

---

# RADLER – Ein Einrad als RADialer LasERscanner

Dorit BORRMANN, Sven JÖRISSEN und Andreas NÜCHTER

## Zusammenfassung

Die Weiterentwicklung in der 3D-Messtechnik hat in den letzten Jahren eine Vielzahl an unterschiedlichen Messgeräten zu 3D-Umgebungserfassung hervorgebracht, jedes davon mit seinen eigenen Vorzügen und Schwächen. Diese Arbeit stellt ein modifiziertes Einrad vor, bei dem ein an der Radachse befestigter 2D Laserscanner ein radiales 3D Scanpattern erzeugt. Dieses neuartige, kostengünstige Messgerät verbindet die Vorteile von radgetriebenen Scangeräten mit denen von Handscannern. Nach der Vorstellung des Hardwareaufbaus und der Sensorintegration werden die Ergebnisse anhand von drei Testszenarien ausgewertet und mit den Daten eines terrestrischen 3D-Laserscanners verglichen.

## 1 Einleitung

Mit steigender Messrate und Genauigkeit auf der einen Seite und verringertem Gewicht und Hardwarekosten auf der anderen Seite entwickeln sich Messgeräte zur 3D-Umgebungserfassung zu Standardwerkzeugen in diversen Disziplinen. Die unterschiedlichen Messprinzipien sind mit Vor- und Nachteilen verbunden, die sie für bestimmte Anwendungsfelder befähigen. Mobile Geräte sind das Mittel der Wahl um große Bereiche in kurzer Zeit zu vermessen. Sowohl Laserscanner als auch Kameras auf Automobilen, Handwagen, Rucksäcken oder Fluggeräten wurden entwickelt um die spezifischen Anforderungen zu erfüllen.

In urbanen Umgebungen sind Mobile Mapping Systeme, bei denen Sensorik auf Automobilen verbaut wird, Stand der Technik. Diese sind aber beschränkt auf den Einsatz in befahrbaren Bereichen. Auf schmaleren Wegen kommen mobile Roboter (NÜCHTER, ELSEBERG & BORRMANN 2013) oder Handwagen ausgestattet mit Scannertechnologie, wie das VIAmetris iMMS (THOMSON ET AL. 2013; VIAMETRIS 2015) oder der Google Street View (GOOGLE 2015) beziehungsweise der NavVis 3D Mapping Trolley (NAVVIS 2015) zum Einsatz. An Treppen sowie Feld- und Schotterwegen stoßen diese Geräte jedoch an ihre Grenzen. Airborne Laser Scanning hat keinerlei Beschränkungen bezüglich des Untergrunds, scheitert aber in überdachten Umgebungen und Tunneln und liefert in Umgebungen mit starker Bewachung nur unzureichende Ergebnisse. Rucksacksysteme, auch Personal Laserscanner genannt, wie der „Cartographer“ von Google (LARDINOIS 2015), der Zebedee 3D Scanner (BOSSE, ZLOT & FLICK), der Leica Pegasus:Backpack (LEICA 2015) oder unser eigenes Rucksack Mobile Mapping System (LAUTERBACH ET AL. 2015), wurden als Lösungen für Innenraumanwendungen vorgeschlagen. Während jeder dieser Ansätze unter den entsprechenden Voraussetzungen gute Ergebnisse liefert, bringen sie klare Nachteile wie das Gewicht des Rucksacks, hohe Hardwarekosten oder geringe Reichweiten (Zebedee 3D, 15-30m) mit sich.

Ein anderer Ansatz wurde vor kurzem in Gestalt des „Classical Mechanics Scanners“ (LEHTOLA ET AL. 2015) vorgestellt. Trotz der Einfachheit und der leichten Bedienbarkeit ist eine Steuerung des Rades nicht möglich, da die intrinsisch durchgeführte Lokalisierung einen geraden Pfad verlangt. Zusätzlich muss das Rad regelmäßig angeschoben werden um eine

kontinuierliche Bewegung zu erzielen, wodurch die Bedienung über lange Strecken sehr anstrengend wird. Demzufolge ist das Anwendungsfeld stark eingeschränkt, insbesondere in Anbetracht von anspruchsvollem und unebenem Terrain.

Während Kamerasysteme bei wechselnden Lichtverhältnissen und in strukturarmen Umgebungen an ihre Grenzen stoßen, sind die stärksten Einschränkungen eines 3D Laserscanners weiterhin Preis und Gewicht. Inspiriert von einem Hodometer stellen wir ein modifiziertes Einrad vor, an dessen Radachse ein 2D Laserscanner montiert ist. Die Radumdrehungen erzeugen ein radiales 3D Scanpattern, daher die Bezeichnung RADLER (Abk.: RADialer LasER Scanner). Dieses neuartige, kostengünstige Instrument kombiniert die Vorteile von radgetriebenen Scannern mit denen von tragbaren Geräten. Die Bewegung auf dem Boden erzeugt eine ruhigere Trajektorie als Handgeräte oder Rucksacksysteme. Mit dem großen luftgefüllten Reifen kann RADLER dennoch auf unebenem Untergrund und, wenn gezogen, sogar auf Treppen betrieben werden. Es ist leichtgewichtig, portabel und einfach zu bedienen. Zur Bestimmung des 3D-Patterns kommen ein Inkrementalgeber und eine Intertialmesseinheit (IMU) zum Einsatz. Ein SLAM-Ansatz (Abk. engl. Simultaneous Localization and Mapping = gleichzeitige Lokalisierung und Kartierung) errechnet aus den so gewonnenen Initialdaten die finale Punktwolke. Nach der Vorstellung des Hardwareaufbaus und der Sensorintegration folgen eine Auswertung anhand von drei Testszenerarien und ein Vergleich mit den Daten eines terrestrischen 3D Laserscanners.

