

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“
Arbeitskreis 4 „Ingenieurgeodäsie“

Terrestrisches Laserscanning 2017 (TLS 2017)

Beiträge zum 165. DVW-Seminar am
11. und 12. Dezember 2017 in Fulda



Schriftenreihe des DVW
Band 88/2017

Wißner

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“
Arbeitskreis 4 „Ingenieurgeodäsie“

Terrestrisches Laserscanning 2017 (TLS 2017)

Beiträge zum 165. DVW-Seminar am
11. und 12. Dezember 2017 in Fulda

Redaktion:
Jens-André Paffenholz

Herausgeber:
DVW – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement e.V.



Schriftenreihe des DVW
Band 88
Wißner-Verlag

Herausgeber:
DVW – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement e. V.

www.dvw.de
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW
Band 88

Tipps zur Navigation in der PDF-Datei:

Die PDF enthält zur Navigation Lesezeichen und Hyperlinks.
Der Mausklick auf ein Lesezeichen führt zur ersten Seite des angewählten Beitrags.
Der Mausklick auf einen dunkelblau markierten Abbildungs- oder Tabellenverweis im Text führt zur verknüpften Abbildung oder Tabelle. Zurück zur ursprünglichen Stelle im Text gelangt man mit dem Klick auf den dunkelblau markierten Verweis in der Abbildungsunterschrift oder Tabellenüberschrift.
Internetadressen und E-Mail-Adressen sind ebenfalls mit Hyperlinks hinterlegt.
Kostenfreier PDF-Download unter www.geodesie.info.

Zitierhinweis:

[Nachname, Vorname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.):
Terrestrisches Laserscanning 2017 (TLS 2017). DVW-Schriftenreihe,
Band 88, Augsburg, 2017, S. x-y.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-95786-145-0
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2017
www.geodesie.info

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg
Bildnachweis Cover: Geodätisches Institut der Leibniz Universität Hannover

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede
Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen
bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlags.

Inhalt

Vorwort	5
---------	---

Session 1: Einführung und neue Methoden

Alexander Reiterer Katharina Predehl Markus Leidinger Die Entwicklung von Laserscannern – Herausforderungen bei neuartigen Anwendungen	9
Ingo Neumann Ulrich Stenz Axel Timmen Uwe Krause Torsten Genz Norbert Haala Alessandro Cefalu Kollaborative Erfassung und Qualitätsbeurteilung von TLS- und UAV-Daten	23

Session 2: Fusion von terrestrischem Laserscanning und bildgestützten Punktwolken

Wolfgang Wiedemann Andreas Wagner Peter Wasmeier Thomas Wunderlich Monitoring mit scannenden bildgebenden Tachymetern	31
Markus Gerke Benjamin Rein Yahya Ghassoun Handgeführte 3D-Scansysteme zur Vervollständigung von Punktwolken aus terrestrischen oder mobilen Laserscannern	45
Wolffried Wehmann Martin Oczipka Philipp Knötzsch Matthias Schramm Vergleichende Untersuchungen zur Erfassung und 3D-Modellierung des Kreisels der Bobbahn Altenberg mit unterschiedlichen Aufnahme- technologien	59
Ludwig Hoegner Uwe Stilla Fusion von TLS-Punktwolken mit Thermalbildern zur Inspektion von Bauwerken	73

Session 3: Laserscanning im interdisziplinären Umfeld

Frank Knospe	
Erfahrungsbericht zur Mobilen Multi-Sensorik der Stadt Essen – Erfassung des Straßenraumes mittels Foto, Laserscanner und Georadar	87
Stephan Och	
Terrestrisches Laserscanning am Flughafen Frankfurt/Main für Facility Management-Aufgaben	103
Jens-André Paffenholz Ulrich Stenz Daniel Wujanz Frank Neitzel Ingo Neumann	
3D-Punktwolken-basiertes Monitoring von Infrastrukturbauwerken am Beispiel einer historischen Gewölbebrücke	115

Session 4: Projekte und Zukunftsfelder

Christoph Held Christoph Fröhlich Markus Mettenleiter Douglas Pritchard Heinz Rüther Christopher Wickenden	
New Workflows for the TLS Documentation of Cultural Heritage Sites on the Example of Worldwide Projects	131
Andreas Ullrich Christoph Fürst	
Vollautomatischer Ansatz für die Onboard-Datenregistrierung im terrestrischen Laserscanning	145
Kai Steuernagel Holger Hustedt	
3D-Scanning – Vom 3D-Aufmaß über die Projektierung bis zur 3D-Erstel- lung im Fernwärmeleitungsbau unter schwierigsten Bedingungen	155

Vorwort

Das terrestrische Laserscanning (TLS) ist inzwischen ein voll etabliertes Messverfahren. Es besitzt ein enormes Leistungsspektrum und eröffnet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten sowohl innerhalb der klassischen Berufsfelder der Geodäsie als auch in angrenzenden Bereichen. Das enorme technologische Potenzial hat neue Anwendungs- und Geschäftsfelder für den Berufsstand der Geodäten geschaffen, wobei die konkreten projektbezogenen Lösungen oft auch in Kooperation mit Experten der Nachbardisziplinen entwickelt und realisiert werden.

Die große Akzeptanz und die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten des TLS im Bereich der Geodäsie und den Nachbardisziplinen gepaart mit den sehr aktiven und innovativen Forschungstätigkeiten an den Universitäten und Hochschulen liefern ein großes Wissensspektrum in diesem Bereich. In dem zweitägigen DVW-Seminar mit seinen vier Sessions können daher nur ausgewählte Aspekte präsentiert und diskutiert werden. Der Fokus in diesem Jahr liegt auf der Fusion von 3D- und bildgestützten Punktwolken, dem Laserscanning im interdisziplinären Umfeld sowie auf zukunftsorientierten Anwendungsfeldern. Eingeleitet wird das Seminar durch Ausführungen zur Entwicklung von Laserscannern und der Herausforderungen bei neuartigen Anwendungen sowie kollaborativen Methoden der Datenerfassung.

Die Zielgruppe des Seminares sind die Kolleginnen und Kollegen aus der Wirtschaft, den Behörden sowie der Forschung und Ausbildung aus den Bereichen der Geodäsie, der Geoinformation und aus Nachbardisziplinen, die sich über dieses hochaktuelle Teilgebiet der elektrooptischen Messtechnik umfassend und unabhängig von Anbietern informieren möchten.

Die Organisatoren und die DVW-Arbeitskreise 3 »Messmethoden und Systeme« sowie 4 »Ingenieurgeodäsie« freuen sich darauf, mit Ihnen in Fulda Anregungen und Gedanken zu diesem weiterhin zukunftsorientierten, innovativen Thema auszutauschen. Ein abschließender Dank geht an alle, die bei der Entstehung dieses Tagungsbandes durch ihre sorgfältig ausgearbeiteten schriftlichen Beiträge mitgewirkt haben.

Jens-André Paffenholz und Ingo Neumann
Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut

Session 1: Einführung und neue Methoden

Die Entwicklung von Laserscannern – Herausforderungen bei neuartigen Anwendungen

Alexander Reiterer | Katharina Predehl | Markus Leidinger

1 Einleitung

Die meisten Anwender nutzen Laserscanner als ausgereifte Messmaschine, die Millionen von Messpunkten erzeugt – zuverlässig und schnell. Technisch gesehen, ist der Laserscanner für viele Nutzer eine „Black-Box“ (DVW 2014). In der Regel sehen die Nutzer keinen Grund, die verwendeten Messmethoden und Technologien zu kennen und zu verstehen. Dabei sind Messfehler und Unzulänglichkeiten in der 3D-Punktwolke mitunter auch auf die zugrundeliegenden Technologien zurückzuführen: Zeigt beispielsweise die Scan-Aufnahme einer Mauer in konstantem Abstand vor oder hinter der Mauer das „Geisterbild“ einer zweiten Wand, so kann man daraus in den allermeisten Fällen schließen, dass es sich um ein phasenmessendes System mit mehreren Modulationsfrequenzen handelt, bei dem die Verknüpfung der Grob- zur Feinphase nicht fehlerfrei funktioniert hat. Fehlinterpretation und die daraus resultierende mühsame Be seitigung durch Software sind die Folge, obwohl solche Probleme bereits durch das Hardwaredesign vermieden werden könnten.

Die dreidimensionale Erfassung und Digitalisierung großer Flächen gewinnt zunehmend an Bedeutung. 3D-Daten von Gleisen, Straßen, Brücken oder Gebäuden sind eine wertvolle Grundlage für die Instandhaltung. Auch die Überwachung großer Landstriche mit komplexer Topologie mithilfe von Laserscannern ist heute Stand der Technik. So lassen sich beispielsweise Georisiken frühzeitig erkennen oder der Zustand der Vegetation großflächig kartieren.

Klassische Verfahren wie das Airborne Laserscanning (ALS) und das Terrestrial Laserscanning (TLS), werden zunehmend durch mobiles Laserscanning (MLS) ergänzt oder sogar abgelöst. Bei letzterem wird die Objekterfassung von bewegten Plattformen, wie Autos, Zügen oder Booten, aber auch von kleinen unbemannten Flugzeugen durchgeführt. Der Trend geht dabei zunehmend in Richtung Mehrparametererfassung durch Multisensorsysteme, mit denen in einer einzelnen Messung z. B. geometrische, spektrale und/oder thermische Informationen gesammelt werden.

Die Digitalisierung und Speicherung der teilweise enormen Datenmengen geschieht mittels neuester Breitbandtechnologie zunehmend vollautomatisiert. Neueste Forschungsansätze bedienen sich künstlicher neuronaler Netze, um die Datenauswertung und -interpretation zu automatisieren. Somit werden Objekte nicht nur in kürzester Zeit erfasst, sondern können auch bestimmten Objektklassen wie z. B. Asphalt, Verkehrsschild oder auch Vegetation zugeordnet werden.

1.1 Aufbau und Funktionsprinzip mobiler Laserscanner

Grundlage für die Erfassung einer Distanz mithilfe optischer Messsysteme ist die Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit. Sie ist mit $c_0 = 2,99792458 \cdot 10^8$ m/s eine der am besten bekannten Naturkonstanten. Seit 1983 wird sogar unsere Längeneinheit „Meter“ mithilfe der Lichtgeschwindigkeit definiert, nämlich mit 1/299792458 des Weges, den Licht in einer Sekunde im Vakuum zurücklegt. Breitet sich Licht nicht im Vakuum, sondern in einem transparenten Medium – z. B. in der Atmosphäre oder in Glas – aus, so ist seine Geschwindigkeit immer um den Faktor der Brechzahl dieses Mediums kleiner. Nutzt man also die Lichtgeschwindigkeit zur Messung von Distanzen, so verlangen präzise Messungen immer auch die genaue Kenntnis der Brechzahl des Ausbreitungsmediums. Häufig hängt diese zudem von der Wellenlänge des verwendeten Lichts und den Umgebungsbedingungen wie z. B. Temperatur oder Wassergehalt ab.

