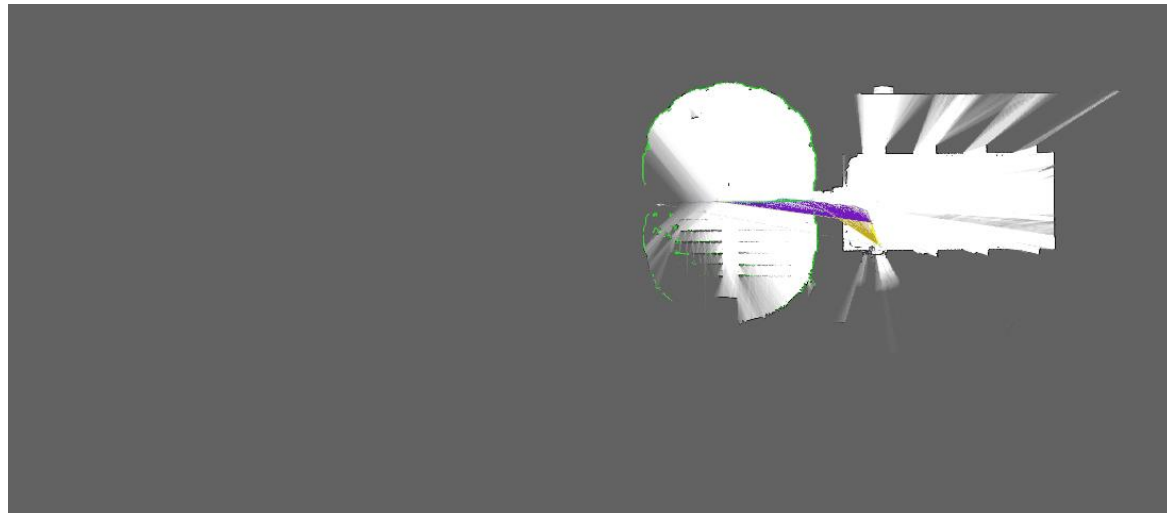


Lei et al. (2020)

	Robot	Landmark
Estimated		
True		

Zur (Geo)referenzierung mittels *Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)*

- Gleichzeitige (Geo)referenzierung eines Multisensorsystems und Erfassung einer unbekannten Umgebung (per Laserscanner / Kamera)
 - Herausforderung: beide Aufgaben bedingen sich eigentlich gegenseitig und Unsicherheiten wirken sich entsprechend aus

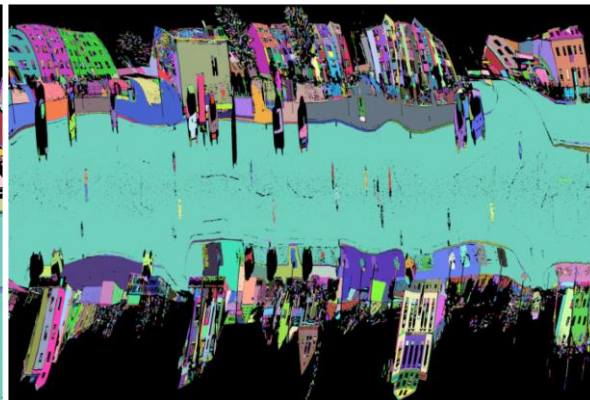
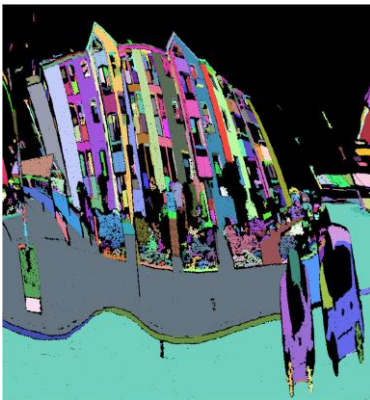


Zur (Geo)referenzierung mittels
Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)

