

# Indoor Mobile Mapping im Fernsehturm Stuttgart

MARIUS ZIEGLER<sup>1</sup> & MICHAEL HAHN<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Erprobt wurde die mobile Erfassung von Punktwolken im Fernsehturm Stuttgart mit einem FARO X330 Laserscanner in Verbindung mit zwei Xsens IMUs. Der terrestrische Laserscanner wird mit Hilfe eines Adapters als 2D Zeilenscanner betrieben. Der Scanner ist mit einer Xsens IMU gekoppelt, die Beschleunigungen und Drehraten misst. Die Datenerfassung erfolgt vom Dach der beiden im Turmschaft eingebauten Aufzüge. Der Laserscanner ist so auf einem Stativ montiert, dass die Rotationsachse des Laserscanners in Fahrrichtung zeigt. Der Scanbereich umfasst bei einer Rotation 300°, weshalb für die vollständige Erfassung des Aufzugsschachtes zwei Messfahrten mit beiden Aufzügen erforderlich sind.*

*Bei der Auswertung hat sich gezeigt, dass die Messgenauigkeit der driftenden Inertialsensoren für eine hinreichend genaue Berechnung der Plattformorientierung und damit der 3D-Punktwolke nicht ausreicht. Abgesehen vom Beschleunigungs- und Bremsvorgang am Beginn und Ende der Fahrt handelt es sich bei der Fahrt im Aufzug um eine gleichförmige Bewegung auf einer geradlinigen Strecke. Eine mit entsprechend definierter Trajektorie berechnete 3D-Punktwolke konnte über Schaftelemente referenziert werden. Aus der Punktwolke lassen sich Abmessungen bestimmen, so dass die Erstellung von Plänen möglich ist.*

## 1 Einleitung

Der Stuttgarter Fernsehturm ist ein seit Mitte des 50er Jahre bestehendes Wahrzeichen der Stadt Stuttgart. Umbauarbeiten auf Grund neuer Brandschutzvorschriften haben im Turmschaft eine vermessungstechnische Erfassung von Betonträgern und Stahlschienen, aber auch der Geometrie der Innenwand des Turmschaftes und anderes mehr notwendig gemacht.

Um die Arbeiten im Turm durch die Vermessung nur so kurz wie möglich zu behindern, soll lasergestütztes Mobile Mapping Konzept erprobt und untersucht werden. Primäres Ziel war die Erfassung von Punktwolken mit hoher Punktdichte bei relativ geringem Zeiteinsatz vor Ort. Die Plattformorientierung mit IMU Sensoren bietet sich für Indoor-Anwendungen an, wobei die Rahmenbedingungen eher einen Sonderfall der Orientierungsbestimmung erwarten lassen.

Der Turmschaft hat eine Höhe von ca. 138 Metern. In diesem Turmschaft sind zwei Aufzüge untergebracht. Sieht man von einer kurzen Beschleunigungs- und Bremsphase am Beginn und Ende eine Fahrt ab, bewegt sich ein Aufzug auf einer vertikalen Bahn mit einer gleichförmigen Bewegung. Die zu erwartende rotatorische Bewegung der Kabine während der Fahrt ist nahe Null. Für die Datenerfassung wurde das mobile Equipment auf den Kabinendächern der beiden Aufzüge aufgestellt. Der verwendete FARO Focus X330 Laserscanner mit Helical Adapter kommt dabei als rotierender Zeilenscanner zur Einsatz. Der Scanner erzielt eine hohe Punktdichte innerhalb eines Profils und bei langsamer Fahrt auch einen geringen Profilabstand, so dass eine für die geometrisch zu bestimmenden Elemente des Turmschaftes hinreichend dichte 3D Punktwolke erwartet werden durfte.

---

<sup>1</sup> Hochschule für Technik Stuttgart, Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart;  
E-Mail: [Marius.Ziegler, Michael.Hahn]@hft-stuttgart.de

## 2 Messablauf

Der X330 Laserscanner war auf einer kompakten Trägerplattform montiert und auf einem Stativ aufgestellt, wobei der Laserscanner senkrecht zur vertikalen Fahrtrichtung mit 48 Zeilen pro Sekunde bis zu 17066 Punkten pro Zeile scannte. Statt der üblichen Aufzugsgeschwindigkeit von 5m/s ermöglichte eine besonders langsame Fahrgeschwindigkeit von ca. 0.35m/s mit dem ersten Aufzug einen sehr geringen Scanzeilenabstand von weniger als 1cm in Fahrtrichtung. Der X330 Laserscanner hat einen Öffnungswinkel von 300°, so dass zwei Fahrten je Aufzugsschacht erforderlich waren, um eine vollständige räumliche Abdeckung zu erreichen. Da die Trageile des Aufzugs Abschattungen erzeugten, wurde der Scanner nach einer Messfahrt nicht nur gedreht, sondern auch neu positioniert.