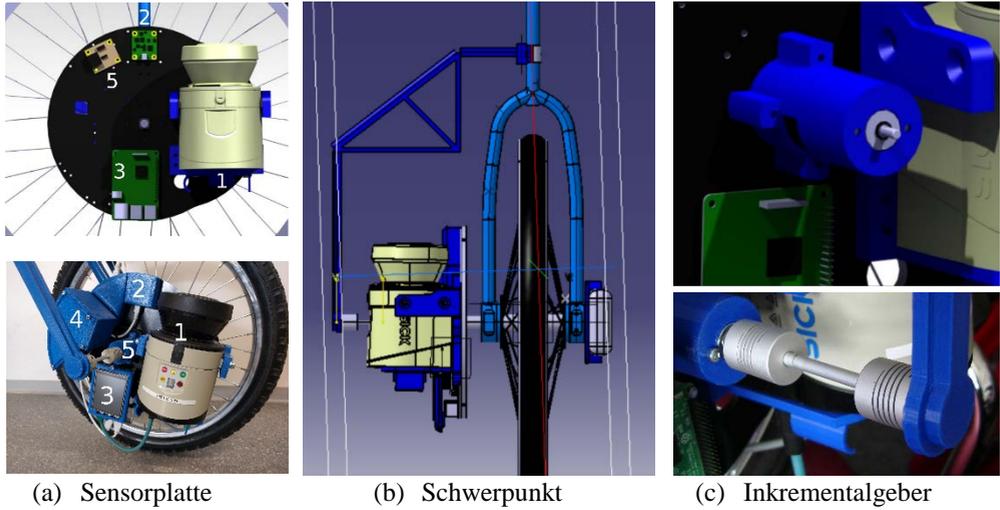


**Abb. 1:** Erstautorin bedient Radler.

## 2 Systemkomponenten

### 2.1 Hardware

RADLER ist ein modifiziertes Einrad, das zur einfachen Manövrierbarkeit mit einem Handgriff ausgestattet wurde (Abb. 1). Die Sensoren, ein SICK LMS141 2D Laserscanner, eine PhidgetSpatial Precision 3/3/3 Intertialmesseinheit, ein Raspberry Pi 3 Single Board Computer (SBC) mit Display und ein Phidget ISC3004 Inkrementalgeber sind, auf einer Basisplatte angebracht an die Radachse des Einrades montiert (Abb. 2). Gegengewichte auf der anderen Seiten helfen das Rad bei der Benutzung in Balance zu halten. Um beste Stabilität zu erzielen, verschieben die Gewichte den Schwerpunkt auf das Rad (vgl. rote Linie in Abb. 2(b)). Der Inkrementalgeber ist über eine Stützstruktur angebracht und mittels des PhidgetEncoders High Speed über USB mit dem SBC verbunden. Ein Kupplungsstück verringert die Axialbeanspruchung des Encoders während der Drehbewegungen. Der LMS141 mit seiner maximalen Messweite von 40 m bei einer Frequenz von 25/50 Hz und einer Winkelauflösung von 0.25/0.5° ist derart befestigt, dass die Scanebene parallel zur Radachse verläuft und ist über Ethernet mit dem SBC verbunden. Der Raspberry Pi 3 ist als W-LAN Accesspoint konfiguriert.



**Abb. 2:** Der Sensoraufbau von RADLER (1) SICK LMS 141 Laserscanner, (2) Phidget-Spatial Precision 3/3/3 IMU, (3) Raspberry Pi 3 mit Display, (4) Kabelbox., (5) Phidget optischer Drehwinkelgeber ISC3004 und Encoder High Speed.

riert, um einfache Kommunikation via *ssh* zu ermöglichen. Der Radencoder liefert einfache Odometriewerte, die anschließend mit den Daten der IMU zu einer präzisen Trajektorie fusioniert werden. RADLER wird mit einem 1000 mAh Lithium Polymer Akku betrieben, der direkt auf der Basisplatte angebracht für eine Betriebsbdauer von 40 bis 50 Minuten 11.1 V für den Laserscanner und über einen DC-DC Wandlers 5V für den SBC liefert.