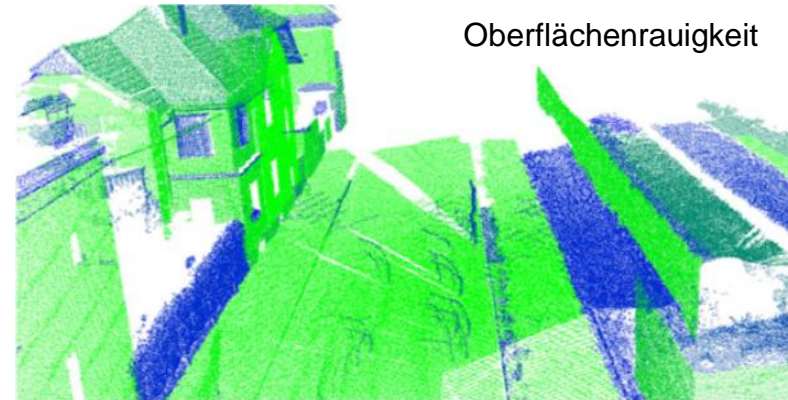
- Gleichzeitige (Geo)referenzierung eines Multisensorsystems und Erfassung einer unbekannten Umgebung (per Laserscanner / Kamera)
 - Herausforderung: beide Aufgaben bedingen sich eigentlich gegenseitig und Unsicherheiten wirken sich entsprechend aus
- Anwendung:
 - Autonome Exploration unbekannter Umgebungen ohne GNSS (Innenraum, Höhlen, Unterwasser)
 - Verwendung von Landmarken (markante Wände, Stangen, etc.)
 - Zusätzliche Integration von GNSS & IMU möglich aber nicht notwendig
 - Realisierung letztendlich auch auf Basis eines Kalman Filters

Automatische Identifikation und Gruppierung von Beobachtungselementen in disjunkte Teilmengen, welche ein gewisses Homogenitätskriterium erfüllen

- Wird auch auf Kamerabilder angewendet hier aber Fokus auf 3D Punktwolken eines Laserscanners
- Benachbarte Punkte beschreiben geometrische Primitive (z.B. Ebenen, Zylinder, Kugeln) und / oder weisen ähnliche Eigenschaften (z.B. Intensitäten, Farbinformationen, Rauigkeiten) auf



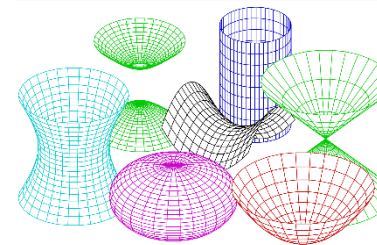
Brenner (2016)



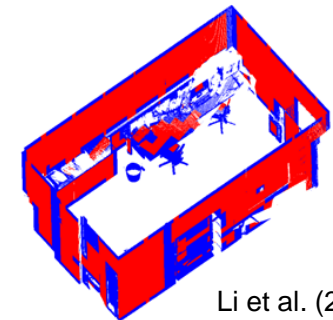
Dimitroc & Golparvar-Fard (2015)

Automatische Identifikation und Gruppierung von Beobachtungselementen in disjunkte Teilmengen, welche ein gewisses Homogenitätskriterium erfüllen

- Häufig Grundlage für nachfolgende Klassifizierung von Segmenten in Objektklassen und / oder die Extraktion von Merkmalen
- Vielzahl an unterschiedlichen Strategien/Ansätzen:
 - Kantenbasiert
 - Model fitting
 - Regionenbasiert
 - Bereichswachstum (Region Growing)
 - Random Sample Consensus (RANSAC)
 - Hough Transformation
 - Machine Learning

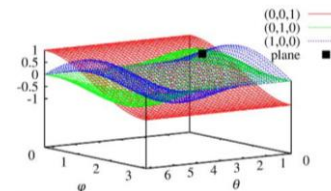
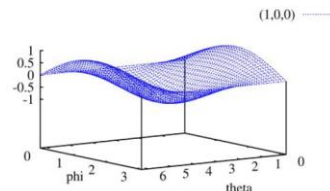
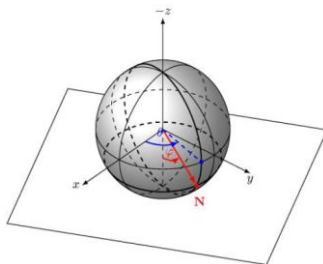