Unabhängig von der verwendeten Technik ist das Kernprinzip jedes Laserscanners die präzise Bestimmung der Lichtlaufzeit Δt zum Messobjekt und zurück. Die Distanz l_m ergibt sich mithilfe des Brechungsindex n des umgebenden Mediums zu

$$l_m = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cdot n}. \quad (1)$$

Das Prinzip der Abstandsmessung ist in Abb. 1 dargestellt. Es gibt verschiedene Verfahren, um die Zeitpunkte t und $t + \Delta t$ im Gerät so exakt wie möglich zu messen. Meist kommen entweder das Phasenmodulations- oder das

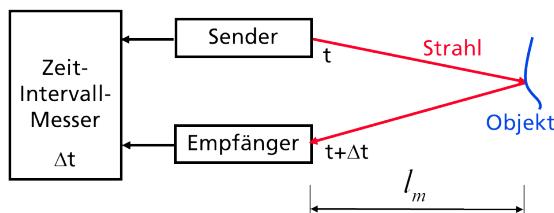


Abb. 1:
Das Prinzip der Distanzmessung auf Basis von Lichtlaufzeit

Pulslaufzeitverfahren zum Einsatz. Die beiden Methoden unterscheiden sich vor allem im maximalen Messbereich: Große Distanzen sind die Domäne der Pulslaufzeitgeräte, hohe Geschwindigkeit und hohe Ortsauflösung die Stärke der Phasenvergleichssysteme.

1.2 Pulslaufzeitverfahren

Beim Pulslaufzeitverfahren sendet das Gerät kurze Laserpulse (typischerweise im ns-Bereich) aus und bestimmt die Distanz zum Messobjekt direkt durch die Zeit, welche das Licht auf dem Hin- und Rückweg benötigt. Die Entfernung ergibt sich wie aus obiger Formel ersichtlich direkt durch elektronisches Abrastern der ausgehenden sowie der zurückkommenden Pulse. Die Signalqualität und damit auch die erreichbare Distanzgenauigkeit wird durch die zur Verfügung stehende Laserenergie pro Puls, die Pulsform, die Pulswiederholrate sowie die erreichbare Zeitauflösung des Empfängers bestimmt. Pulslaufzeitgeräte sind häufig für größere Distanzen ausgelegt, dafür genügt in der Regel die Auflösung im cm-Bereich, die sich im Einzelpulsbetrieb mit heutigen Zeitmessbausteinen (DTC = Digital-to-Time-Converter) realisiere lässt. Mit einem Baustein mit 50 ps Zeitauflösung erzielt man ca. 7 mm Abstandsauflösung, wobei deutlich größere Fehlerbeiträge aus der großen Dynamik der Empfangssignale, der Stabilität der Pulsform, Nichtlinearitäten in der Zeitmesseinheit sowie bei großen Distanzen auch von atmosphärischen Einflüssen stammen können. Für eine höhere Auflösung und Genauigkeit wird häufig über mehrere Pulse gemittelt. Das Pulslaufzeitverfahren eröffnet die Möglichkeit, mehrere Echos, die von unterschiedlichen teiltransparenten Objekten auf der Messstrecke, wie Fenster, Zäune, Vegetation etc. herrühren, auszuwerten. Einfache Geräte werten nur den ersten Echoimpuls aus, die Entwicklung sehr schneller Analog/Digitalwandler ermöglicht heute jedoch auch die Speicherung des kompletten zeitaufgelösten Echosignals und damit die Extraktion von mehr Details (Full-Waveform-Analyse) (Mallet und Bretar 2009, Still et al. 2009).

1.3 Phasenmodulationsverfahren

Beim Phasenmodulationsverfahren wird die Intensität des Senders (praktisch immer ein Halbleiterlaser) hochfrequent mit einer Radiofrequenz f_{mod} moduliert. Die Laufzeit des Lichts zum Ziel und wieder zurück Δt wird aus der Phasenverschiebung zwischen Sende- und Empfangssignal gewonnen und die Distanz ergibt sich zu

$$l_m = \frac{c \cdot \varphi}{4\pi \cdot f_{mod} \cdot n} . \quad (2)$$

Die Phase ist nur im Intervall $0 \dots 2\pi$ bestimmbar und variiert periodisch mit dem Abstand. Da das Licht die Messdistanz zweimal durchläuft, entspricht die Periodenlänge der halben Wellenlänge des Modulationssignals. Bei 150 MHz beträgt die Periodenlänge und damit auch der eindeutige Messbereich gerade 1 m. Um die Distanz eindeutig und mit hoher Auflösung zu bestimmen, moduliert man meist mehrere Sendelaser gleichzeitig mit verschiedenen Frequenzen.

Ein Vergleich beider Techniken zeigt, dass Scanner, welche mit dem Phasenmodulationsverfahren arbeiten, im Vergleich zu Scannern, welche auf dem Pulslaufzeitverfahren basieren, günstiger in der Herstellung sind und eine höhere Auflösung erreichen. Dem gegenüber steht die Zusatzinformation, die in der Multi-Echoanalyse aus den digitalisierten Pulszügen gewonnen werden kann. Für beide gilt, dass moderne Systeme auch die Intensität des rückgestreuten Lichts aufzeichnen. Die Auswertung der Intensität des rückgestreuten Lichts ermöglicht es, zusätzlich zur Geometriemessung ein fotorealistisches Abbild der Umgebung zu erzeugen. Um unabhängig von Lichtquelle und Empfangselektronik zu sein, können parallele Systemansätze realisiert werden. Voraussetzung für die Erzeugung eines idealen Abbilds des Messobjekts sind definierte Lichtwellenlängen, ein ideal geformter Messstrahl und parallelisierte Detektoren. Der Aufzeichnung dieser Zusatzinformation kommt vor allem bei der Strukturerkennung (siehe [Kap. 2.1](#)) sowie bei der automatisierten Objektklassifizierung (siehe [Kap. 2.2](#)) höchste Bedeutung zu.

1.4 Lichtablenkung

Um ein 3D-Abbild der Umgebung zu generieren, benötigt es mehr als eine einzelne lineare Distanzmessung: der Laserstrahl muss über die Umgebung geführt werden und so seine Umgebung profilartig „abtasten“. Dies kann durch den Einsatz von elektronisch gesteuerten Strahlablenkeinheiten erfolgen. Meist handelt es sich hierbei um speziell beschichtete, hoch-reflektierende Elemente, welche in Form von Polygonen, Einzelspiegeln oder Mikrospiegeln ausgeführt sind (siehe [Abb. 2](#)). Aus der Winkelposition des Reflektors kann die Ausrichtung des Lasers im Raum bestimmt werden. Dazu sind die Ablenkeinrichtungen und ihre

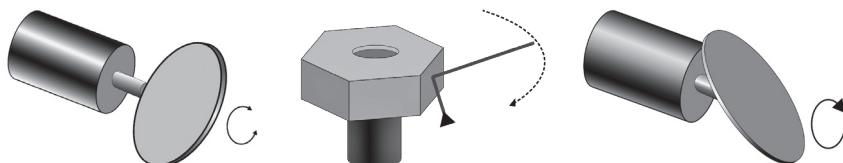


Abb. 2: Typische Scanspiegel: Spiegelgalvanometer (links), Polygonspiegel (Mitte), 45°-Spiegel (rechts)

entsprechenden Drehmotoren mit hochauflösenden Encodern versehen. Über polares Anhängen kann dann aus Winkelposition und Distanz eine 3D-Koordinate bestimmt werden.

Die Rotationsfrequenz der Ablenkeinrichtung ist maßgeblich für die Scanfrequenz (Scanrate) des entsprechenden Gerätes. Erzeugt ein 45°-Spiegel, welcher mit 100 Hz dreht, direkt 100 Profile pro Sekunde, generiert ein Polygonspiegel mit 8 Spiegelflächen gleich 800 Profile. Die Ablenkeinheit ist aber auch für den Scanwinkel bestimmt. Ist ein 45°-Spiegel grundsätzlich in der Lage volle 360° zu erfassen, kann mit einem Polygonspiegel immer nur ein ausgewählter Winkelbereich (Sektor) erfasst werden.

1.5 Registrierung und Referenzierung

Um einzelne Punktwolken verknüpfen und das erfasste Objekt später im Raum verorten zu können, muss die Position des Scanners in Bezug auf ein globales Koordinatensystem exakt bekannt sein. Dazu werden heute unterschiedliche Methoden und Ansätze verfolgt. So kann der Laserscanner direkt mit einem entsprechenden Orientierungs- und Positionierungssystem verbunden werden (direkte Registrierung und Georeferenzierung), entsprechende Messmarken mit bekannten Objektkoordinaten einbezogen werden (indirekte Registrierung und Georeferenzierung) oder homologe Punkte in den Punktwolken identifiziert werden (datengetriebene Registrierung und Referenzierung).

1.6 Datenprozessierung

Messraten von bis zu 2 Millionen Punkten pro Sekunde zusammen mit den Encoderwerten und den Daten von Orientierungs- und Positionierungssystemen stellen höchste Anforderungen an Bandbreite und Auflösung des Detektionskanals bei gleichzeitig hoher Sensitivität auch für die kleinsten Signalechos. Als Detektoren kommen häufig Avalanche-Photodioden (APDs) und Photomultiplier zum Einsatz, immer öfter auch in Form von großflächigen Arrays, um die Auflösung noch weiter zu erhöhen. Gerade das Pulslaufzeitverfahren erfordert Digitalisierungselektronik mit Bandbreiten von mehreren Gigahertz. Bei Anwendungen, bei denen der Stromverbrauch kritisch ist, kann eine einfachere Variante basierend auf einer simpleren „first pulse – last pulse“-Technik eine bessere Option darstellen. Ein Großteil der eigentlichen Datenprozessierung erfolgt heute im Nachgang zur Datenerfassung (Post-Processing).

2 Anwendungsbeispiele und Trends

Die aktuellen Anwendungen, die heute mit Laserscanning bedient werden, sind vielseitig, eine Gliederung fällt daher schwer. Prinzipiell lässt sich das Anwendungsspektrum nach „statischen“ und „mobilen“ Ansätzen unterteilen. Wird unter statischen Anwendungen (in der Geodäsie) heute vielfach das klassische terrestrische Laserscanning verstanden, so wird die Vielfalt im Bereich der mobilen Anwendungen schnell unüberschaubar. Flugzeuge, Roboter, Schienenfahrzeuge, Straßenfahrzeuge und Menschen sind nur einige der in den letzten Jahren vermehrt eingesetzten „Trägerplattformen“. Bei mobilen Anwendungen tritt die Bedeutung der Präzision des Laserscanners zunehmend in den Hintergrund – die Gesamtgenauigkeit der erfassten Messpunkte wird vom Positionierungs- und Orientierungssystem dominiert. Erschwerend hinzu kommt nun, dass zunehmend Trägerplattformen eingesetzt werden, die nur eine beschränkte Masse tragen und zuverlässig bewegen können (z. B. kleine unbemannte Flugzeuge). Das Thema der Gewichtsoptimierung spielt aber nicht nur beim Laserscanner, sondern auch bei der betreffenden Positionierungs- und Orientierungssensorik eine herausragende Rolle. Daher werden zunehmend neue Ansätze erforscht und umgesetzt, die auf der einen Seite versuchen, auf Basis kleiner, meist auf MEMS basierter Sensoren, Gesamtsysteme mit ausreichend leistungsfähiger Positionierung und Orientierung zu realisieren. Auf der anderen Seite wird versucht, aus den Laserscandaten selbst oder mit adaptiven optischen Sensoren (z. B. Kameras) Zusatzinformationen zu erfassen, die dann für den Orientierungsprozess verwendet werden können. Die Anwendungen, die sich aus kleinen, mobilen und zugleich präzisen Systemen ergeben, sind breit gefächert – das Potenzial für die Zukunft ist vielversprechend.

Nachfolgend werden zwei Anwendungsszenarien näher betrachtet. Im ersten Beispiel wird versucht, den Themenkomplex „Scannen von mobilen Plattformen aus“ zu umreißen, im zweiten Beispiel ein aktueller Ansatz der „Dateninterpretation“ skizziert.