## 2.2 Sensorintegration

Der Raspberry Pi 3 integriert die Sensoren mit ROS (Abk. engl. Robot Operating System, Roboterbetriebssystem). Der Laserscanner rotiert um die Radachse um bei gleichzeitiger Vorwärtsbewegung eine radiale 3D Punktwolke zu erzeugen. Auf diese Weise werden Mehrfachmessungen zwischen vollständigen 360 Grad-Umdrehungen und somit eine ausreichende Überlappung garantiert, die für den continuous-time SLAM Algorithmus (ELSEBERG, BORRMANN & NÜCHTER 2013) unabdinglich ist. Die Qualität der resultierenden 3D Punktwolke ist demzufolge stark von der Qualität der Poseschätzung beim Abrollen der einzelnen 2D Scanprofile des Laserscanner abhängig.

Das Einrad Koordinatensystem  $\mathcal{E}$  habe seinen Ursprung im Mittelpunkt der Achse mit  $x$  in Vorwärtsrichtung.  $y$  zeigt von der Sensorplatte weg. Sei weiterhin  $T_{\mathcal{E} \rightarrow \mathcal{G}}$  die Transformation von  $\mathcal{E}$  in das globale Koordinatensystem  $\mathcal{G}$ ,  $L$  der Umfang des Rades und  $C$  die CPR (Abk. engl. counts per revolution; Anzahl der Ticks pro Umdrehung), d.h. das Zählerinkrement des Encoders für eine  $360^\circ$  Umdrehung. Die Änderung des Nickwinkels  $\Delta\theta$  und die Vorwärtsbewegung  $\Delta x_{\mathcal{E}}$  des Einrades, berechnen sich mittels der Anzahl an Ticks  $c_t$  zwischen Zeitschritt  $t - 1$  und  $t$  als

$$\Delta\theta = \frac{-2\pi}{C} \cdot c_t \quad \text{und} \quad \Delta x_{\mathcal{E}} = \frac{L}{C} \cdot c_t. \quad (1)$$

Messwerte von IMUs unterliegen starkem Drift. Um den Einfluss des Drifts auf die Kartenqualität zu reduzieren, werden nur Gierwinkel  $\psi$  und Rollwinkel  $\varphi$  von der IMU verwendet. Sei  $\mathbf{R}_{\mathcal{J} \rightarrow \mathcal{Q}}$  die Orientierung der IMU im globalen Koordinatensystem. Dann beschreibt

$$\begin{pmatrix} p_x & p_y & p_z \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{\mathcal{J} \rightarrow \mathcal{Q}} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T \quad (2)$$

die  $z$ -Achse im globalen Koordinatensystem. Für die Orientierung des Einrads folgt:

$$\psi = \text{atan2}(p_y, p_x) \quad \text{und} \quad \varphi = \text{arc}\left(\begin{pmatrix} p_x & p_y & p_z \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} p_x & p_y & 0 \end{pmatrix}\right) \quad (3)$$

Der Nickwinkel ergibt sich in einer ähnlichen Weise über die  $y$ -Achse im globalen Koordinatensystem:

$$\vartheta = \text{atan2}(q_y, q_z) \quad \text{mit} \quad \begin{pmatrix} q_x & q_y & q_z \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{\mathcal{J} \rightarrow \mathcal{Q}} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}^T. \quad (4)$$

$\vartheta$  wird für ausschließlich für die im nächsten Abschnitt beschriebene Kalibrierung des Inkrementalgebers verwendet.

Sei  $\mathbf{T}_{\mathcal{L} \rightarrow \mathcal{E}}$  die Transformation vom Scannerkoordinatensystem  $\mathcal{L}$  in das Einradkoordinatensystem. Dann berechnet sich die initiale Transformation eines jeden Punktes  $\mathbf{p}_{\mathcal{L}}$  in Scannerkoordinaten in das globale Koordinatensystem durch

$$\mathbf{p}_{\mathcal{Q}} = \mathbf{T}_{\mathcal{J} \rightarrow \mathcal{Q}} \cdot \mathbf{T}_{\mathcal{L} \rightarrow \mathcal{E}} \cdot \mathbf{p}_{\mathcal{L}}, \quad (5)$$

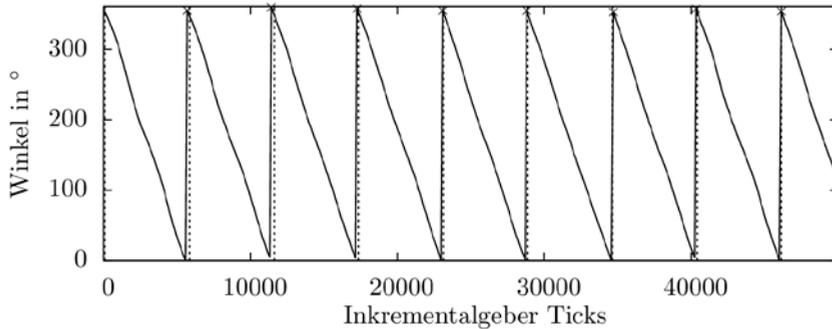
wobei die Rotation von  $\mathbf{T}_{\mathcal{L} \rightarrow \mathcal{E}}$  durch  $(\varphi, \vartheta, \psi)$  und die Translation durch