Ag2gaeh, 2015



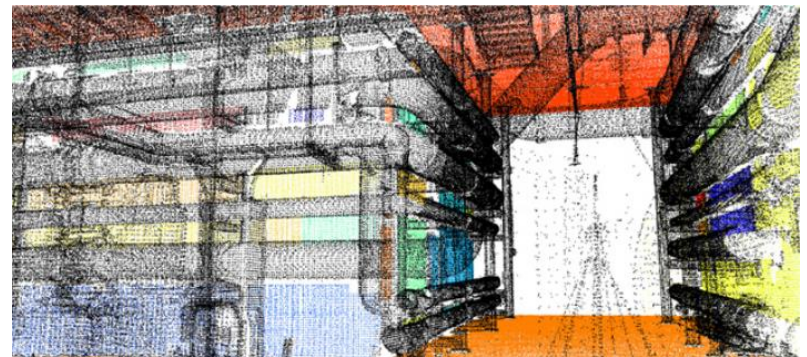
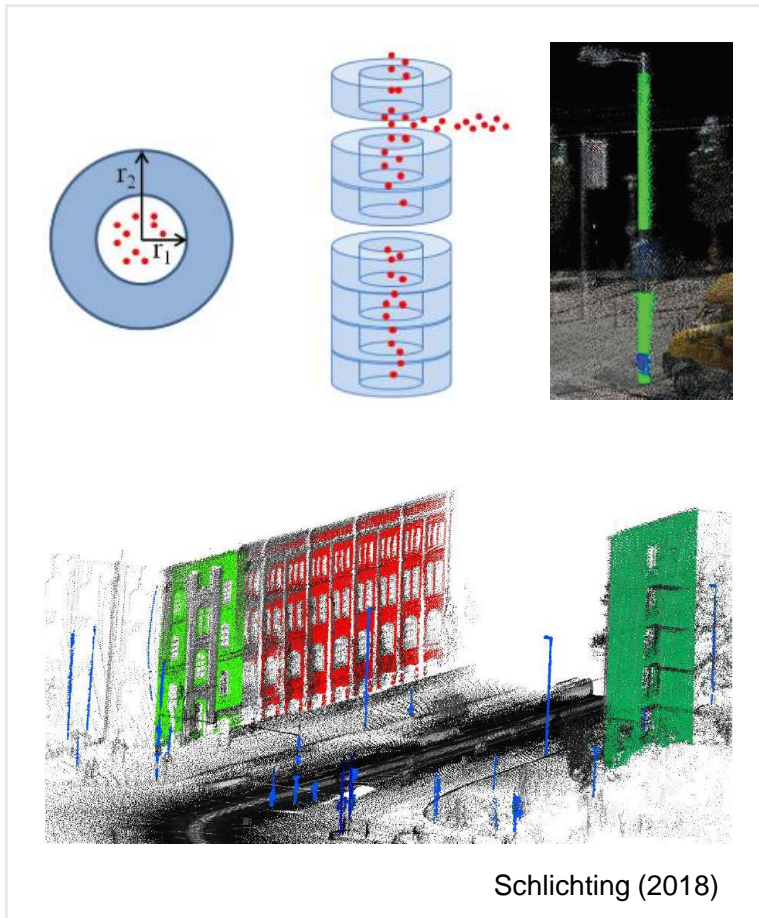
Li et al. (2017)

Bormann et al. (2011)



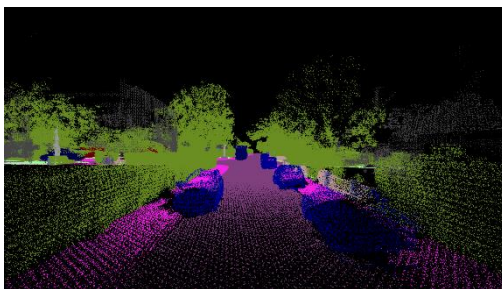
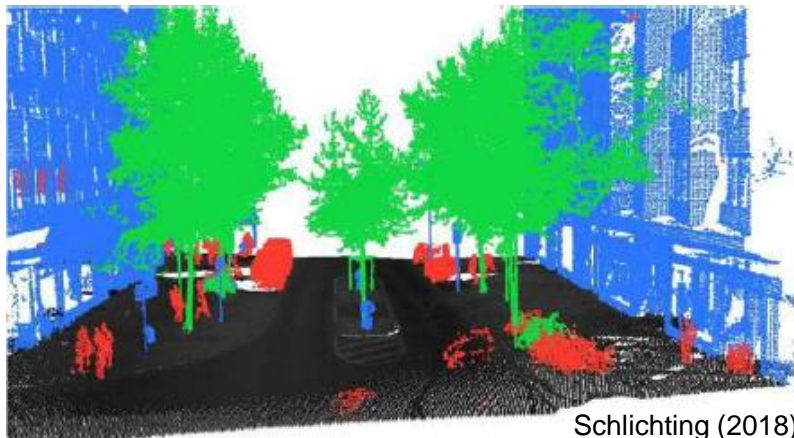
Vo et al. (2015)