Mit auf der Trägerplattform montiert waren zwei Xsens MTi-G-700 IMUs, welche die Beschleunigungen und Drehraten während der Messung aufzeichneten. Mit den beiden inertialen Messeinheiten lassen sich im Outdoor-Einsatz über die integrierten GPS-Empfänger Position und Lage bestimmen. Da bei der Indoor-Anwendung GPS nicht verfügbar ist, beschränkt sich die IMU-Erfassung auf Beschleunigungen und Drehraten. Eine der beiden IMUs war direkt mit dem Scanner gekoppelt, so dass diese mit 48Hz explizit für jede Scanzeile ein Datensatz aufzeichnete. Mit diesen Daten erfolgte die Berechnung der Trajektorie (Position und Lage) der Aufzugsfahrt, welche zur Berechnung der 3D-Punktwolke herangezogen wurde. Die zweite IMU hat unabhängig davon Daten mit 100Hz aufgezeichnet. Dies diente zum einen der Redundanz und zum anderen einer feineren Auflösung eventueller Schwingungen.

## 3 Messergebnisse

Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Parameter der vier Messfahrten. Abgesehen von der Fahrtrichtung gleichen sich die Messfahrten eines Aufzugs. Wesentlicher Unterschied zwischen den Messungen ist die höhere Fahrgeschwindigkeit mit dem zweiten Aufzug und damit einhergehend eine geringere Gesamtanzahl an Punkten in der Punktwolke.

Tab. 1: Eckdaten der Messungen

	Messfahrt 1	Messfahrt 2	Messfahrt 3	Messfahrt 4
Aufzug	Aufzug 1		Aufzug 2	
Messfrequenz	48Hz	48Hz	48Hz	48Hz
Punkte pro Zeile	17066	17066	17066	17066
Fahrgeschwindigkeit	ca. 0.35 m/s	ca. 0.35 m/s	ca. 0.7 m/s	ca. 0.7 m/s
Punkte	350 Mio.	351 Mio.	190 Mio.	190 Mio.
Scanzeilenabstand	<1cm	<1cm	<1.5cm	<1.5cm

Der FARO X330 erlaubt die Datenerfassung mit einer maximalen Scangeschwindigkeit von 97 Zeilen pro Sekunde, wobei mit jedem Zeilenscan ein Trigger-Signal verknüpft ist. Die verwendeten Xsens IMU können allerdings maximal 60 eingehende Trigger-Signale pro Sekunde verarbeiten. Aus diesem Grund wurde der Scanner auf die höchst mögliche Scangeschwindigkeit unterhalb dieses Grenzwertes eingestellt, welche bei 48Hz liegt. Dies ist insofern kein Nachteil, da auf Grund der geringen Fahrgeschwindigkeit trotzdem Zeilenabstände von unter 1.5cm erreicht wurden. Zudem verdoppelt sich die Anzahl der Scanpunkte pro Zeile von 8533 (97Hz) auf 17066 (48Hz).

Die gemessene Beschleunigung der IMU in Fahrtrichtung ist gekennzeichnet durch Messrauschen, das bei ca.  $\pm 0.15\text{m/s}^2$  liegt (vgl. Abb. 10). Zu Beginn und am Ende der Messdaten sind Ausschläge zu erkennen, welche durch die Anfahrt bzw. das Anhalten des Aufzugs bedingt sind. Etwa in der Mitte der Messung gibt es deutlich erkennbare Beschleunigungen, deren Ursache sehr wahrscheinlich in der Aufzugstechnik liegen. Deutlicher wird dies in Abb. 2, bei der Werte, welche in den Bereich des Messrauschens fallen, durch den gleitenden Mittelwert ersetzt sind.