2.1 Hochauflösendes Laserscanning von bewegten Plattformen

Wie in [Kap. 1](#) dargestellt, ermitteln Laserscanner die Geometrie von Objekten und Oberflächen mithilfe von Abstandsmessungen. Integriert auf beweglichen Plattformen wie Fahrzeugen, zivilen Drohnen, Schiffen oder Zügen werden für solche Systeme auch bei hoher Fahrgeschwindigkeit Auflösungen in der Abstandsmessung im Bereich von Millimetern und Punktdichten von über 1.000 pro m² (abhängig von der Anwendung) erreicht. Mit immer leistungsfähigeren Lasern und elektronischen Komponenten werden Messraten, Auflösung und in letzter Instanz auch die Distanzgenauigkeit stetig weiter verbessert.

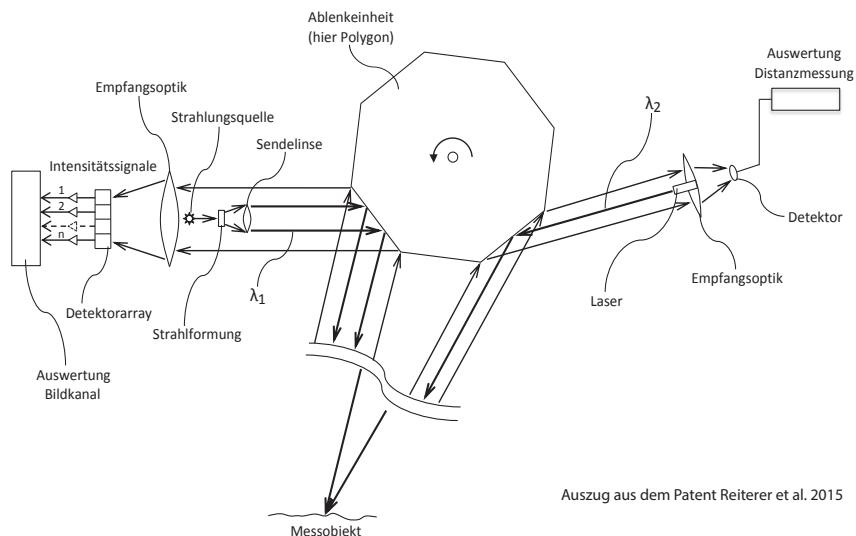
Komponenten wie MEMS-basierte Mikrospiegel als Ablenkeinheit oder elektronisch ansteuerbare Linsensysteme versprechen einen weiteren Fortschritt bei der Miniaturisierung und der Gewichtsreduktion.

Der Trend geht aber auch deutlich in Richtung Mehrparametererfassung durch Multisensorsysteme. So können neben der reinen Geometrie auch wichtige Zusatzparameter wie Risse, Feuchtigkeit oder der Düngegrad eines Feldes erfasst bzw. bestimmt werden. Häufig sind spektrale Parameter von Interesse, wie z. B. der Grünanteil in Blättern, oft aber auch Intensitätswerte oder die Oberflächentemperatur des Objektes. Neueste Ansätze versuchen diese Anforderungen mit rein laserbasierten Techniken zu lösen und weitgehend auf Kameras oder andere disjunkte Sensorik zu verzichten. Dies hat den Vorteil, dass die Daten leichter fusioniert werden können; auch sind die Datenmengen im Allgemeinen deutlich geringer. Darüber hinaus besteht großenteils eine Unabhängigkeit gegenüber Umgebungslicht.

Beispielhaft soll hier die Entwicklung eines hochauflösenden Laserscanners zur Erfassung der Straßenoberfläche durch das Fraunhofer IPM angeführt werden. Die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche ist wichtig für Sicherheit und Komfort im Straßenverkehr. Je genauer die Messdaten sind, desto besser können Baumaßnahmen geplant und desto effizienter die dafür vorgesehenen finanziellen Mittel eingesetzt werden. So lässt sich die Qualität von Infrastruktur dauerhaft sichern. 2012 wurde daher der sog. Pavement Profile Scanner (PPS) eingeführt (Reiterer et al. 2012). Der Laser scannt die Straßenoberfläche quer zur Vorwärtsbewegung des Messfahrzeugs mithilfe eines rotierenden Polygonspiegels und erzeugt dabei 800 Querprofile pro Sekunde. Bis zu 2 Millionen Mal pro Sekunde wird die Entfernung zur Straßenoberfläche gemessen, sodass jedes Profil aus bis zu 1.800 Messpunkten besteht.

Die gewonnenen Messwerte werden auf Plausibilität geprüft und mit verschiedenen Filteroperationen so aufbereitet, dass ein dreidimensionales Abbild der Straßenoberfläche entsteht. Bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h liegen innerhalb der zu betrachtenden Flächenelemente von beispielsweise $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ noch immer bis zu einhundert 3D-Messpunkte.

Dieser Ansatz eignet sich hervorragend für die Erfassung der Querebenheit der Straße, versagt aber aufgrund des Punktabstandes bei der Erfassung von kleinen Rissen. Daher wurde die Geometriemessung durch eine hochauflösende und parallel ablaufende Intensitätsmessung ergänzt (siehe [Abb. 3](#) und [Abb. 4](#)). Zur Steigerung der Auflösung wird nicht mehr ein einzelner Detektor, sondern ein Detektorarray eingesetzt. Damit kann erreicht werden, dass sowohl in Fahrtrichtung als auch quer dazu ein maximaler Punktabstand von 1,2 mm vorhanden ist. Ein weiterer Vorteil der Trennung von Geometrie- und Intensitätsmessung ist die Möglichkeit unterschiedliche Wellenlängen einzusetzen. Durch diese enorme Auflösung lassen sich nun



Auszug aus dem Patent Reiterer et al. 2015

Abb. 3: Rechts der Systemteil für die Erfassung der Geometrie, links der Teil für die Erfassung der Intensität über eine eigene Laserquelle und ein entsprechendes Detektorarray

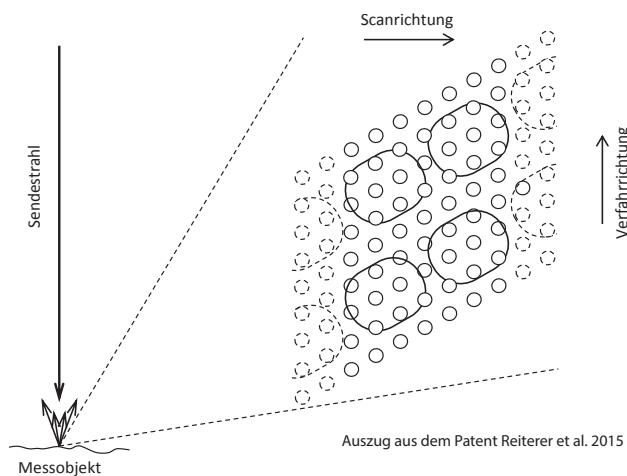


Abb. 4:
Prinzip der Daten-
erfassung: die
großen Punkte
deuten die Geo-
metriemessung an,
die kleinen Punkte
die viel höher auf-
lösende Intensitäts-
messung.

„Bilder“ generieren, welche für die Risserkennung eingesetzt werden können (siehe [Abb. 5](#)).

Ein Vorteil, der sich gegenüber Kamerasystemen ergibt (welche heute eine ähnliche räumliche Auflösung schaffen), ist, dass keine zusätzliche externe Beleuchtung verwendet wird und die Datenerfassung völlig unabhängig vom Um-

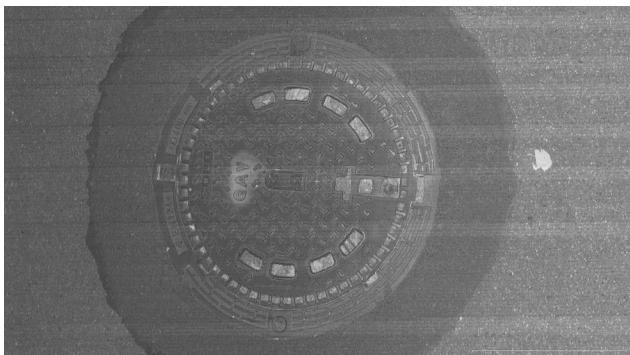


Abb. 5:
Straßenobjekt, welches mit 80 km/h überfahren wurde und trotzdem mit einer enormen Detailwiedergabe erfasst werden kann.

gebungslicht ist. Die Datenerfassung kann daher auch bei Nacht erfolgen. Das entwickelte System ist zudem augensicher (Laser Class 1) nach IEC60825 und kann daher im öffentlichen Raum bedenkenlos eingesetzt werden.

2.2 Automatisierte Interpretation von 3D-Daten

Bei der Zustandserfassung von Großstrukturen wie Verkehrswegen, Bauwerken oder landwirtschaftlich genutzten Flächen fallen enorme Mengen an Bild- und 3D-Daten an, die heute in der Regel manuell ausgewertet werden. Das ist zeitaufwändig und teuer. Deshalb setzen neuartige Forschungsansätze auf eine automatisierte Auswertung mit Ansätzen des „Deep Learning“. Ergebnis ist eine semantische Segmentierung der Bilder, bei der jedes Pixel bzw. jeder 3D-Punkt einer bestimmten Objektklasse zugeordnet wird (März 2016).

„Deep Learning“ ist als Methode des „Machine Learning“ ein Teilbereich der künstlichen Intelligenz und setzt auf lernende Algorithmen. Das Identifizieren und Klassifizieren von Objekten, wie beispielsweise die Erkennung eines vordefinierten Objektes (z. B. Verkehrsschild) in einem Bild, erfolgt anhand von Trainingsdatensätzen. Der Ansatz basiert auf künstlichen neuronalen Netzen (KNN) und ist klassischen Methoden der Objekterkennung überlegen. Noch vor wenigen Jahren dauerte das Training solcher Algorithmen Wochen oder gar Monate. Heute ist dieser Prozess dank massiver Parallelisierung in wenigen Stunden möglich. Die Auswertung neuer Datensätze auf Basis eines trainierten KNN erfolgt dann sogar in Echtzeit. In KNN durchläuft die eingespeiste Information eine Vielzahl miteinander verknüpfter künstlicher Neuronen, wird verarbeitet und an weitere Neuronen weitergegeben (siehe Abb. 6).

Im Bereich der 2D-/3D-Datenverarbeitung sind insbesondere die sog. Convolutional Neural Networks (CNNs oder ConvNets) von Interesse (siehe Abb. 7). Diese machen sich die Tatsache zunutze, dass Informationen in Bildern meist lokal, d. h. auf einen kleineren Teilbereich des Bildes beschränkt sind. Deshalb

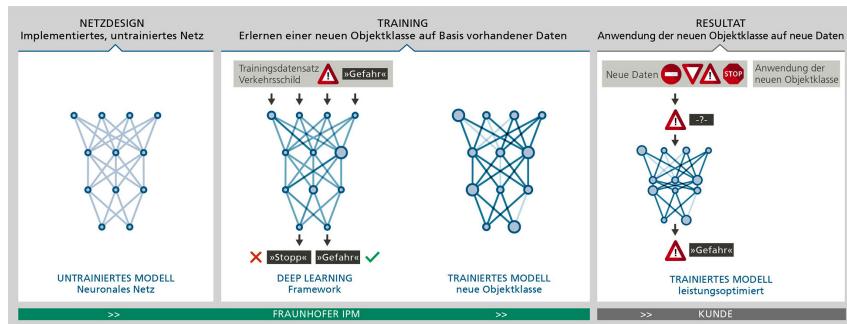


Abb. 6: Das Training künstlicher neuronaler Netze (KNN) erfolgt innerhalb weniger Stunden. Neue Datensätze werden mithilfe des trainierten KNN in Echtzeit ausgewertet.