$$\Delta x_{\mathcal{Q}} = \Delta x_{\mathcal{L}} \cdot \cos \psi, \quad \Delta y_{\mathcal{Q}} = \Delta x_{\mathcal{L}} \cdot \sin \psi, \quad \Delta z_{\mathcal{Q}} = 0 \quad (6)$$

gegeben sind. Diese Anfangsschätzung berücksichtigt keinerlei Höhenunterschiede und ist durch die Genauigkeit von Inkrementalgeber und IMU beschränkt. Um den Einfluss dieser Beschränkungen zu verringern sind algorithmische Lösungen notwendig. Hier kommt der continuous-time SLAM Ansatz von ELSEBERG, BORRMANN & NÜCHTER (2013) zum Einsatz. Da dieser Algorithmus auf dem ICP (Abk. engl.: iterative closest point, deutsch: Iterativer Algorithmus der nächsten Punkte) Prinzip (BESL & MCKAY 1995) basiert, profitiert er vom Design von RADLER. Durch die radiale Rotation misst der Laserscanner Punkte vor und hinter dem Rad gleichzeitig, wodurch Dichte und Überlappung in der Szene erhöht werden.

### 2.3 Sensorkalibrierung

Die Qualität der Odometrieschätzung ist direkt abhängig von einer präzisen Bestimmung von  $C$  und  $L$  aus Gleichung (1). Während der Radumfang  $L$  einfach zu messen ist, müssen die CPR durch Kalibrierung ermittelt werden. Hierfür wird die Orientierung durch Fusionierung mittels Madgwick-Filter (MADGWICK, HARRISON & VAIDYANATHAN 2011) aus den IMU-Messwerten berechnet. Abb. 3 zeigt beispielhaft den Nickwinkel der IMU abgetragen gegenüber der Ticks des Inkrementalgebers. Anhand der Maxima, beziehungsweise Nulldurchgänge, des Nickwinkels ergeben sich die CPR für eine jede Umdrehung. Ein Medianfilter eliminiert die Ausreißer aus diesen Messwerten und der Durchschnitt der verbleibenden Werte ergibt den finalen Wert für  $C$ . Schließlich wird der Offset bezüglich der initialen Orientierung des Encoders berechnet. Die Pose des Einrades (Position und Orientierung) ergibt sich folglich aus der Odometrie für Bewegungen entlang der Radebene und den IMU -Daten für die Orientierung des Rades, wie im letzten Abschnitt beschrieben. Um systematische Fehler des Inkrementalgebers aufgrund von Umwelteinflüssen, wie Temperaturschwankungen, zu vermeiden wird der Kalibrierprozess für jedes Experiment wiederholt.



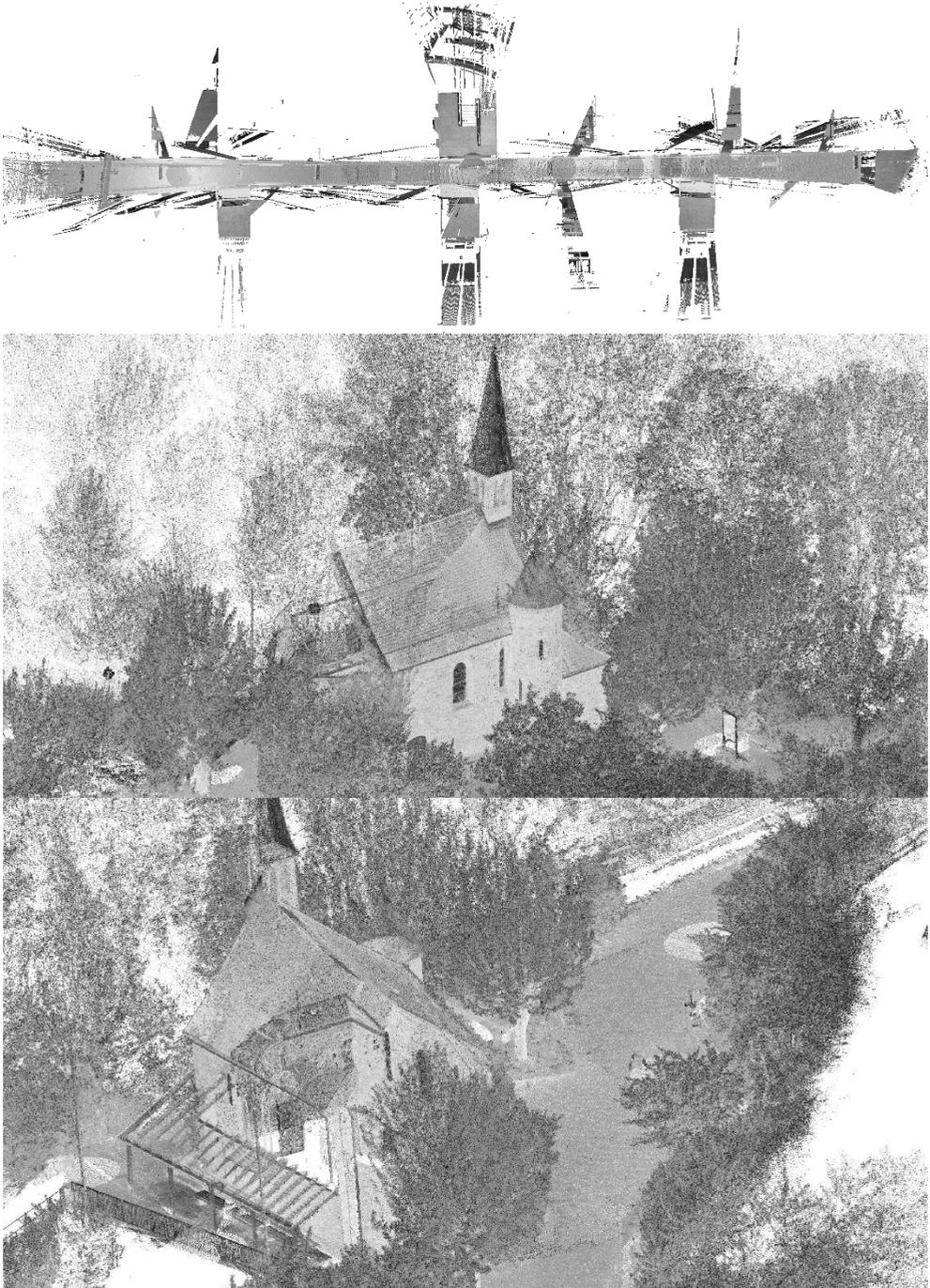
**Abb. 3:** Bestimmung der CPR des Inkrementalgebers. Die durchgezogene Linie zeigt den Nickwinkel der IMU, die Kreuze markieren dessen Maxima und die gestrichelten Linien kennzeichnen die Anhand der Kalibrierung des Inkrementalgebers berechneten Nulldurchgänge.