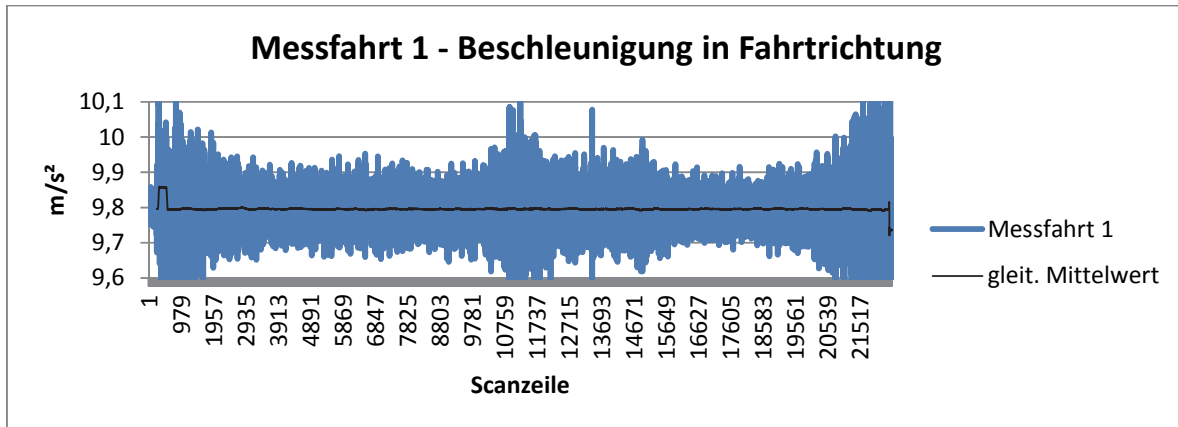


Abb. 1: Messfahrt 1 - Beschleunigung in Fahrtrichtung

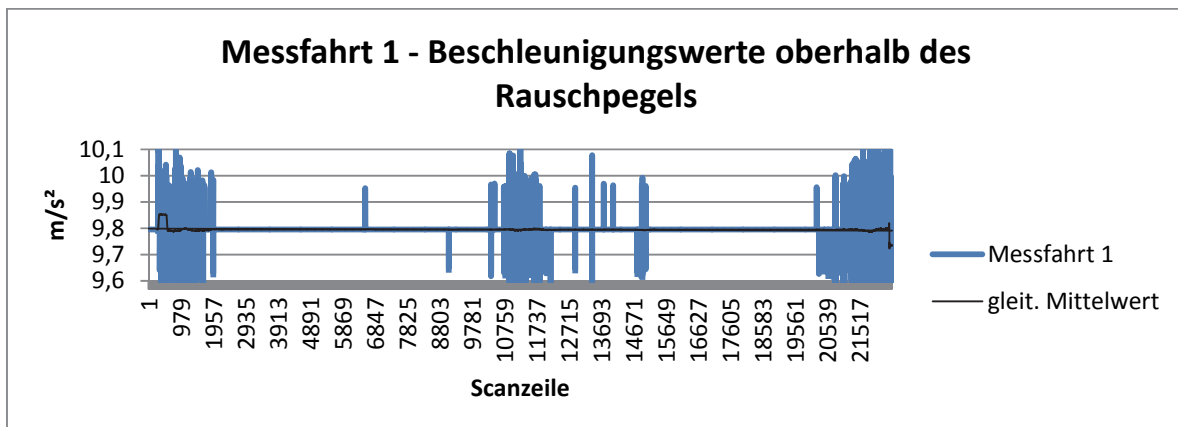


Abb. 2: Messfahrt 1 – Rauschunterdrückte Darstellung der Beschleunigungen aus Abb. 1

Die Trendlinie verdeutlicht die Bewegung während der Messung. Zu Beginn gibt es eine Beschleunigungsphase, deren Beschleunigungswerte über dem Mittelwert liegen, da der Aufzug und die Messsysteme nach oben beschleunigt werden. In der Mitte gibt es zwar Beschleunigungsmessungen, die sich vom Messrauschen signifikant abheben, sich aber nur kurzfristig und lokal auswirken. Die Fahrt endet abrupt bzw. ruckartig.

Die zweite Messfahrt war im Vergleich zur ersten etwas unruhiger, was sich in einem etwas stärkeren und gleichmäßigeren Messrauschen widerspiegelt. Wie zuvor zeigt die Trendlinie ein langsames Anfahren und am Ende ein abruptes Anhalten.