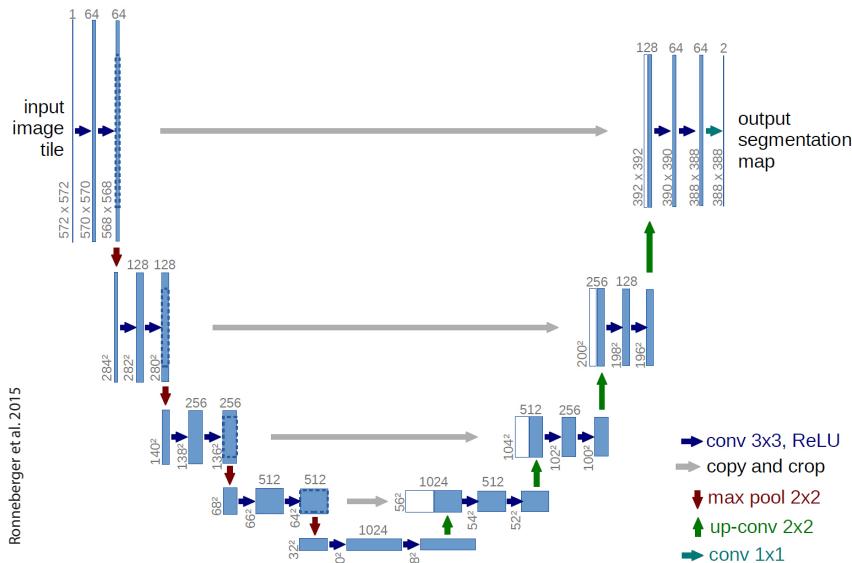


Abb. 7: Schema der Architektur eines Up-Convolutional Networks für die semantische Segmentierung von Bildern. Der linke Teil übernimmt die Klassifizierung, während die Information über die Lokalisierung von Objekten verloren geht. Der rechte Teil stellt diese Information durch Up-Sampling wieder her.

können für die Analyse des Bildinhaltes Filter verwendet werden, welche nur einen kleinen Teil des Bildes betrachten, z. B. 7×7 oder 11×11 Pixel.

Dadurch ist eine wesentlich geringere Anzahl an Neuronen notwendig, als dies für vollständig verbundene Netze der Fall ist, was eine erhebliche Einsparung an Rechenzeit und Speicherbedarf mit sich bringt. Dennoch wurde es erst

in den vergangenen Jahren möglich, Netze zu entwickeln, die mit der Menge an Variation umgehen können, welche die Eingangsdaten für eine Erkennung komplexerer Objekte aufweisen. Dies ist insbesondere der Verfügbarkeit leistungsfähiger und hoch parallelisierter Grafikprozessoren (GPUs) zu verdanken.

Mithilfe manuell annotierter Trainingsdaten werden für bestimmte Eingangs-muster zugehörige Ausgabemuster erlernt. Auf Basis dieser „Erfahrungswerte“ können neuartige Eingangsdaten dann in Echtzeit analysiert werden. Dabei erweisen sich KNN als sehr robust gegenüber Variationen charakteristischer Farben, Kanten oder Formen.

Je detaillierter die Informationen im Datensatz, desto besser gelingen Objekterkennung und -klassifizierung. Datenbasis für die automatisierte Objekterkennung können sowohl 2D-Kamera- als auch 3D-Scandaten oder auch fusionierte Daten sein. Die georeferenzierten Punkte der Scandaten werden zunächst in ein Rasterformat überführt, das Tiefeninformationen enthält. Dieses wird dann mit den RGB-Kameradaten verknüpft. Dieser pixelbasierte RGB-D(epth)-Datensatz enthält zu jedem RGB-Kamerabild ein entsprechendes Tiefenbild und bildet ein ideales Eingabeformat für das KNN.

Das von Fraunhofer IPM entwickelte Framework überführt dabei die georeferenzierten Punkte der Scannerdaten zunächst in ein Rasterformat, das Tiefen-informationen enthält, und verknüpft diese dann mit den RGB-Kameradaten. Dieser pixelbasierte RGB-D(epth)-Datensatz enthält zu jedem RGB-Kamerabild ein entsprechendes Tiefenbild und bildet ein ideales Eingabeformat für das KNN. Liegen hochauflösende Scannerdaten vor, so können diese im Framework direkt verwendet werden. Der Umweg über die Erzeugung von RGB-D-Daten entfällt. Letztlich entscheiden die Aufgabenstellung und die Art der verfügbaren Daten darüber, welcher Ansatz geeignet ist. Der Schritt von der Punktwolke zum klassifizierten Ergebnis ist in Abb. 8 dargestellt.

3 Zusammenfassung

Die Abstandsmessung mithilfe von Lichtlaufzeit stellt heute eine Schlüsseltechnologie dar. Sie bildet die wesentliche Grundlage für das Laserscanning. Aufgrund der zunehmenden Komplexität unserer Umwelt, unserer Infrastruktur und unserer Produktionsanlagen gewinnt die schnelle und zuverlässige Abbildung dieser immer mehr an Bedeutung. Wurden vor zehn Jahren viele Großstrukturen noch mit Einzelpunktverfahren erfasst, spielen diese heute kaum noch eine Rolle. Durch neue Ansätze gelingen räumlich hochauflöste Abbildungen auch von mobilen Plattformen aus. Dadurch werden für ausgewählte Anwendungen Photogrammetriesysteme zunehmend abgelöst (z. B. für die Erfassung von Umgebungsdaten auf der Bahn).



Abb. 8: Oben: texturierte Punktfolke; unten: interpretierter Datensatz mit Farbcodierung. Jede Farbe stellt eine eigene Objektklasse dar.

In Zukunft ist zu erwarten, dass die Systeme zunehmend in ihrer Baugröße verkleinert werden, die Leistungsfähigkeit aber weiter ansteigen wird. Messfrequenzen von 2 Millionen Punkten pro Sekunde sind Stand der Technik, 4 Millionen Punkte pro Sekunde leicht zu erreichen. Die Scanfrequenz wird derzeit von der Spiegelmasse begrenzt – die Entwicklung von Motoren und den entsprechenden Lagern stellt immer noch eine große mechanische Herausforderung dar. Daher sind in Zukunft neue Ablenkeinrichtungen gefordert – Mikrospiegel und leichtgewichtige Polygone könnten einen möglichen Ansatz darstellen.

Weitere Fortschritte sind bei der Entwicklung neuer Modulationstechniken beim Phasenmodulationsverfahren und bei der Signalauswertung beim Puls-

laufzeitverfahren zu erwarten. Dadurch wird es möglich werden, größere Distanzen bei gleichbleibender Auflösung zu erfassen. Auch die Diskreditierung unterschiedlicher Objekte in unterschiedlichen Distanzbereichen wird dadurch leichter realisierbar.

Am Ende wird der Markt entscheiden, welche Entwicklungen tatsächlich nachgefragt und eingesetzt werden. Die Entwickler müssen dann das magische Dreieck aus gewünschten Spezifikationen, physikalisch Machbarem und dem zur Verfügung stehenden Budget auflösen.

Literatur

DVW e. V. (Hrsg.) (2014): Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunftsfelder. DVW-Schriftenreihe, Band 75, Augsburg.

Mallet, C.; Bretar, F. (2009): Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art, In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 64, Issue 1.

März, M. (2016): Semantische Segmentierung von Straßenbestandsobjekten in RGB-Bildern unterstützt durch Tiefeninformationen mittels Convolutional Neural Networks, Masterarbeit am Fraunhofer IPM.

Reiterer, A.; Dambacher, M.; Maindorfer, I.; Höfler, H.; Ebersbach, D.; Frey, C.; Scheller, S.; Klose, D. (2012): Neue Laserscanner-Technologie zur Ebenheitsmessung von Straßenbelägen. VDV-Magazin, Nr. 63.

Reiterer, A.; Höfler, H.; Wölfelschneider, H.; Dimopoulos, N. (2015): Patent DE201410201800 – A device for picking of superimposed intensity images distance and intensity.

Ronneberger, O.; Fischer, P.; Brox, T. (2015): U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Springer International Publishing.

Stilla, U.; Jutzi, B.; Reitberger, J.; Yao, W.; Krzystek, P. (2009): Full Waveform Laserscanning – Auswertemethoden und Anwendungen. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2009 (TLS 2009) – Yes, we Scan! DVW-Schriftenreihe, Band 60, Augsburg, S. 49–67.

Kontakt

Alexander Reiterer | Katharina Predehl | Markus Leidinger
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM
Heidenhofstraße 8, 79110 Freiburg
alexander.reiterer@ipm.fraunhofer.de

Kollaborative Erfassung und Qualitätsbeurteilung von TLS- und UAV-Daten

Ingo Neumann | Ulrich Stenz | Axel Timmen | Uwe Krause | Torsten Genz |
Norbert Haala | Alessandro Cefalu

1 Einleitung

Im Rahmen des Beitrages wird eine Möglichkeit für die kollaborative Erfassung von TLS (Terrestrisches Laserscanning) und luftgestützten UAV (Unmanned Aerial Vehicle)-Daten vorgestellt. Des Weiteren wird eine Qualitätsanalyse der erfassten Daten durchgeführt. Hierfür werden ausgewählte Ergebnisse des vom BMWi geförderten Projektes „*Mobile virtuelle Erfassungsplattform und Missionsmanagement für die Qualitätsanalyse und Darstellung von Objekträumen in 3D* (MoVEQuaD)“ vorgestellt. Ziel des Projekts ist die vollständige Erfassung komplexer Gebäudefassaden durch bildgebende optische Sensoren (von einem UAV) und bodengestützter Messsensorik von einem mobilen Multi-Sensor-System. Die von beiden Messsystemen bereitgestellten Daten werden fusioniert und bilden eine einheitliche Datengrundlage.

Wesentliches Merkmal des im Rahmen des Beitrages vorgestellten Gesamtsystems ist ein lückenloser digitaler Prozess von der *Planung* über die *Erfassung* mit integrierter *Datenanalyse und Qualitätskontrolle* bis zur *Visualisierung* der Ergebnisse vor Ort. Dies stellt einen signifikanten Schritt hin zu einer automatisierten und qualitätsgerechten 3D-Aufnahme dar (vgl. auch Cefalu et al. 2017).

2 Kollaborative Erfassung

Unter kollaborativer Erfassung soll im Rahmen des Beitrages zum einen die gegenseitige Ergänzung der Daten bei der Aufnahme komplexer Objekte verstanden werden. Zum anderen ist darunter auch die gezielte (gegenseitige) Qualitätssteigerung durch Einsatz einer luftgestützten und terrestrischen Komponente zu verstehen.