### 3 Experimente und Auswertung

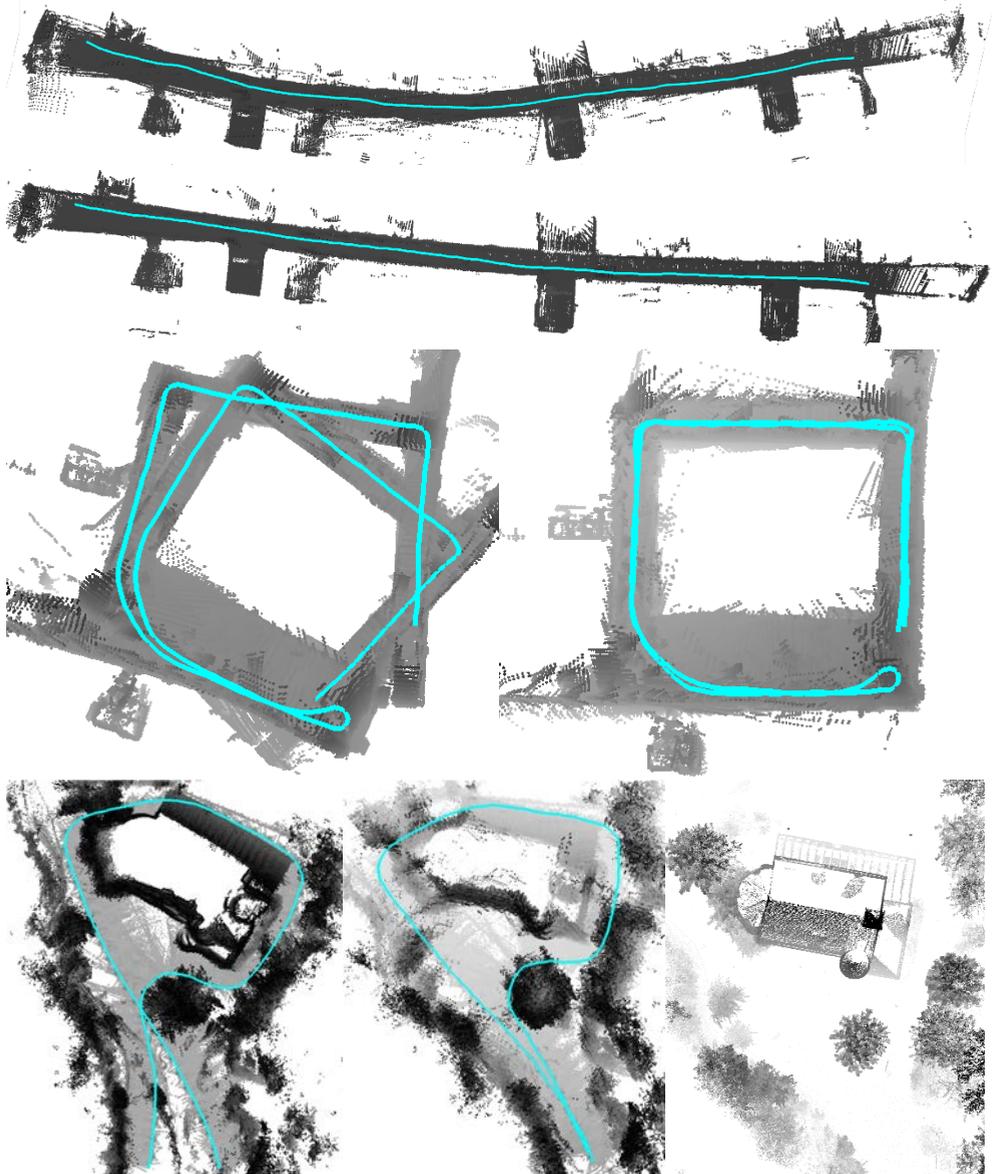
Die Evaluation von RADLER erfolgt anhand von drei Testszenarien in unterschiedlichen Umgebungen. Die ersten beiden Umgebungen sind der erste Stock des Informatikgebäudes („Flur“) und des alten Mathematikgebäudes („Kreis“) der Julius-Maximilians Universität Würzburg. Das dritte Experiment findet um die Maria Schmerz Kapelle in den Weinbergen oberhalb von Randersacker („Kapelle“) statt. Terrestrische Scans, aufgenommen mit einem Riegl VZ-400 (RIEGL 2019) dienen als Ground Truth für „Flur“ und „Kapelle“ (vgl. Abb. 4).