Segmentierung stangenförmiger Objekte

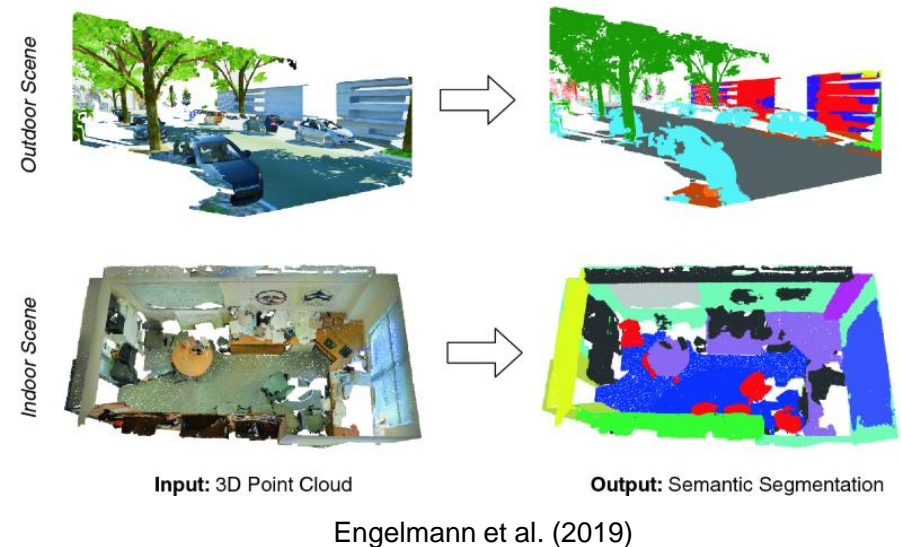


Dimitroc & Golparvar-Fard (2015)

Verwendung von Maschine / Deep Learning für detailliertere / intelligentere Interpretation und Klassifizierung (insbesondere für große Datenmengen)



<http://www.cvlibs.net/datasets/kitti-360>



„Ausreißer“ in den Messdaten

- generelles Messrauschen
- Störobjekte (z.B. Vegetation, Spiegelungen, Kantenmessungen)
- Bewegte Objekte (Fahrzeuge, Menschen, etc.)

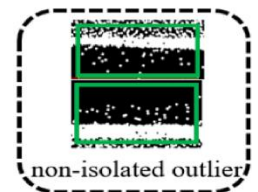
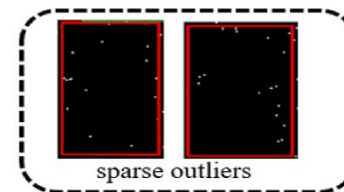
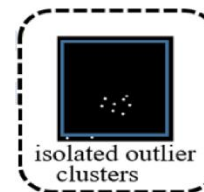
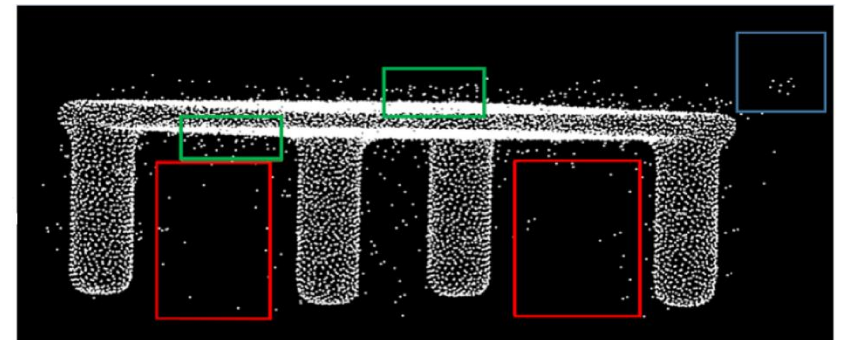
Detektion & Elimination auf Basis von

- Intensitätswerten
- Geometrischer Nachbarschaften
- Region Growing
- Robusten Schätzverfahren
- ...