Um die Aufgaben effektiv mit der erforderlichen Qualität innerhalb der Prozesskette zu bewältigen, muss das luftgestützte System (UAV) um eine terrestrische Komponente erweitert werden. Diese ermöglicht eine präzisere und zuverlässigere Bestimmung der Position und Trajektorie des UAV einerseits und ergänzt den Erfassungs- und Kontrollprozess andererseits. Die parallele

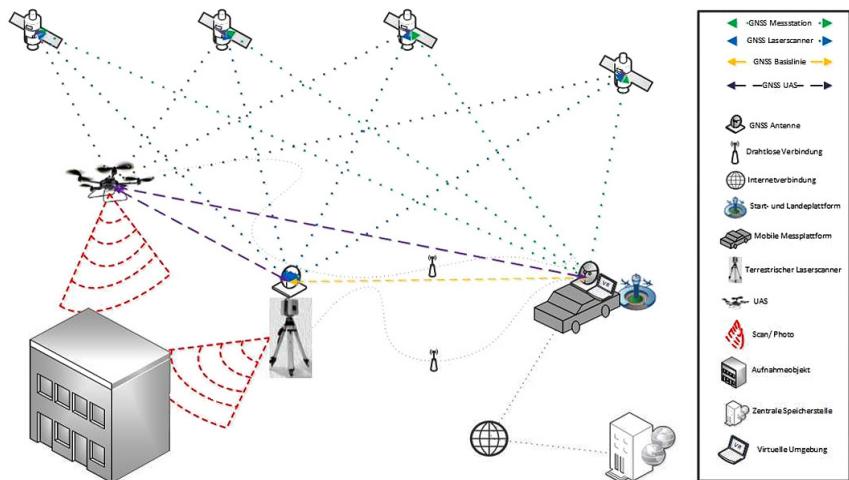


Abb. 1: Kollaborative Erfassung im Projekt MoVEQuaD

Datenerfassung mit zwei Messplattformen bildet die Basis für eine verdeckungsfreie und effiziente Vermessung des Objektraumes. Für das UAV nicht sichtbare oder nicht erreichbare Objektbestandteile können terrestrisch erfasst werden und aufnahmesituationsbedingte Qualitätseinschränkungen eliminiert werden. Die Implementierung der bisher fehlenden Vor-Ort-Kontrolle der Ergebnisqualität begründet darüber hinaus einen wesentlichen Mehrwert des Gesamtsystems (vgl. auch Kap. 3). Die Abb. 1 zeigt die Grundkonzeption des Gesamtsystems aus terrestrischer und luftgestützter Komponente.

Im Rahmen des Projektes wurde für die terrestrische Komponente ein off-roadfähiges Trägersystem realisiert, welches sowohl als Missionsplattform für den UAV sowie als Trägersystem für terrestrische Vermessung mittels TLS geeignet ist (vgl. Abb. 2). Das Trägersystem wird mit präzisen GNSS-Sensoren (z. B. GPS/GLONASS/Galileo) ausgerüstet und kann so als zuverlässige und



Abb. 2:
Terrestrische Komponente
im Projekt MoVEQuaD mit
Laserscanner und Fisheye-
Kamera

hochgenaue Referenz für die Positionsbestimmung der verschiedenen Messsysteme benutzt werden.

Gesteuert werden die Messsysteme durch mobile Endgeräte, welche mit einer Middleware kommunizieren. Die Middleware ist in der Lage, die Daten in Echtzeit zu registrieren und in nahezu Echtzeit für die Qualitätsbeurteilung nach einem einfachen Ampelsystem (grün (gut) – gelb (akzeptabel) – rot (schlecht) bzw. schwarz (keine Daten)) einem angeschlossenen virtuellen 3D-System zur Verfügung zu stellen.

3 Qualitätsbeurteilung der Daten

Um eine effektive Kontrolle der 3D-Daten zu ermöglichen und frühzeitig Defizite in der Aufnahme zu entdecken, ist es notwendig, sich von den bisherigen Möglichkeiten einer visuellen Kontrolle in 2D zu lösen. Stattdessen soll die Kontrolle in einem „echten“ 3D-Raum vor Ort, nahe Echtzeit, realisiert werden.

In gängigen Qualitätsmodellen, wie beispielsweise nach Wiltschko (2004), wird die Qualität einer Information durch einen festgelegten Satz von Qualitätsmerkmalen beschrieben. Eine zentrale Komponente nimmt die Genauigkeit ein, welche wiederum von Qualitätsparametern wie Varianzen, Standardabweichungen oder anderen vergleichbaren Parametern konkretisiert und quantifiziert werden kann. Im Folgenden soll dabei exemplarisch auf die Präzision und Genauigkeit als Qualitätsmerkmale genauer eingegangen werden.

Zur aussagekräftigen, skalaren Beschreibung der Präzision oder Genauigkeit einer 3D-Koordinate eignet sich beispielsweise der mittlere Punktfehler nach Helmert, der sich aus den Varianzen σ_i^2 der drei Koordinatenkomponenten berechnet:

$$\sigma_{xyz} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}. \quad (1)$$

Bei vollständiger Berücksichtigung aller denkbaren Einflussgrößen können so beispielsweise beim TLS auftretende systematische sowie sich auf das Messrauschen auswirkende Effekte im Rahmen einer stochastischen Modellierung zusammengefasst werden. Deren Ursache liegt in den Umgebungseigenschaften (aufgeschlüsselt z. B. von Böhler et al. 2003), der Messkonstellation (einschließlich des Auftreffwinkels, detailliert untersucht z. B. von Zámečníková und Neuner (2014)), den Zielobjekteigenschaften (siehe z. B. Mechelke et al. 2007 bezüglich des Einflusses der Farbe) und auch dem Instrument (Holst et al. 2014).

Systematiken wie beispielsweise aus Achsabweichungen des Laserscanners sind im Rahmen von Kalibriervorgängen möglichst zu minimieren. Herstellerkalibrierungen, wie beispielsweise von Kern und Huxhagen (2008) zusammen-

gestellt, sind dafür notwendig. Die bei kurzen Zielweiten geringfügigen Auswirkungen der Atmosphäre können vernachlässigt oder nach bekannten Ansätzen modelliert werden. Objektabhängige Einflüsse wie Eindringtiefe, Rauheit, Farbe und Reflexionsvermögen sowie konstellationsbedingte Effekte aus Messweite und Auftreffwinkel sind bisher aufgrund von zum Teil unbekannten und sehr komplexen Zusammenhängen nicht ohne Weiteres trennbar (Kauker und Schwieger 2016).

Quantitative Angaben zur Genauigkeit der Richtungsbeobachtung von Laserscannern sind zumeist im Datenblatt der Hersteller zu finden. Für die Streckenbeobachtung hingegen werden zumeist nur Aussagen über die Präzision bei konkret definierten Messbedingungen (Distanz, Reflektivität) aufgeführt.

Einer näheren Untersuchung der Streckenmessung als wesentliche Komponente für die Genauigkeit beim TLS widmet sich die Arbeit von Wujanz (2016). Nach dem von ihm beschriebenen Vorgehen ist es möglich, aus Intensitätswerten eine, die genannten Einflüsse von Objekt und Konstellation zusammenfassende, individuelle Aussage über die Präzision einer Distanzmessung zu treffen. So kann ein aussagekräftiger Qualitätsparameter für TLS-Messdaten abgeleitet werden.

Ergebnisse einer solchen Berechnung sind beispielhaft für einen Messdatensatz für einen Laserscanner Imager 5006 (Zoller+Fröhlich GmbH 2007) in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellt, wobei die Einfärbung anhand des Qualitätsparameters „mittlerer Punkt-

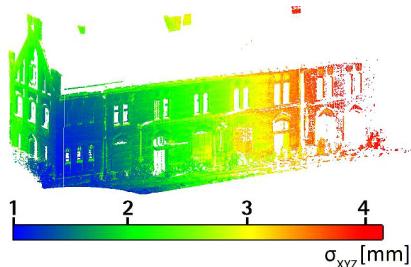


Abb. 3: Nach mittleren Punktfehlern nach Helmert eingefärbte Punktwolke

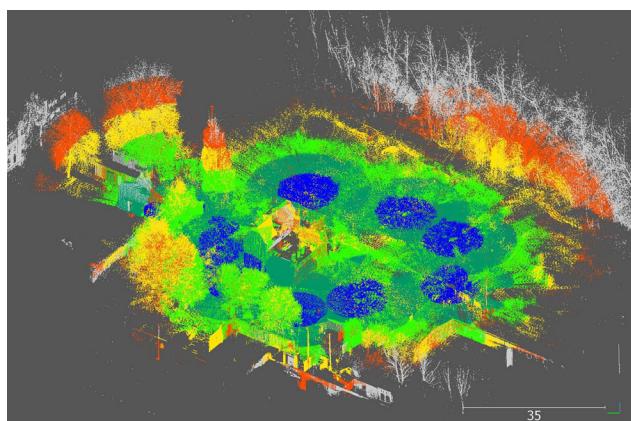


Abb. 4:
Nach mittleren
Punktfehlern nach
Helmert (als Para-
meter für die Prä-
zision) eingefärbte
Punktwolke für
einen größeren
Objektbereich. Der
mittlere Bereich
zeigt das Gebäude
aus Abb. 3.

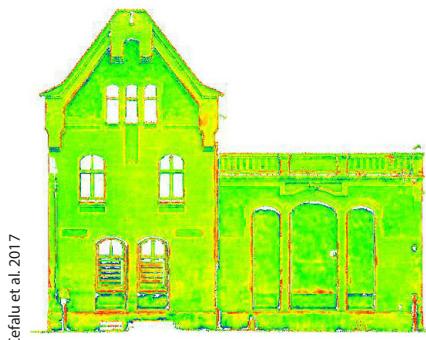


Abb. 5:

3D-Abweichungen zwischen dem UAV-Mesh und der TLS-Punktwolke nach einem ICP-Fitting (rot/blau entspricht ± 2 cm). Die aus den Abweichungen berechnete Standardabweichung beträgt ca. 6 mm

fehler nach Helmert“ für die Präzision vorgenommen wurde. Aus der Visualisierung geht insbesondere der Einfluss der Messweite auf die Präzision der Koordinaten hervor.

Für die gemeinsame Qualitätsbeurteilung der TLS- und UAV-Daten wurden die mittels der beiden Messverfahren konstruierten 3D-Punktwolken miteinander verglichen. Die Abb. 5 zeigt die 3D-Abweichungen zwischen den beiden mittels ICP (iterative closest points algorithm) gefütteten Punktwolken in Cloud-Compare. Die resultierende Cloud to Mesh Distanz weist eine Standardabweichung von ca. 6 mm auf.

Dank

Die Ergebnisse dieses Beitrags entstanden durch das von der VDI|VDE|IT, als Projekträger des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), geförderte Kooperationsprojekt „FrOLE – MoVEQuaD / Mobile virtuelle Erfassungsplattform und Missionsmanagement für die Qualitätsanalyse und Darstellung von Objekträumen in 3D“. Die Arbeiten wurden in Zusammenarbeit zwischen dem Vermessungsbüro Geo-Office GmbH, dem Geodätischen Institut der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (GIH) und dem Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart durchgeführt (ZIM Kooperationsprojekt: 16KN035280, 16KN035225 und 16KN035226).



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

Böhler, W.; Marbs, A. (2003): Investigation Laser Scanner Accuracy. 19. CIPA Symposium 2003, Antalya.

Cefalu, A.; Haala, N.; Schmohl, S.; Neumann, I.; Genz, T. (2017): A Mobile Multi-Sensor Platform for Building Reconstruction Integrating Terrestrial and Autonomous UAV-Based Close Range Data Acquisition. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W6, pp. 63–70. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-63-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-63-2017).

Holst, C.; Tegelbeckers, J.; Kuhlmann, H. (2014): Erkennung und Erklärung von systematischen Effekten beim TLS. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2014 (TLS 2014)*. DVW-Schriftenreihe, Band 78, Augsburg, S. 51–68.

Kauker, S.; Schwieger, V. (2016): First investigations for a synthetic covariance matrix for monitoring by terrestrial laser scanning. In: *Proceedings of the 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, Wien (CD-Proceedings).

Kern, F.; Huxhagen, U. (2008): Ansätze zur systematischen Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2008 (TLS 2008)*. DVW-Schriftenreihe, Band 54, Augsburg, S. 111–124.

Mechelke, K.; Kersten, T. P.; Lindstaedt, M. (2007): Comparative Investigation into the Accuracy Behaviour of the New Generation of Terrestrial Laser Scanning Systems. In: Gruen/Kahmen (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques VIII*. Zürich, S. 319–327.

Wiltschko, T. (2004): Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrassistenzsyste zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten. Dissertation. In: *Fortschritt-Bericht VDI*, Reihe 12, Nr. 570, VDI Verlag, Düsseldorf.