1. „Flur“ Als einfachste Bewegung besteht der Datensatz aus einer geraden Linie von ungefähr 100 m auf ebenem Untergrund ohne jegliche Steigung. Dies liefert ca. 3,5 Millionen Punkte. Typisch für ein Bürogebäude besteht der Flur aus mehreren Türen und Glasfassaden, die zu Reflektionen und Fehlprojektionen führen (teilweise sichtbar in Abb. 4 (oben) und 5 (oben)).
2. „Kreis“ Ebenfalls auf ebenem Untergrund ohne Steigung besteht dieser Datensatz aus zwei vollständigen Kreisen, die Hin- und Rückweg abbilden und das eingeschränkte Sichtfeld des Scanners kompensieren sollen. Der Drift der IMU ist in der initialen Trajektorie stark ausgeprägt, wird aber durch den continuous-time SLAM Ansatz behoben. Der Datensatz resultiert in ca. 6,3 Millionen Punkten.
3. „Kapelle“ Der größte Datensatz ist gleichzeitig der herausforderndste mit Schotter, Kopfsteinpflaster und einer leichten Steigung. Am höchsten Punkte beginnend führt der Pfad zu einer ebenen Umrundung der Kapelle und wieder zurück zum Startpunkt. Der SLAM Algorithmus wird benötigt um aus der initialen 2D Trajektorie die Steigungsunterschiede zu rekonstruieren und globale Konsistenz herzustellen. Der Datensatz umfasst ca. 3,5 Millionen Punkte.

Abb. 4 zeigt die terrestrischen Scans vom „Flur“ als Draufsicht und die „Kapelle“ in zwei Ansichten eingefärbt anhand der Intensitätswerte. Abb. 5 stellt die Ergebnisse von RADLER nach ca. 150 Iterationen des continuous-time SLAM Algorithmus dar. Die Bestimmung der Punkt-zu-Punkt-Distanz in Abb. 6 erfolgt nach vorheriger Registrierung der RADLER Daten mit der Ground Truth mit der Implementierung des ICP-Algorithmus aus 3DTK (NÜCHTER



**Abb. 4:** Ground Truth Daten, aufgenommen mit einem Riegl VZ-400 (RIEGL 2019) Laserscanner. Draufsicht auf den „Flur“ sowie zwei Ansichten der „Kapelle“. Graufarben visualisieren die Intensitätswerte.



**Abb. 5:** Draufsicht auf die Ergebnisse der Experimente: das erste Bild zeigt jeweils die initiale Trajektorie gefolgt von den Ergebnissen des continuous-time SLAM Ansatzes. Von oben nach unten: „Flur“, „Kreis“, „Kapelle“. Die Datensätze im Gebäude erscheinen aufgrund von reflektierenden Oberflächen, wie Fensterscheiben, verrauscht. Die initiale Trajektorie der „Kapelle“ ist planar. Nach der Korrektur wird durch die Einfärbung nach Höhe die wahre Geometrie der Szene deutlich. Da die Kapelle unterhalb der Startposition liegt, verliert die Schattierung nach Höhe ihren Einfluss auf das Dach der Kapelle, das dadurch heller erscheint. Das dritte Bild zeigt als Referenz den Ground Truth Datensatz.

ET AL. 2019). Die abgebildete Farbskala spiegelt die Einfärbung der Punkte basierend auf der Punkt-zu-Punkt-Distanz mit Werten von 0 m (blau) zu 1 m (rot) wider.

Der „*Flur*“ schneidet im Vergleich mit der Ground Truth gut ab, insbesondere in den ersten drei Vierteln des Weges von links nach rechts in Abb. 3. Schwarz eingefärbte Punkte haben eine Punkt-zu-Punkt-Distanz über 1 m. Sie treten beinahe ausnahmslos im letzten Viertel auf, in Folge der großen Glasfassaden in diesem Bereich. Aufgrund der Tatsache, dass RADLER größtenteils in Fahrtrichtung rechts scannt, ist die Punktdichte auf der linken Wand sehr gering. Ohne einen Schleifenschluss führt die ungleiche Punktdichte beim ICP-Algorithmus zu einem Zusammenziehen der Daten auf einer Seite.