Originäre Messwerte



Vorverarbeitete Messwerte



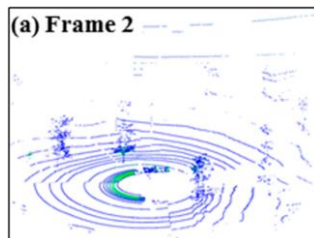
Ning et al. (2018)

Reduktion der Messdaten ohne relevanten Informationsverlust wegen z.B.

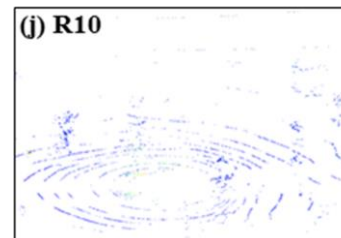
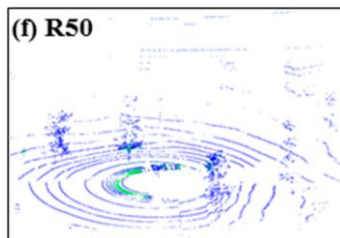
- ungleichmäßiger / inhomogener Punktverteilung
- zu großen Datenmengen \leftrightarrow zu hohen Laufzeiten
- Nicht relevante Sichtbereiche
 - z.B. unterhalb oder oberhalb eines gewissen Schwellwertes

→ Löschen von gemessenen Punkten

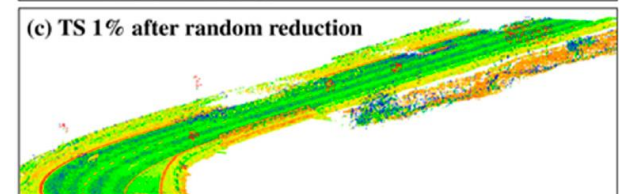
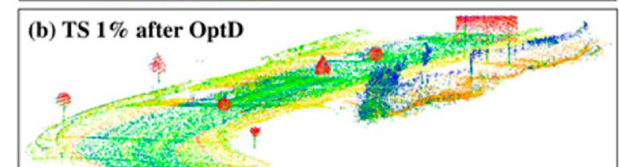
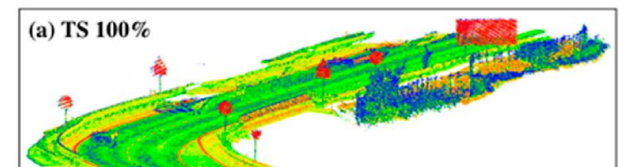
- Zufällig
- Voxelbasiert / Gleichabständig
- Geometriebasiert



Błaszczak-Bąk et al. (2018)



Multi-Sensor-Systeme

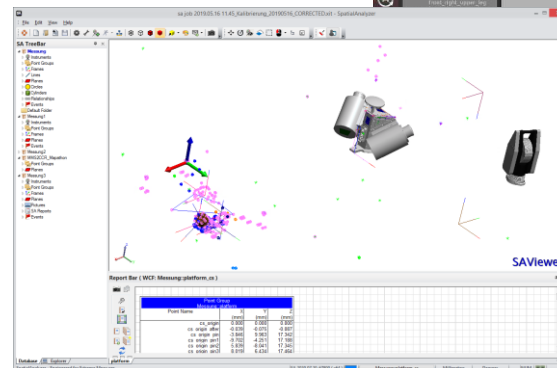
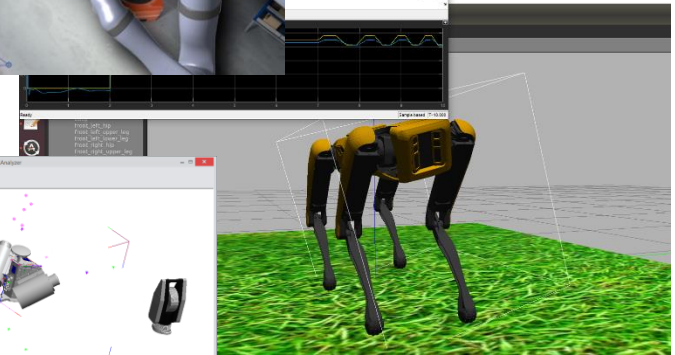
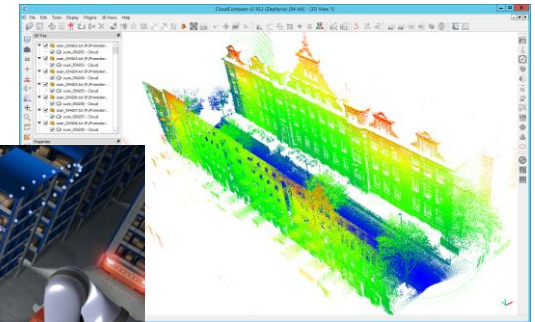
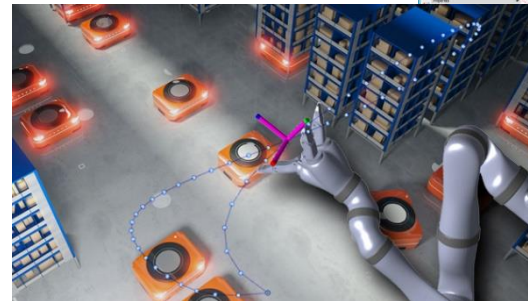