Wujanz, D. (2016): *Terrestrial Laser Scanning for Geodetic Deformation Monitoring*. Dissertation an der Technischen Universität Berlin. DOI: [10.14279/depositonce-5136](https://doi.org/10.14279/depositonce-5136).

Zámečníková, M.; Neuner, H. (2017): Towards the Influence of the Angle of Incidence and the Surface Roughness on Distances in Terrestrial Laser Scanning. In: *CD-Proceedings of the FIG Working Week 2017*, Helsinki.

Zoller+Fröhlich GmbH (2007): *Technische Daten IMAGER 5006*. Wangen im Allgäu.

Kontakt

Ingo Neumann | Ulrich Stenz | Axel Timmen
Geodätisches Institut der Leibniz Universität Hannover
Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
neumann@gih.uni-hannover.de

Uwe Krause | Torsten Genz
Geo-Office GmbH
Karl-Liebknecht-Straße 101, 14612 Falkensee
torsten.genz@geo-office.de

Norbert Haala | Alessandro Cefalu
Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart
Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart
norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de

Session 2:

Fusion von terrestrischem Laserscanning und bildgestützten Punktwolken

Monitoring mit scannenden bildgebenden Tachymetern

Wolfgang Wiedemann | Andreas Wagner | Peter Wasmeier | Thomas Wunderlich

1 Einleitung

Bei einer geodätischen Überwachungsmessung wird in der Regel zunächst eine räumliche und zeitliche Diskretisierung des Messobjekts vorgenommen; d.h. das zu untersuchende (künstliche oder natürliche) Objekt wird durch einzelne repräsentative Punkte ersetzt, die in unterschiedlichen zeitlichen Abständen (Epochen) beobachtet werden. Als Ergebnis der mehrmaligen Messungen und Deformationsanalysen ergeben sich für die diskreten Objektpunkte Verschiebungsvektoren, die wiederum in eine Deformation (Starrkörperbewegung oder Verformung) des Körpers rückzurechnen sind.

Seit einigen Jahren zeichnet sich ein Trend zu flächenhaften Messverfahren ab, bei denen die oben genannte Problematik der Diskretisierung und späteren Generalisierung umgangen wird. Die zumeist eingesetzten Methoden des Laser-scannings und der (Stereo-)Photogrammetrie erfassen in kurzer Zeit hochauflösende genaue Punktwolken des Messgebietes und sind ideal zur Erfassung von Deformationen geeignet. Auch an der Entwicklung elektronischer Tachymeter ist dieser Trend nicht spurlos vorübergegangen. Moderne Geräte verfügen über Scanfunktionalitäten und eine oder mehrere eingebaute Kameras und ermöglichen damit heutzutage auch eine flächenhafte Messdatenerfassung.

Im folgenden Beitrag werden die Entwicklung und der technische Stand scannender bildgebender Tachymeter beschrieben (Kap. 2) und die besonderen Anforderungen an die Kalibrierung dieser Instrumente dargelegt (Kap. 3). Kap. 4 zeigt eine neue Auswertemethode für kombinierte Bild- und Scandaten im Sinne einer strengen Deformationsanalyse. Der Mehrwert der neuen Gerätekasse wird abschließend diskutiert und ein Ausblick auf zukünftige Auswertemethoden gegeben (Kap. 5).

2 Instrumente

Im Folgenden sollen die Entwicklungsgeschichte und der Stand der Technik moderner Tachymeter kurz beschrieben werden. Neben der Integration von

Scanfunktionalität und Kameras wird hier auch auf die herstellerspezifische Software als Schnittstelle zwischen Benutzer und Instrument eingegangen.

2.1 Integration der Scanfunktionalität

Die ersten Tachymeter mit Scanfunktion wurden im Jahr 2007 nahezu gleichzeitig von zwei Herstellern vorgestellt (Wagner et al. 2014). Das *GPT-9000Ai* von *Topcon* verfügte über die Möglichkeit, einen vorab definierten Bereich mit bis zu 20 Punkten pro Sekunde zu scannen; die *Trimble VX Spatial Station* erreichte max. 15 Punkte in der Sekunde. Vor dieser Zeit gab es lediglich Entwicklungen, bei denen Punkte rasterförmig mithilfe der reflektorlosen Distanzmessfunktion gemessen wurden. Da diese Realisierung sehr zeitaufwendig ist, wurde bereits 1994 an der Ruhr-Universität Bochum ein intelligenter Ansatz vorgeschlagen und prototypisch realisiert (Scherer 2004).

Die erste signifikante Erhöhung der Scanrate ergab sich 2015 mit Einführung der *Leica MS50*, die mit bis zu 1.000 Punkten pro Sekunde messen kann. Die *Trimble SX10*, vorgestellt 2016, bietet heute sogar Scanraten von bis zu 26.600 Hz. Diese weitere deutliche Steigerung wurde möglich, da bei diesem Gerät erstmals ein zusätzliches Bauteil in Form eines rotierenden Prismas eingebaut wurde (Schrock 2017).

2.2 Integration von Kameras

Digitale integrierte Kameras wurden erstmals in Theodolitmesssystemen (*Kern SPACE* & *Wild ATMS*) in den späten 1980ern eingesetzt (Wagner et al. 2014). In der Industrievermessung wurden diese Geräte aber schnell von den kurz darauf entwickelten Lasertrackern abgelöst. Da zu dieser Zeit die Bildauswertungsalgorithmen und vor allem die Auswerte-PCs noch sehr ineffizient und unhandlich waren, konnten sich die sog. Videoteodolite oder -tachymeter nicht am Markt etablieren.

Bis zum Jahr 2005, in dem *Topcon* mit dem *GPT-7000i* das erste kommerziell erhältliche Videotachymeter vorstellte, wurden vor allem im Forschungsumfeld Prototypen entwickelt und eingesetzt. Der Fokus lag dabei auf der Entwicklung geeigneter Kalibriermethoden und der Ableitung präziser Messinformation aus dem (Teleskop-)Kamerabild (z. B. Walser 2004, Vogel 2006, Reiterer 2013).

Heutzutage hat jeder große Gerätehersteller ein Tachymeter mit einer oder mehreren integrierten Kameras in seinem Produktparkt. Die zusätzliche Bildinformation wird in den Vermessungsgeräten allerdings nur zur Unterstützung der herkömmlichen Arbeitsabläufe oder einfachen Postprocessing-Auswertungen verwendet. Die *Trimble SX10* nimmt, wie bei der Scanfunktion, auch hier eine Sonderrolle ein, da bei diesem Instrument komplett auf ein Okular

verzichtet wurde. Die Kamera ist nicht länger unterstützendes, sondern notwendiges Element, um das Instrument bedienen zu können.

2.3 Softwareentwicklung

Einhergehend mit der Integration von Kameras und Scanfunktionen in die Instrumente wurden auch die Softwarepakete der Hersteller – sowohl auf den Instrumenten als auch die Büro-Auswertesoftware – kontinuierlich erweitert. Die Kamerabilder können heute zur Dokumentation der Messung im Feld und der Anzielung von Punkten ohne Blick durch das Okular (falls überhaupt noch vorhanden) verwendet werden. Im Speziellen erleichtern sie den Betrieb des Instruments als Einmann-Station. Bereits gemessene Punkte und Planungsdaten lassen sich zusätzlich mit dem (Live-)Kamerabild überlagern, wodurch der Bediener weiter unterstützt wird. Die Auswerteprogramme bieten Möglichkeiten zur nachträglichen stereo-photogrammetrischen Bestimmung von Punkten aus den Bilddaten, die im Feld aufgenommen wurden.

Bei Verwendung der Scanfunktion sind die erfassten Punktwolken fest mit der Gerätestationierung verknüpft und liegen direkt georeferenziert für die Auswertung vor. Eine aufwendige Registrierung der Scandaten über Passpunkte wird damit überflüssig. Mit der steigenden Rechenleistung der Instrumente sind heutzutage auch einfache on-board-Anwendungen – beispielsweise für den Vergleich zwischen Plan und Scandaten – vorhanden.

3 Neue Anforderungen an die Kalibrierung

Durch die Teleskopkamera entsteht eine neue Instrumentenachse, die bezüglich der bestehenden Instrumentenachsen (EDM-Achsen, Okular-Zielachse, ...) kalibriert werden muss. Ziel der Kalibrierung ist es, dass ein im Bild markiertes Pixel in eine Tachymeterrichtung (und umgekehrt) umgewandelt werden kann sowie aufgenommene (Scan-)Punkte lagerichtig in das Bild projiziert werden können. Da die Werkskalibrierung der Hersteller teilweise lediglich generalisierte Parameter für eine ganze Gerätekategorie bestimmt, ist für hochgenaue Anwendungen eine eigene, für jedes Gerät individuelle Kalibrierung notwendig.

Wichtig ist die Berücksichtigung der unterschiedlichen Bezugspunkte und -achsen, wie in [Abb. 1](#) dargestellt. Die Zielachse des Instruments ist definiert als Verbindungslinie zwischen dem physikalischen Fadenkreuz und dem dingseitigen Brennpunkt des Fernrohrs (Schlemmer 1996, S. 76). Diese Achse fällt nicht zwangsläufig mit der optischen Achse des Fernrohrs zusammen und verändert sich beim Umfokussieren. Die virtuelle Zielachse definiert sich aus dem Bezugspunkt der Kalibrierung (d.h. der Kalibierparameter) der Teleskopkamera

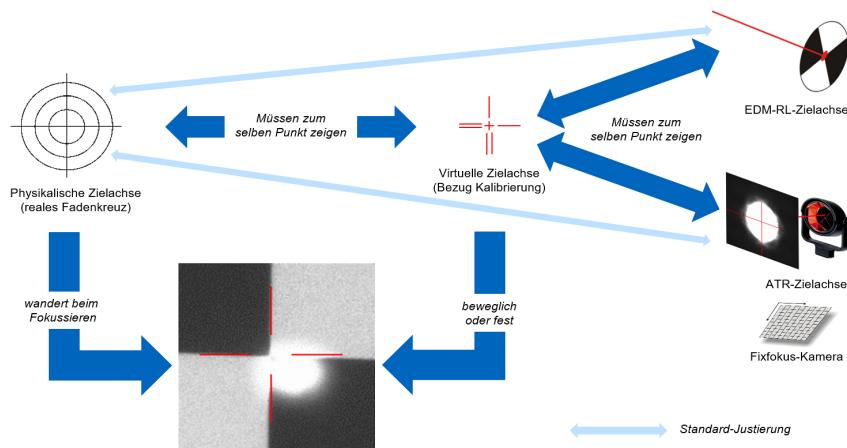


Abb. 1: Berücksichtigung unterschiedlicher Bezugspunkte und -achsen am Beispiel der Leica Nova Serie (MS50, MS60)

und dem dingseitigen Brennpunkt des Fernrohrs. Beide Achsen werden über ein gemeinsames Kalibrierverfahren zueinander in Bezug gesetzt (Wasmeier 2009).

Die EDM-Achse (auf die sich die Scans beziehen) kann mittels mechanischer Justage oder Anpassen des Fadenkreuzes mit der Zielachse koinzidieren. Dies gilt auch für die Integration von schnell rotierenden Zielachsen im Scanning (wie bei der *Trimble SX10*), wobei hier ggf. zyklische Korrekturen zu untersuchen sind. Für die Achse der automatischen Feinzieleinrichtung müssen bei einer Kamerakalibrierung weitere Ablageparameter zur physikalischen bzw. virtuellen Zielachse bestimmt werden.