Abb. 5 zeigt die Draufsicht der drei Experimente mit initialer Trajektorie sowie nach wenigen Iterationen des continuous-time SLAM Algorithmus. Der Schleifenschluss in den letzten beiden Experimenten erzielt ein deutlich verbessertes Ergebnis durch die SLAM-Optimierung als beim „*Flur*“. Trotz der Länge der Trajektorie konvergiert der „*Kreis*“ zu einem Ergebnis, das die rechteckige Form des Gebäudes abbildet. Die unscharfen Kanten in der Draufsicht machen aber die Notwendigkeit einer weiteren Verbesserung der Kalibrierung deutlich. Für lange Trajektorien erscheinen ein einfacher Offset und statische CPR-Werte nicht ausreichend. Eine Lösung wäre hier die Integration der IMU-Messungen mittels Kalman Filter.

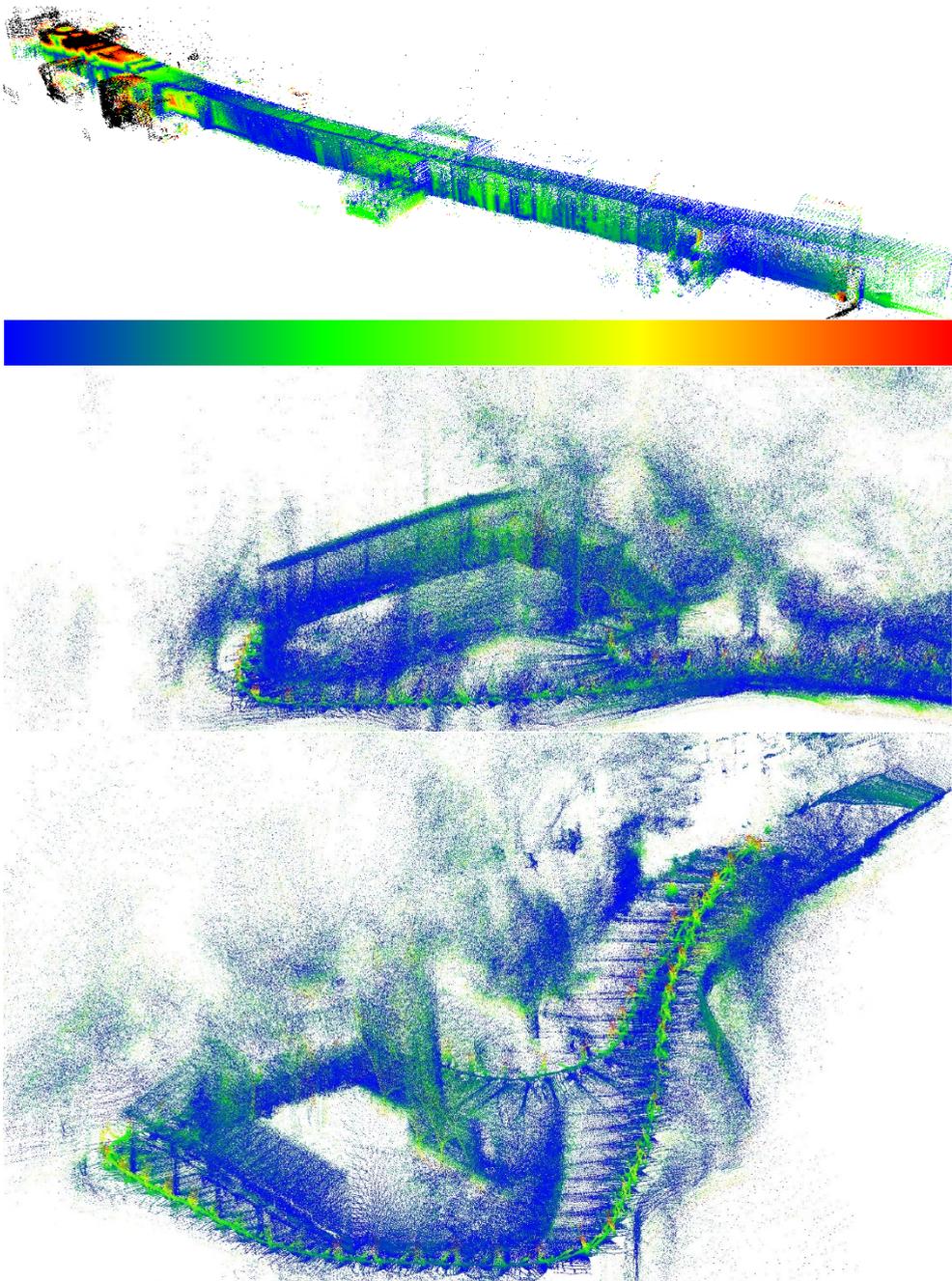
Auch die „*Kapelle*“ schneidet im Vergleich zur Ground Truth gut ab, die Ausreißer sind deutlich weniger als beim „*Flur*“. Trotz des unebenen Terrains ermöglicht der Schleifenschluss eine Korrektur des Pfades, insbesondere bezüglich der Höhenunterschiede, mittels continuous-time SLAM. Eingeschränkt wird das Außenexperiment durch die geringe Reichweite des Laserscanners kombiniert mit der verringerten Punktdichte auf großen Entfernungen. Das Kapellendach ist nur sehr spärlich abgebildet. Zur Erhöhung der Punktdichte ist eine deutlich langsamere Drehgeschwindigkeit des Einrades oder das mehrfache Abfahren der Trajektorie von Nöten. Die Option den LMS 141 durch ein Gerät mit einer größeren Reichweite zu ersetzen wäre mit einem Anstieg der Hardwarekosten verbunden.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit präsentiert eine neue, kostengünstige Methode 3D Punktwolken ohne einen klassischen 3D Laserscanner zu erzeugen. Ein modifiziertes Einrad mit einem 2D Laserprofil, einer IMU und einem Inkrementalgeber generiert die 3D Punktwolken und das Ergebnis wird mit einem continuous-time SLAM Ansatz optimiert. Die Ergebnisse und die Diskussion zeigen bereits vielversprechende 3D Punktwolken. Dennoch stehen einige Verbesserungen für weitere Arbeiten aus. Ein Kalman Filter zur Fusion der Daten des Inkrementalgebers und der IMU soll die Genauigkeit der Odometrie verbessern. Zusätzlich könnte ein GNSS Sensor integriert werden um die initiale Trajektorie für den continuous-time SLAM Algorithmus bei Außenaufnahmen zu verbessern. Eine Verbesserung der Aufhängung der Sensorplatte kommt in Betracht um einige Nachteile wie das Spiel der Radachse, zu kompensieren.