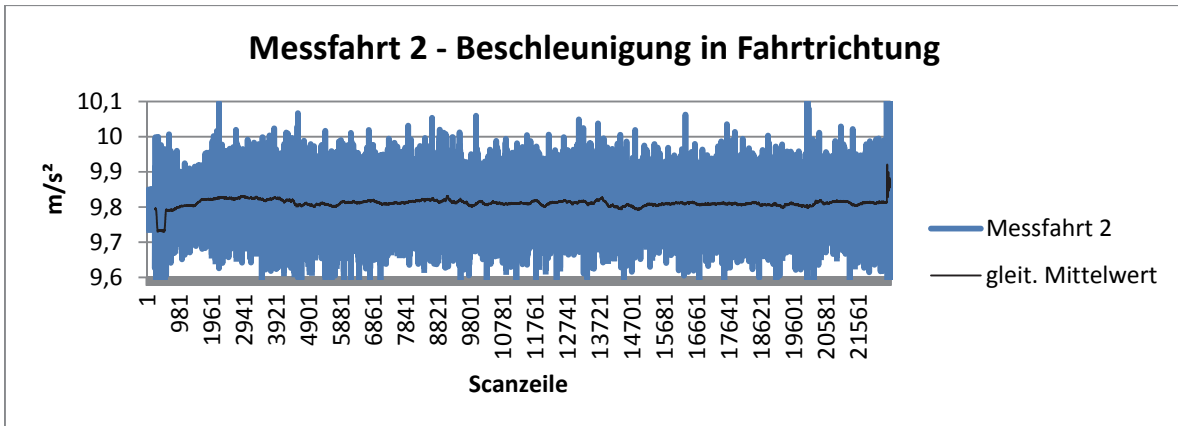


Abb. 3: Messfahrt 2 - Beschleunigung in Fahrtrichtung

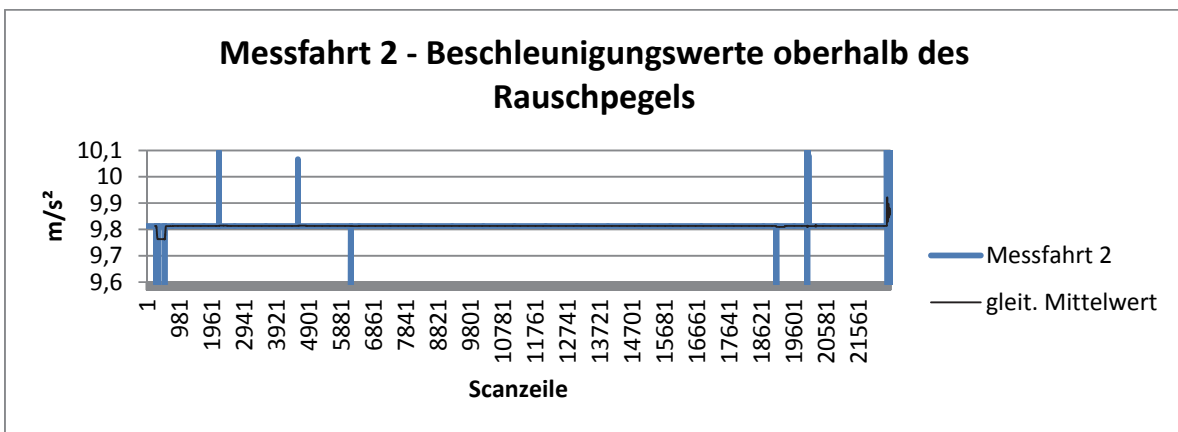


Abb. 4: Messfahrt 2 – Rauschunterdrückte Darstellung der Beschleunigungen aus Abb. 3

Ähnliche Ergebnisse liefern auch Messfahrt 3 und 4 (vgl. Abb. 5 und Abb. 6). Die Anzahl der Messwerte (bei gleicher Messfrequenz) macht deutlich, dass die Fahrt mit dem zweiten Aufzug etwas schneller war. Das Rauschen ist ähnlich stark wie bei Messfahrt 2.