Błaszczak-Bąk et al. (2020)

Visualisierung, Geometrie-Fitting, Transformieren, Registrieren, Segmentieren, Cloud2Cloud-Vergleich, uvm.

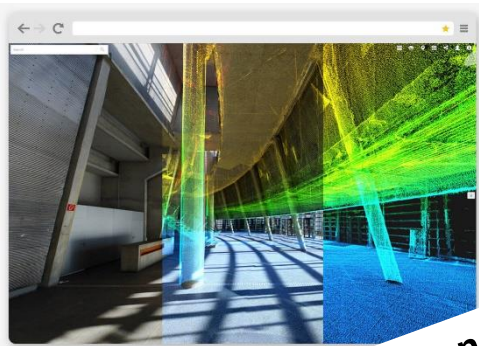
- CloudCompare
- MATLAB
 - Lidar Toolbox
 - Computer Vision Toolbox
 - Automated Driving Toolbox
 - Deep Learning Toolbox
 - ROS Toolbox
 - Robotics System Toolbox
 - ...
- Gazebo Simulation
- SpatialAnalyzer
- OpenCV Bibliothek (C++)
- ...

mathworks.com

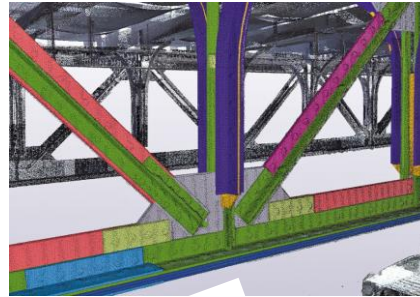


systemsintelligencesolutions.com

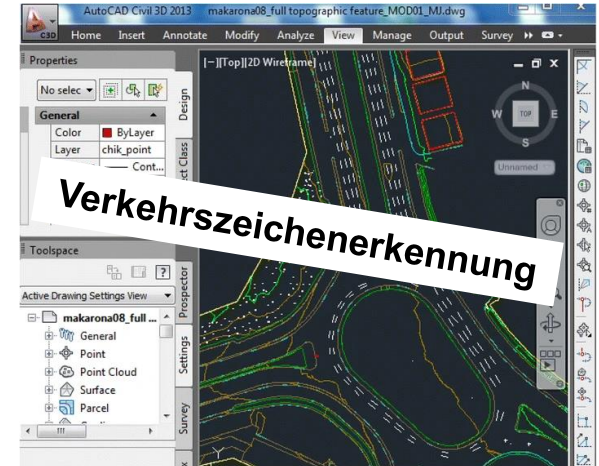
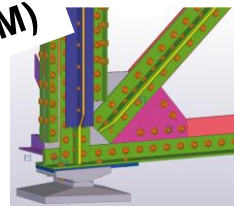
navis.com



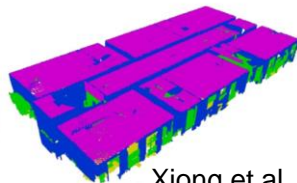
Building Information Modelling (BIM)



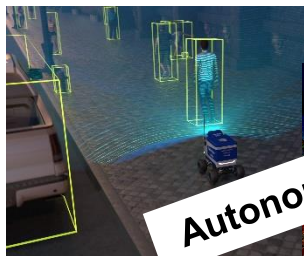
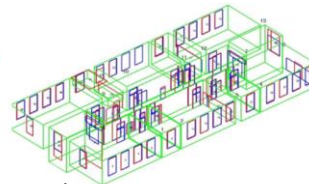
Mischo et al. (2019)