## Danksagung

Die Autoren danken Rahul Bhandari für das mechanische Design und die Konstruktion von RADLER.



**Abb. 6:** Registrierte Punktwolken für den „Flur“ und zwei Ansichten für die „Kapelle“ entsprechend zu Abb. 4. Die Farbe zeigt die Punkt-zu-Punkt-Distanz entsprechend der abgebildeten Skala von 0 m (blau) zu 1 m (rot).

## Literatur

- Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992). *A Method for Registration of 3-D Shapes*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2), S. 239-256.
- Bosse, M., Zlot, R., & Flick, O. (2012). *Zebedee: Design of a spring-mounted 3-d range sensor with application to mobile mapping*. IEEE Transactions on Robotics, 28(5), S. 1104-1119.
- Elseberg, J., Borrmann, D. & Nüchter, A. (2013). *Algorithmic Solutions for Computing Precise Maximum Likelihood 3D Point Clouds from Mobile Laser Scanning Platforms*. Remote Sensing, 5(11), S. 5871-5906.
- Google (2015). *Street View Trolley*. <http://maps.google.com/intl/en/maps/about/behind-the-scenes/streetview>.
- Lauterbach, H.A., Borrmann, D., Hess, R., Ecke, D., Schilling, K. & Nüchter, A. (2015). *Evaluation of a Backpack-Mounted 3D Mobile Scanning System*. Remote Sensing, 7(10), S. 13753-13781.
- Lardinois, F.T.C. (2015). *Google Unveils The Cartographer, Its Indoor Mapping Backpack*. <http://techcrunch.com/2014/09/04/google-unveils-the-cartographer-its-indoor-mapping-backpack/>,
- Lehtola, V.V., Virtanen, J.-P., Kukko, A., Kaartinen & H., Hyypä, H. (2015). *Localization of mobile laser scanner using classical mechanics*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 99, S. 25-29.
- Leica (2015). *Leica pegasus:backpack*. [http://www.leica-geosystems.com/de/Leica-PegasusBackpack\\_106730.htm](http://www.leica-geosystems.com/de/Leica-PegasusBackpack_106730.htm).
- NavVis (2015). *M3 trolley*. <https://navvis.com/explore/trolley/>.
- Madgwick, S. O. H., Harrison, A. J. L. & Vaidyanathan, R. (2011). *Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm*. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, S. 1 - 7.
- Nüchter, A. et al. (2019). *3DTK - The 3D Toolkit*. <http://threedtk.de>, abgerufen am 25.02.2019.
- Nüchter, A., Elseberg, J. & Borrmann, D. (2013). *Irma3D - An Intelligent Robot for Mapping Applications*. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> IFAC Symposium on Telematics Applications (TA '13), S. 119-124.
- Riegl Laser Measurement Systems (2019). *Datenblatt VZ-400*. <http://riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/>.
- Thomson, C., Apostolopoulos, G., Backes, D. & Boehm, J. (2013). *Mobile laser scanning for indoor modelling*. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5/W2: S. 289-293.
- VIAmetris (2015). *Mobile Mapping Technology*. <http://www.viametris.com>.