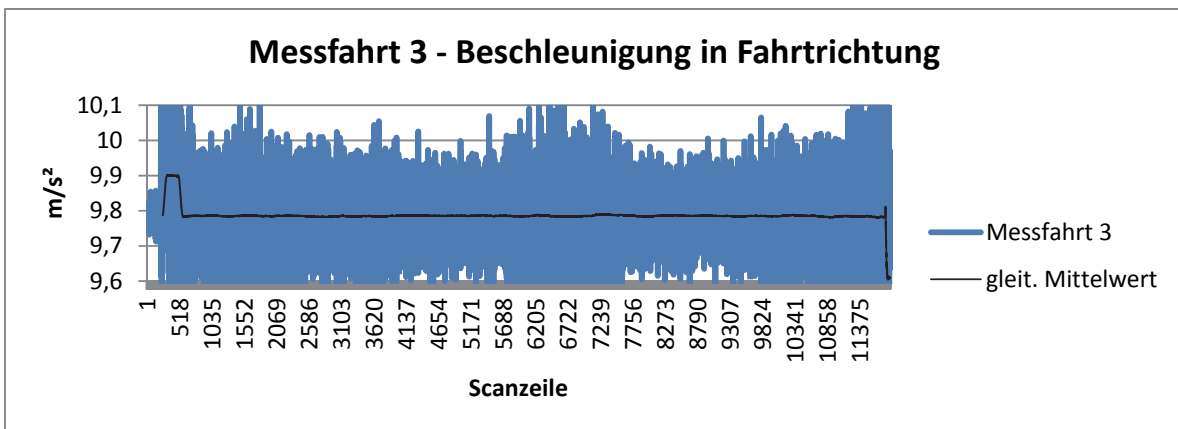


Abb. 5: Messfahrt 3 - Beschleunigung in Fahrtrichtung (Fahrt mit dem zweiten Aufzug)

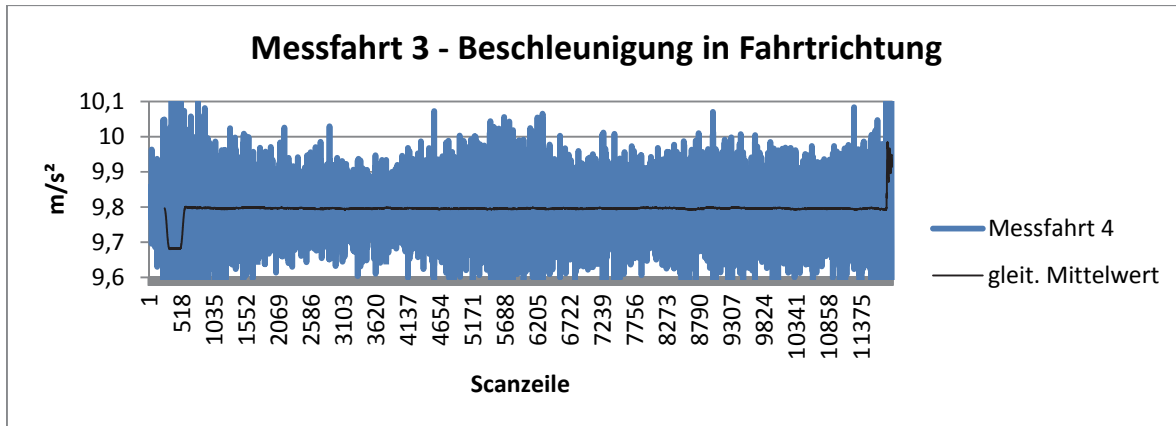


Abb. 6: Messfahrt 4 - Beschleunigung in Fahrtrichtung (Fahrt mit dem zweiten Aufzug)

Lässt sich die Drift der IMU-Sensoren hinreichend genau modellieren, sollten durch Integration der erfassten Beschleunigungen sowohl die Fahrgeschwindigkeit als auch der zurückgelegte Weg berechnet werden können. Da bei dieser Messung die Bewegungsrichtung entlang der Schwerebeschleunigung erfolgt, ist eine genaue Messung in dieser Achsrichtung essentiell. Die Drift hat sich als nicht hinreichend genau bestimmbar erwiesen, was zusammen mit dem Messrauschen zu einer zu ungenauen Positionsbestimmung führte. Um dennoch eine Auswertung zu ermöglichen, wurde ein alternativer Lösungsweg bestritten.

#### 4 Berechnung der Trajektorie und der 3D-Punktwolke

Mobile Mapping mit einem Aufzug unterscheidet sich vom fahrzeug- oder flugzeuggetragenen Mobile Mapping durch die sehr eingeschränkte Bewegung im Raum. Statt in drei Dimensionen findet die Bewegung näherungsweise nur in einer Dimension statt. Als weitere Besonderheit kommt hinzu, dass die Fahrgeschwindigkeit über nahezu die gesamte Strecke relativ konstant ist. Eine mit diesen Annahmen erzeugte Trajektorie modelliert eine gleichförmige geradlinige Bewegung. Die Länge entspricht in etwa der Schafthöhe und die Anzahl der Positionen die der aufgezeichneten Scanzeilen. Eine unter diesen Annahmen berechnete 3D-Punktwolke ist in der horizontalen Richtung im Wesentlichen durch die Messwerte des Scanners definiert. In der vertikalen Richtung müssen die berechneten Objektkoordinaten über Passinformation korrigiert werden. Eine solche Korrektur ist möglich, wenn zusätzlich bestimmte Höheninformation über das gescannte Objekt in die Berechnung einfließen kann.