Wird an Stelle einer Teleskopkamera die Übersichtskamera (nicht koaxial zum Fernrohr) verwendet, muss der Einfluss der Parallaxe korrigiert werden. Da dieser Einfluss entfernungsabhängig ist, kann eine Pixelposition nicht in Tachymeterrichtungen (und umgekehrt) überführt werden, ohne dass die Objektdistanz bekannt ist. Diese kann für einzelne Punkte mithilfe der reflektorlosen Distanzmessung bestimmt oder flächenhaft aus Scandaten für das ganze Bild abgeleitet werden. Daneben existieren Ansätze, die Entfernung aus der Stellung der Fokussierlinse im Teleskop (wie im Digitalnivellier) zu ermitteln (Mischke 2000).

4 Kombinierte Auswertung von Bild und Scandaten

Wie bereits erwähnt, werden für geodätische Überwachungsmessungen heutzutage zunehmend Daten flächenhafter Messverfahren verwendet. Sowohl die

Analyse von Laserscan- als auch die von Bilddaten haben ihre individuellen Vorteile und Nachteile.

Laserscans bieten den Vorteil, dass sie unabhängig von Beleuchtung und Textur Objekte maßhaltig erfassen können. Allerdings ist es unter Verwendung von reinen Laserscandaten oft nicht möglich, aussagekräftige Informationen über eventuell vorhandene Deformationen abzuleiten. Bedingt durch das Aufnahmeverfahren werden bei Laserscandaten unterschiedliche Objektpunkte abgetastet. Da keine eindeutigen Korrespondenzen zwischen den Punktfolgen vorliegen, ist ein direkter Vergleich der Einzelpunkte – im Sinne einer strengen Deformationsanalyse – nicht möglich. Mit den vorhanden Verfahren des Epochenvergleichs zweier Laserscans (Cloud2Cloud Vergleich etc.), können zwar Veränderungen einfach dargestellt werden, das verlässliche Ableiten der tatsächlichen Objektbewegungen/-verformungen gestaltet sich allerdings schwierig und lässt Raum für unterschiedliche Interpretationen (Holst et al. 2017, Wiedemann et al. 2017). Zusätzlich sind diese Auswerteverfahren für Laserscandaten im Wesentlichen sensitiv für Distanzänderungen in Aufnahmerichtung. ICP-Verfahren zur Schätzung von Deformationen aus Punktfolgen (bzw. Punktfolgenbereichen) decken nur Starrkörperbewegungen auf. Die Ergebnisse sind dabei stark abhängig von der Objektgeometrie und dem gewählten Punktfolgenausschnitt und liefern unzureichende Deformationsangaben bei Objektverformungen.

Bei der Verwendung reiner Bilddaten müssen Objekte von mindestens zwei Standpunkten aus erfasst werden, um Tiefeninformationen ableiten zu können. Um hohe Genauigkeiten zu erhalten, müssen lange Basislinien gewählt werden, was in der Praxis oft schwierig umzusetzen ist. Zusätzlich wird die Korrespondenzfindung zur Berechnung eines photogrammetrischen Vorwärtschnittes bei steigender Basislinienlänge erschwert. Bei der Verwendung monoskopischer Kamerabilder können nur Bewegungen in der Bildebene (d.h. quer zur Aufnahmerichtung) bestimmt werden. Reine Entfernungsänderungen – die sich nur an einer Skalierung der Objekte im Bild erkennen lassen – sind nur sehr schwer zu erfassen und setzen Vorkenntnisse über das Untersuchungsobjekt voraus.

Um die oben beschriebenen Nachteile der einzelnen Verfahren und Auswertemethoden zu umgehen, wurde ein kombiniertes Verfahren entwickelt, das versucht, die Nachteile der jeweiligen Einzelverfahren mit den Vorteilen des jeweils anderen Verfahren zu ergänzen.

4.1 Datenerfassung

Bildgebende scannende Tachymeter erlauben es, hochauflösende Bildaufnahmen mit der Teleskopkamera des Tachymeters zu erzeugen. Mit entsprechender Kalibrierung der Kamera und den Tachymeterablesungen zum Zeitpunkt der Bildaufnahme sind diese Aufnahmen absolut im Raum orientiert. Damit kann

jedem Pixel direkt eine Raumrichtung (Hz, V) im Tachymetersystem zugeordnet werden.

Die Scanfunktion moderner Tachymeter erlaubt es zudem, von demselben Standpunkt aus eine Punktwolke des Objekts zu erfassen. Da das Scanzentrum und das Projektionszentrum der Kamera bei diesem Gerätetyp (nahezu) zusammenfallen, zeigen beide Aufnahmen die gleiche Perspektive. Ungewollte Abschattungen im Scan gegenüber den Kamerabildern werden vermieden.

Die Verwendung eines bildgebenden scannenden Tachymeters bietet im Allgemeinen den Vorteil, dass alle Sensordaten (Bilder, Scans, Winkel- und Neigungsdaten, ...) im selben Koordinatensystem erfasst werden.

4.2 Erzeugen von RGB+D-Bildern

Für den beschriebenen Ansatz werden die beiden Messdatensätze – Bilder und Scans – zu sogenannten RGB+D-Bildern kombiniert (Wagner 2016). Da das Sichtfeld durch die ca. 30-fache Vergrößerung des Teleskops stark begrenzt ist, müssen meist mehrere Bilder der Teleskopkamera verwendet werden, um das Untersuchungsgebiet vollständig zu erfassen. Mithilfe der absoluten Orientierung der Kamera aus dem Tachymeterstandpunkt und dessen Winkelablesungen lassen sich die Aufnahmen direkt zu einer sphärischen Panoramaaufnahme (RGB) zusammensetzen. Diese werden um einen weiteren Kanal D (depth) ergänzt, in dem die Entfernungsinformation hinterlegt ist. Die Scanpunkte werden dazu in das Bild projiziert; daraus wird anschließend ein Tiefenbild in der gleichen Auflösung wie die Bildinformation interpoliert.

Da die Zuordnung der Raumrichtung beim Erstellen der Panoramabilder erhalten bleibt, kann eine abgegriffene Pixelkoordinate des RGB+D-Bildes direkt als polarer Messwert zu dem Objektpunkt oder als kartesische 3D-Koordinate ausgedrückt werden. Die Auflösung des aus Einzelbildern zusammengesetzten Panoramas übersteigt meist die des Scans (in der Regel um den Faktor 10). D.h. die Tiefenwerte der meisten Bildpixel werden aus den jeweils umliegenden Scanpunkten interpoliert. Die Genauigkeit des D-Kanals ist somit auch von der Auflösung des Scans und der gewählten Interpolationsmethode abhängig.

4.3 Merkmalsbasierte Identifizierung von Bildpunkten

Für die weitere Verarbeitung werden mittels gängiger Bildverarbeitungsalgorithmen (SIFT, SURF, BRISK, etc.) Featurepunkte aus den Bildern extrahiert. Neben der jeweiligen Pixelkoordinate enthalten diese auch eine numerische Beschreibung, sogenannte Featurevektoren, die aus den radiometrischen Informationen der lokalen Nachbarschaft jedes Punktes berechnet werden.

Die generierten Featurevektoren werden genutzt, um identische Punkte in den Daten unterschiedlicher Aufnahmestandpunkte bzw. Epochen zu finden. Die Suche kann so auf einer abstrakten numerischen Ebene durchgeführt werden, bei der lediglich die Ähnlichkeit der Featurevektoren verglichen wird (Featurematching) und eine geometrische Interpretation oder komplexe objektbasierte Auswertung der Bilder vermieden werden kann.

4.4 Deformationsanalyse

Die detektierten Bildpunkte repräsentieren, in Verbindung mit dem Tiefenkanal, direkt sphärische Koordinaten und lassen sich einfach in 3D-Objektkoordinaten umrechnen. Mithilfe identischer Punkte in RGB+D-Bildern aufeinanderfolgender Epochen können daraus 3D-Verschiebungsvektoren berechnet werden, die bereits erste Anhaltspunkte für eine Objektdeformation liefern.

Für eine sinnvolle Analyse der Deformation müssen die ermittelten Verschiebungsvektoren allerdings einem Signifikanztest unterzogen werden. Dies kann durch eine strenge Deformationsanalyse (im Sinne eines Kongruenzmodells) geschehen, in der die detektierten Objektpunkte enthalten sind. Möglich ist dies mit einer zusätzlichen Netzmessung zu Stabilpunkten, was sich bei der Verwendung bildgebender scannender Tachymeter einfach in den Messablauf integrieren lässt.

Für die Durchführung der strengen Deformationsanalyse müssen zusätzlich folgende Bedingungen bei der Auswertung berücksichtigt werden:

1. Gleiche Lagerung: die datumstragenden Punkte müssen in den Vergleichsepochen dieselben sein.
2. Identischer Datumsdefekt: die Datumsparameter der Epochen müssen identisch gewählt werden.
3. Identischen Näherungskoordinaten: die Netze der Epochen müssen unter Verwendung identischer Näherungswerte frei ausglichen werden.
4. Gemeinsamer Varianzfaktor: die freien Netzausgleichungen der Messepochen müssen vergleichbare Genauigkeiten liefern, um einen gemeinsamen Varianzfaktor berechnen zu können.

Anschließend können die Netze über Kongruenztests (zweistufiger Netzaufbau) auf Deformationen untersucht werden. Das stochastische Modell des Kongruenztestes erfordert allerdings, dass Genauigkeitsmaße für die im RGB+D-Bild detektierten Objektpunkte eingeführt werden. Liegen für diese Punkte keine Überbestimmung vor (RGB+D als Polarpunkte bei Aufnahmen von nur einem Standpunkt), können Varianzinformationen aus synthetischen Kovarianzmatrizen erstellt werden (Kauker et al. 2016).

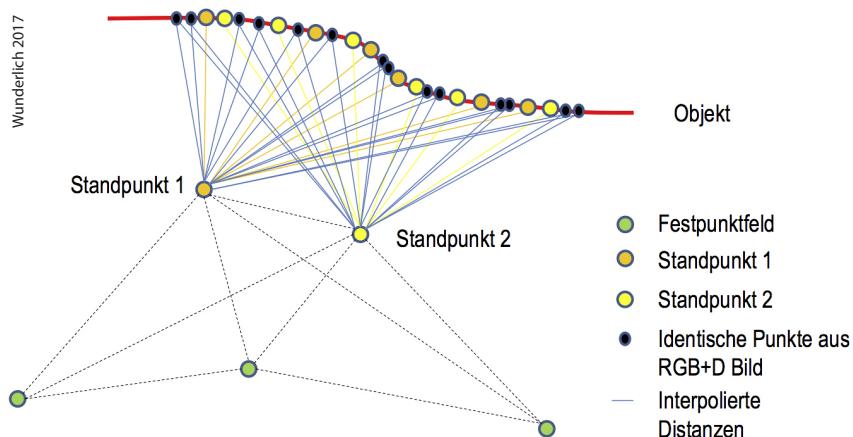


Abb. 2: Konzeptioneller Aufbau der vorgestellten Methode zum Auffinden identischer Punkte aus RGB+D-Bildern

Die in diesem Ansatz vorgeschlagene Vorgehensweise sieht allerdings vor, empirische Werte für die Kovarianzmatrix durch eine Überbestimmung der Objektpunkte zu ermitteln. Dies erfordert eine weitere RGB+D-Aufnahme von einem zusätzlichen Standpunkt innerhalb der gleichen Messepoche, der ebenfalls in der Netzmessung eingebunden ist (vgl. Abb. 2). Identisch zum Vorgehen über mehrere Epochen hinweg, lassen sich auch in RGB+D-Aufnahmen innerhalb einer Epoche identische Punkte über Bildfeatures ermitteln. Mit der nun vorhandenen Überbestimmung können die Varianzinformationen der Objektpunkte im Zuge einer freien Netzausgleichung bestimmt werden. Die Überbestimmung erlaubt es ebenfalls, grobe Messfehler – z. B. eine falsche Zuordnung von Featurepunkten – aufzudecken.