Al-Bayari (2019)

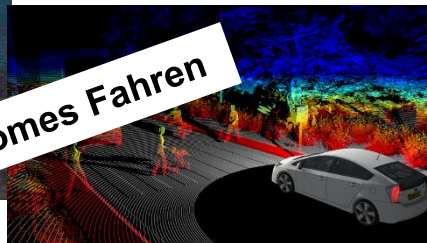


Xiong et al. (2012)

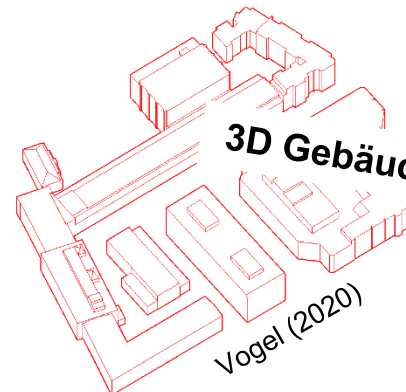


Autonomes Fahren

velodynelidar.com



Siemens AG (2019)



3D Gebäudemodelle

Vogel (2020)



aec-business.com

Sören Vogel (12-2022)

Multi-Sensor-Systeme

Weiterführende Veranstaltungen im GuG-Master:

- Kinematic Measurement Processes in Engineering Geodesy
- Advanced Concepts for Positioning and Navigation
- Photogrammetric Computer Vision
- SLAM and Path Planning
- Laser Scanning – Modelling and Interpretation
- Recursive State Estimation for Dynamic Systems
- Machine Learning Models in Geodetic Data Science
- Inertialnavigation
- Positionierung & Navigation
- Image Analysis I & II
- ...

- Alexander Fufaev, 2020: <https://de.universaldenker.org/illustrationen/685>
- Vogel, S. (2020): Kalman Filtering with State Constraints Applied to Multi-sensor Systems and Georeferencing. Ph.D. Thesis. München. DGK, Reihe C. 856.
- Hesse, C. und Neumann, I. (2007): Automatische Objekterfassung und Modellierung durch kinematisches Laserscanning. Luhmann, Thomas; Müller, Christina (Hg.). In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Wichmann. Heidelberg, 278–287.
- Frei, E. (2014): Kinematisches Laser Scanning: Anwendungen aus der Praxis. 7. Hamburger Forum für Geomatik. p3dsystems. Hamburg.
- Michael Willet, 2016: <https://github.com/michaelwillett/Iterative-Closest-Point/blob/master/images/cylinder.gif>
- Tazir, M. L., Gokhool, T., Checchin, P., Malaterre, L., & Trassoudaine, L. (2018). CICP: Cluster Iterative Closest Point for sparse–dense point cloud registration. Robotics and Autonomous Systems, 108, 66–86.
- Wujanz, D. (2016): Terrestrial laser scanning for geodetic deformation monitoring. Ph.D. Thesis. Technische Universität Berlin.
- Cdang, 2013: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lissage_sg3_anim.gif
- Lei X, Feng B, Wang G, Liu W, Yang Y. A Novel FastSLAM Framework Based on 2D Lidar for Autonomous Mobile Robot. Electronics. 2020; 9(4):695.
- Brenner, C. (2016): Scalable estimation of precision maps in a MapReduce framework. In: Proceedings of the 24th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems - GIS '16. New York, NY, USA, 1–10.
- Dimitrov, A., & Golparvar-Fard, M. (2015). Segmentation of building point cloud models including detailed architectural/structural features and MEP systems. Automation in Construction, 51, 32–45.
- Ag2gaeh, 2015: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=39208534>
- Borrmann, D.; Elseberg, J.; Lingemann, K. und Nüchter, A. (2011): The 3D Hough Transform for plane detection in point clouds. A review and a new accumulator design. In: 3D Research. Borrmann, Dorit; Elseberg, Jan; Lingemann, Kai; Nüchter, Andreas. 2 2, 1–13.
- Vo, A. V., Truong-Hong, L., Laefer, D. F., & Bertolotto, M. (2015). Octree-based region growing for point cloud segmentation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 104, 88–100.
- Li, L.; Yang, F.; Zhu, H.; Li, D.; Li, Y.; Tang, L. An Improved RANSAC for 3D Point Cloud Plane Segmentation Based on Normal Distribution Transformation Cells. Remote Sens. 2017, 9, 433.
- Burger, M., Wujanz, D., & Neitzel, F. (2017). Segmentierung von Punktwolken anhand von geometrischen und radiometrischen Informationen. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage.
- Schlichting, A. (2018): Fahrzeuglokalisierung durch Automotive Laserscanner unter Verwendung statischer Merkmale. Ph.D. Thesis. München. DGK, Reihe C. 826.
- Engelmann F., Kontogianni T., Schult J., Leibe B. (2019) Know What Your Neighbors Do: 3D Semantic Segmentation of Point Clouds. In: Leal-Taixé L., Roth S. (eds) Computer Vision – ECCV 2018 Workshops. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 11131. Springer, Cham.
- Ning X, Li F, Tian G, Wang Y (2018) An efficient outlier removal method for scattered point cloud data. PLoS ONE 13(8): e0201280.
- Błaszczak-Bąk W, Janicka J, Suchocki C, Masiero A, Sobieraj-Żłobińska A. Down-Sampling of Large LiDAR Dataset in the Context of Off-Road Objects Extraction. Geosciences. 2020; 10(6):219.
- Błaszczak-Bąk W, Koppányi Z, Toth C. Reduction Method for Mobile Laser Scanning Data. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2018; 7(7):285.
- Xiong, X., Adan, A., Akinci, B., & Huber, D. (2013). Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. Automation in construction, 31, 325–337.
- Al-Bayari, O. (2019): Mobile mapping systems in civil engineering projects (case studies). In: Applied Geomatics. Al-Bayari, Omar. 11 1, 1–13.
- Mischo, H., Seifried, J., Thiele, K., Schanzenbach, S., & Grassl, M. (2019). Vom 3-D-Laserscan zum BIM-Modell: Ein Erfahrungsbericht aus dem Stahlbrückenbau. Bautechnik, 96(7), 564–571.
- Dold, C. (2010): Ebenenbasierte Verfahren für die automatische Registrierung terrestrischer Laserscans. . Ph.D. Thesis. München. DGK, Reihe C. 646,
- Lindenthal N. (2008): Segmentierung und Datenapproximation von Laserscanneraufnahmen mittels statistischer Methoden. Diplomarbeit. Leibniz Universität Hannover. Geodätisches Institut. (unveröffentlicht).