Jeder Punkt der 3D-Punktwolke gehört zu einer Scanzeile und jede Scanzeile zu einem Punkt der Trajektorie. Aufgrund der speziellen Aufnahmesituation, bei der die Scanzeilen horizontal verlaufen, kann die Höhe aus dem Objekt einfach auf den Trajektorienpunkt übertragen werden. Drei Verfahren werden hierfür in Betracht gezogen:

1. Über den Turmdurchmesser  
Oberhalb des Erdgeschosses verjüngt sich der Turmschaft stetig. Dies ermöglicht eine Höhenbestimmung anhand des Schaftdurchmessers. Die Innenwand des Schafts ist zwar teilweise von Schaftinstallationen verdeckt, es gibt aber genügend Abschnitte, die eine Bestimmung des Innendurchmessers durch Einpassung eines Kreises/Zylinders erlauben. Für die Zuordnung zu einer bestimmten Höhe ist eine Einmessung in gewissen Abständen,

insbesondere bei Beschleunigungsänderungen notwendig. Zwischen den Kontrollmessungen werden die Höhen für jeden Trajektorienpunkt interpoliert.

## 2. Über Schaftelemente

Schaftelemente eignen sich vor allem dann, wenn sie regelmäßig und eindeutig sein. Die Stahlträger des Aufzugschachts bilden eine solche regelmäßige Struktur. Auf Grund Ihrer Nähe zum Fahrstuhl sind sie kaum von anderen Objekten verdeckt. Die Abstände zweier horizontaler Träger sind und treten in regelmäßigen Abständen auf. Die Eindeutigkeit ist dadurch gegeben, dass deren Anzahl feststellbar ist.

## 3. Über Messmarken

Im Turmschaft verteilt befinden sich reflektierende Messmarken aus einer vorausgegangenen tachymetrischen Vermessung. Da die Messmarken nicht speziell für das Mobile Mapping angebracht wurden und der Markentyp für den Einsatz im Laserscanning nicht besonders geeignet waren, sind diese nur vereinzelt in der 3D-Punktwolke abgebildet. Sie treten als quadratische Objekte in Erscheinung (vgl. Abb. 7), die auf Grund einer falschen Phasenauflösung zudem auch außerhalb des Turmschafts (Abb. 7, rechts, schwarze Punkte) abgebildet sind. Damit sind sie für eine Referenzierung ungeeignet.

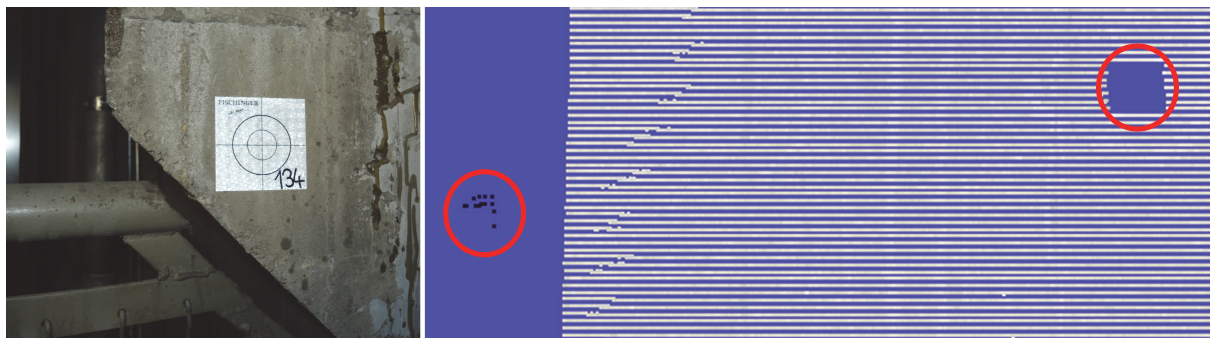


Abb. 7: Messmarke (links) und deren Abbildung in der 3D-Punktwolke (rechts)

Die Bestimmung der Höhe über den Schaftdurchmesser hat sich als ungeeignet erwiesen. Die Neigung der Wand ist zu gering und die Oberfläche zu uneben. Die Einpassung eines Kreis/Zylinders ist mit einer Genauigkeit von ca. 5mm je Durchmesser möglich. Dies hat zur Folge, dass eine Höhe mehreren Scanlinien bzw. Trajektorienpunkten zugeordnet werden kann. Folgendes Beispiel verdeutlicht das Problem: Bei der vorausgegangenen Tachymetermessung wurden für die Höhe „EG+5“ ein Durchmesser von 9.609m ermittelt, für die Höhe „EG+20“ nur noch 9.012m. Dies bedeutet eine Verringerung von 0.597m auf 15m Höhe. Für diesen Höhenunterschied benötigt der Fahrstuhl mit 0.35m/s ca. 42.8 Sekunden, in der 2057 Zeilen aufgezeichnet wurden. Bei einer gleichmäßigen Verjüngung des Schaftes verringert sich somit der Durchmesser um ca. 0.29mm zwischen zwei Scanzeilen. Bei einer Messgenauigkeit von 5mm je Durchmesser kann somit für 16 Zeilen dieser Durchmesser durch Einpassung erreicht werden und damit ist die Höhe mit 11.5cm Genauigkeit bestimmbar.

## 5 Beispiele zur Auswertung der Punktwolke

Durch die Referenzierung der Stahlträger entspricht die 3D-Punktwolke zwischen dem höchsten (Querstrebe 90) und tiefsten (Querstrebe 1) Referenzpunkt dem Sollwert von 133.44 Metern. Für die Querstrebe 40 beträgt die Soll-Höhe 542.895 Meter, die Ist-Höhe aus der 3D-Punktwolke 542.872 Metern. Dies entspricht einer Differenz von 2.3 cm auf ca. 65 Metern.

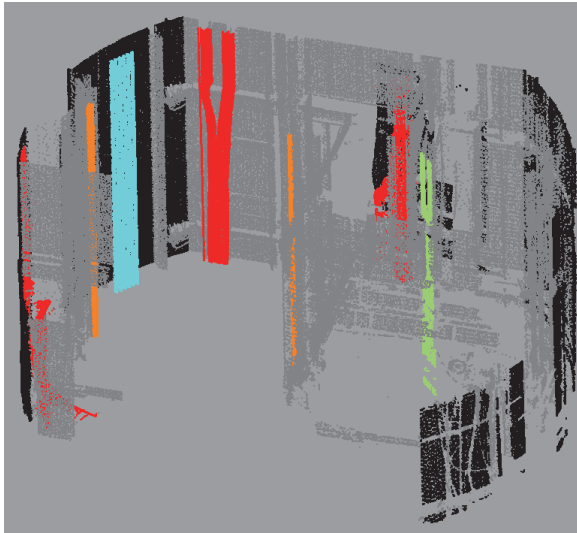


Abb. 9: Messpunkte Betonstütze

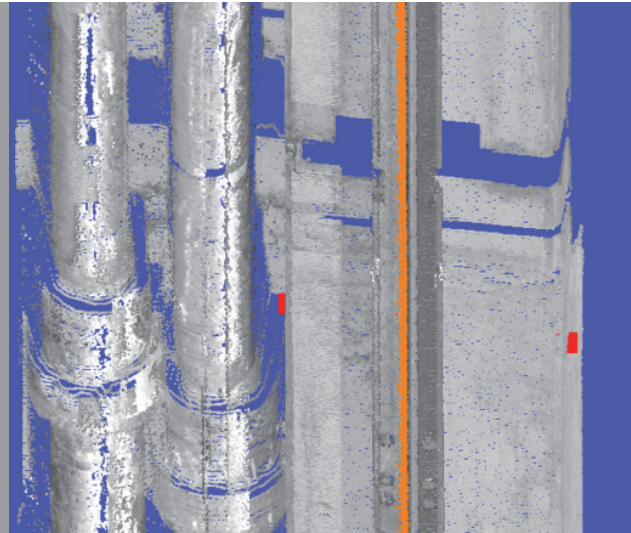


Abb. 8: Visualisierte Schaftelemente

Abb. 8 zeigt beispielhaft farblich hervorgehobene Schaftelemente. Schwarz eingefärbt ist die innere Schaftelemente. Schwarz eingefärbt ist die innere Schaftelemente, in Rot sind Rohrleitungen und Kabel, in Cyan die Seile des Gegengewichts, mit orange sind die Führungsschienen des Aufzugs und in Grün die Tragseile des benachbarten Aufzugs hervorgehoben.