- Evaluation
- Kurzvorträge
- Kolloquien



- Aufteilung in 8 Gruppen á 5 Personen über StudIP ab 21.12.2022 14:00 Uhr
- ca. 7-10 Minuten gemeinsamer Vortrag pro Gruppe
- Gruppen mit jeweiligen Themen:
 1. *Paper zum Mapping und Prozessierung in der Automobilindustrieproduktion*
 2. *Paper zur synergetischen Nutzung von statischen und kinematischen Laserscans*
 3. *Paper zum mobilen Laserscanning-Systemen für die Überwachung der Verkehrsinfrastruktur*
 4. *Paper zu autonomen maritimen Systemen*
 5. *Paper zu einem Kinect-basierten Rucksack für das Indoor-Mobile-Mapping*
 6. *Paper über das Mobile Mapping auf dem Acker für eine nachhaltige Pflanzenproduktion*
 7. *Vorstellung des Waymo Open Datensatz*
 8. *Vorstellung von (open-source) Simulatoren für das autonome Fahren (NVIDIA DRIVE Sim, Vista 2.0, SVL Simulator, CARLA etc.)*
- Präsentationstermine: Dienstag 17.01.2023 (Gr. 1-4) sowie Mittwoch 18.01.2023 (Gr. 5-8)
- Dringende Beachtung der korrekten Referenzierung von externen Quellen im Hinblick auf entsprechende Urheberrechte, da die Folien im Anschluss allen Teilnehmenden zur Verfügung gestellt werden sollen.

- 17. Januar 2023 als finaler Abgabetermin für alle drei Übungen
- Durchführung der individuellen Kolloquien am 24.01. und 25.01.2023 im Umfang von ca. 5 Minuten
- Eigenständige Aufteilung auf beide Tage per StudIP

- Ablauf:
 - Verständnisfragen zu den Übungsinhalten
 - Beschreibung und Erklärung des Programmcodes
 - Erläuterung der jeweiligen Mess- / Auswertestrategie
 - Umfang: 5-7 Minuten pro Person
 - Keine Benotung → Studienleistung