Abb. 9 ist ein Ausschnitt in etwa auf der Höhe von Querstrebe 1 dargestellt. Im Vordergrund verläuft ist die orange eingefärbte Aufzugschiene. Im Hintergrund befindet sich rechts eine Betonstütze und links zwei Rohrleitungen. Auf den gegenüberliegenden Seiten der Stütze ist jeweils ein roter Punkt eingetragen. In dem Abstand zwischen den roten Punkten kommt die Breite der Stütze zum Ausdruck. Das Soll-Maß beträgt 0.505 Metern, das Ist-Maß 0.507 Meter.

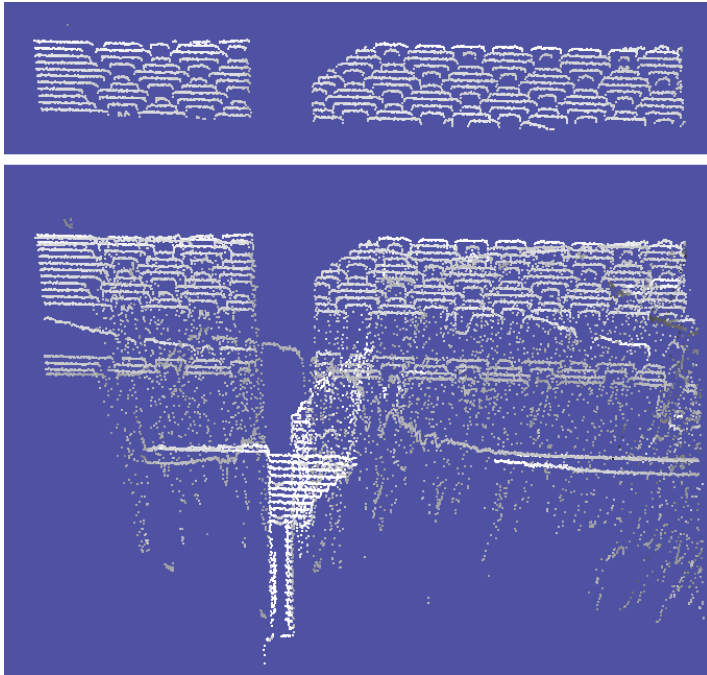


Abb. 10: Stahlträger hinter einem Maschendrahtzaun mit Messrauschen

Entscheidend für einen guten Scan ist der freie Blick auf die Objekte. Abb. 10 oben zeigt einen Stahlträger mit Maschendrahtzaun-Muster. Der Zaun ist zeitweise zwischen den Aufzügen angebracht. Der Zaun verhindert eine qualitativ hochwertige Erfassung und kann zudem ein starkes Rauschen verursachen, wie in Abb. 10 unten zu sehen.

## 6 Fazit und Ausblick

Das Mobile Mapping ist ein vielseitiges Verfahren, das im Outdoor-Bereich als fahrzeuggestütztes Mobile Mapping intensiv zum Einsatz kommt. Dass mit dem Mobile Mapping auch sehr spezielle Projekte bearbeitet werden können, ist am Beispiel der mobilen Erfassung von Punktwolken im Fernsehturm Stuttgart in diesem Beitrag demonstriert worden.

Statt aufwändiger Vorbereitungen und mehrtägiger Vermessungsarbeiten konnte in wenigen Stunden ein Großteil des Turmschafts mobil gescannt werden. Aus den 3D-Punktwolken lassen sich Elemente wie Rohrleitungen, Kabel und Stahlträger extrahieren und kartographieren.

Eine Herausforderung bei speziellen Anwendungen im Indoor-Bereich bleibt die genaue Bestimmung der Position, bei freien 3D Bewegungen im Raum auch die Bestimmung der Rotation der sich bewegenden Plattform. Die Positionsbestimmung durch inertielle Messung mit der verwendeten Xsens IMU hat sich als zu ungenau herausgestellt. Die Auswertung konnte sich aber zunutze machen, dass die Bewegung während der Messung nahezu linear und gleichmäßig verlief. Zu Bestimmung der Höhe müssen dann zusätzlich Passinformationen zur Verfügung stehen.

Mit einer entsprechenden Vorbereitung lässt sich die Qualität dieser Art der Vermessung leicht verbessern. Von Vorteil wären geeignete Scanmarken, über die nicht nur die Höhe eingebracht werden kann, sondern die auch als Verknüpfungspunkte zwischen den vier 3D-Punktwolken dienen würden. Erfolgt die Einmessung der Marken vom Dach des Aufzugs, lässt sich der Aufwand und Zeitbedarf gering halten. Alternativ könnte auch die Höhe des Aufzugs bzw. des Scanners während der Messung von einem fixen Referenzpunkt aus bestimmt werden.