4.5 Anwendungsbeispiele

Nachfolgend soll der Prozess zum Auffinden der identischen Punkte in RGB+D-Bildern und die Berechnung der Deformationsvektoren anhand von Beispielen veranschaulicht werden.

Abb. 3 links zeigt das Panoramabild eines untersuchten Schotterfeldes, das in zwei Epochen mit einer *Leica Nova MS60* erfasst wurde. Zwischen den Epochen wurden künstliche Deformationen erzeugt. Auf dem losen Gestein des Schotterfeldes wurde eine Fläche von ca. 54 m² aufgenommen, die ca. 38 m vom Instrumentenstandpunkt entfernt ist. Für die Erstellung der Panoramabilder wurden je 72 Einzelbilder in einem vordefinierten Raster aufgenommen. Diese lassen sich über die Tachymeterrichtungen und die Kalibrierparameter direkt zusammen-

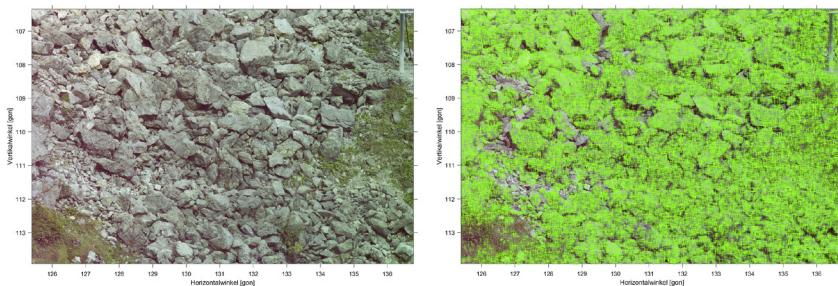


Abb. 3: Aufgenommenes Schotterfeld (links); erfolgreich zugeordnete Feature zwischen den Epochen (rechts)

fügen; in den Überlappungsbereichen (20 %) müssen lediglich Belichtungsdifferenzen und Vignettierungseffekte ausgeglichen werden (Wagner 2016). Zu jeder Epoche wurde ein Scan mit einer Auflösung von ca. 6 mm auf der Objektoberfläche angefertigt. Damit liegen je $\sim 1.000.000$ Stützpunkte für die Interpolation der Tiefenkanäle vor.

In den Panoramabildern werden je ca. 125.000 SIFT-Features detektiert. Zwischen den beiden Epochen können ca. 76.000 Featurepunkte einander zugeordnet werden. **Abb. 3** rechts zeigt die Verteilung der zugeordneten Punkte im Untersuchungsbereich. Dabei werden in fast allen Bereichen Bildfeatures erkannt. Lediglich in Bereichen mit Vegetation (Gras, unten links im Bild) versagt die Zuordnung. Kleinere Bereiche ohne detektierte Bildpunkte resultieren aus Abschattungen, die durch die Deformation hervorgerufen werden.

Die detektierten Verschiebungsvektoren, die aus den RGB+D-Bildern berechnet wurden, sind in **Abb. 4** als rote Linien dargestellt. In deformierten Bereichen treten dabei gehäuft Vektoren in gleicher Richtung auf. Vereinzelte sichtbare

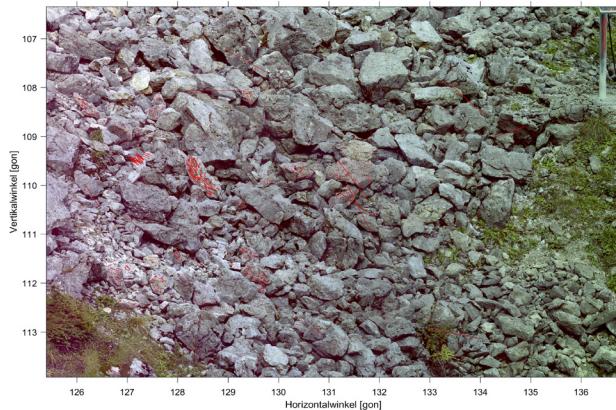


Abb. 4:
Detektierte
Deformations-
vektoren im
Schotterfeld,
dargestellt als
rote Linien

Fehlzuordnungen zeigen sich als einzelne Linien. Unter der Annahme, dass Deformationen in lokal begrenzten Bereichen eine annähernd gleiche Größenordnung und Richtung besitzen, können solche Ausreißer durch den Vergleich der Orientierung und Länge benachbarter Vektoren gefiltert werden. Einzelne Elemente, die keiner lokalen Gruppe zugeordnet werden können, werden als Falschzuordnung verworfen.

In weiteren Messungen wurden die Deformationen eines Betonträgers bei einem zerstörenden Brückenbelastungsversuch untersucht. Um die Standfestigkeit des Brückenfeldes zu ermitteln, wurde dieses über Hydraulikzylinder so lange mit zunehmender Last beaufschlagt, bis es versagte. [Abb. 5](#) zeigt den Träger vor und nach dem Belastungsversuch.



Abb. 5: Brückenträger vor (links) und nach (rechts) dem Belastungsversuch; der Untersuchungsbereich ist rot markiert.

Während des Versuches wurden mit einer *Leica Nova MS60* Bild- und Laserscandaten bei unterschiedlichen Belastungsstufen aufgenommen. Auf Grund der beschränkten Zeit zwischen den einzelnen Belastungsstufen und einer sehr geringen Objektdistanz (ca. 5 m), konnte nur ein Ausschnitt von $0,2 \text{ m}^2$ des Trägers erfasst werden. Die benötigte Aufnahmezeit betrug ca. 10 Minuten. Die erstellten Panoramabilder setzen sich aus 36 Einzelbildern zusammen; die Scanauflösung beträgt 1 mm auf der Objektoberfläche. Die aus den Messdaten abgeleiteten Deformationsvektoren zwischen Nullepoche und der Aufnahme nach dem Bruch (entlasteter Zustand) sind in [Abb. 6](#) dargestellt. Darin sind sowohl Stabilbereiche (rechts oben), als auch der Bruch in zwei unterschiedliche Teile mit leicht abweichenden Bewegungsrichtungen zu erkennen. Zwischen diesen Regionen zeigen sich deutlich die Rissbereiche, in denen keine Features detektiert wurden.

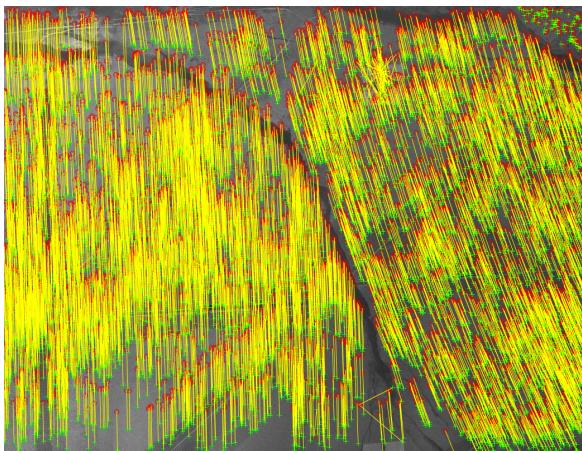


Abb. 6:
Deformationsvektoren
eines Betonträgers
während eines Brücken-
belastungsversuchs

5 Diskussion und Ausblick

Scannende bildgebende Tachymeter bieten einen deutlichen Mehrwert gegenüber konventionellen Tachymetern. Die von den Herstellern bereitgestellten Funktionen erleichtern die Bedienung und erweitern die Messmethoden durch stereo-photogrammetrische Punktbestimmung. Durch die Integration der Scanfunktion lassen sich zusätzlich Aufgaben in den tachymetrischen Messablauf integrieren und mit einem einzigen Instrument bewerkstelligen. Mit der zu erwartenden Steigerung der Scanraten in der Zukunft werden so Tachymeter ebenfalls für den Einsatz in Scanprojekten interessant.

Neben den von Herstellern angebotenen Funktionen lassen sich z. B. die Kamerabilder der Tachymeter auch für weiterführende Anwendungen nutzen. Bei diesen wird der Bildinhalt analysiert und interpretiert, um beispielsweise Zusatzinformationen über einen Messpunkt mithilfe codierter Zielzeichen zu übertragen (Zhou et al. 2016). Es ist ebenfalls möglich, nichtsignalisierte Objektpunkte aus den Aufnahmen eines bildgebenden Tachymeters zu detektieren und automatisiert einzumessen. Abb. 7 zeigt die Aufnahme eines Brückenträgers auf dem die Positionen der Verbindungsbolzen erfasst werden sollen. Nach der einmaligen Definition eines Zielpunktes können ähnliche Objektpunkte mittels Mustererkennung (template matching) im Bild gefunden werden. Diese lassen sich anschließend vollautomatisch anzielen und reflektorlos einmessen. Mit diesem Verfahren ist es möglich, beliebige bekannte Formen als Zielzeichen zu verwenden. Mit der raschen voranschreitenden Entwicklung der Künstlichen Intelligenz im Bereich der Bildinterpretation und Objekterkennung könnte es bald möglich sein, dass Tachymeter festgelegte Objekte vollautomatisch finden und einmessen.

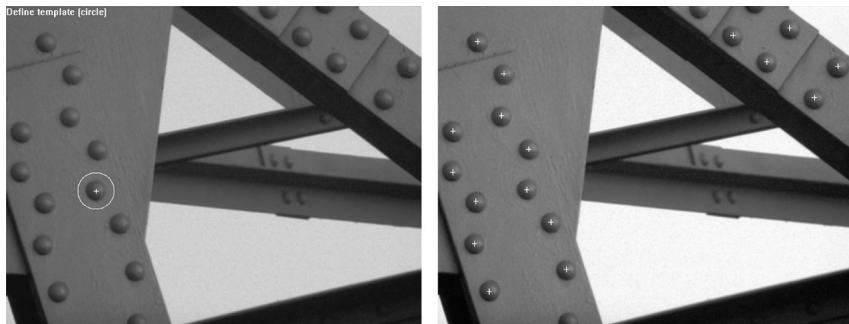


Abb. 7: Beispiel einer Mustererkennung: kreisförmige Bereichsauswahl (links), markierte, detektierte Ziele (rechts)

Die Integration von Bildsensoren und der Scanfunktion in das Tachymeter ermöglichen eine konsistente flächenhafte Datenerfassung ohne auf die gewohnten Anwendungen (freie Stationierung, Netzmessung, etc.) eines Tachymeters verzichten zu müssen. Die Verschmelzung von hochauflösenden Bildern und Scans ermöglicht zudem die Entwicklung neuer Auswertemethoden (vlg. Kap. 4) für die Deformationsanalyse. Mithilfe der aufgezeichneten Bilder und Methoden der Bildverarbeitung können Korrespondenzen in den Scandaten (Tiefenbilder) gefunden werden. Die so ermittelten identischen Objektpunkte aus unterschiedlichen Aufnahmepochen genügen damit den Anforderungen der strengen Deformationsanalyse und können dieser zugeführt werden.

Wesentliche Teile des hier vorgestellten Auswerteverfahren beruhen auf Bildverarbeitungsmethoden, die neben einer hohen Bildauflösung auch eine hohe Bildqualität erfordern. Hier zeigen die kommerziell verfügbaren Instrumente zum Teil noch Schwächen. Die verbauten Kameras, in Kombination mit der zur Verfügung stehend Software, bieten oft nicht die nötigen Einstellungsmöglichkeiten, um eine konstante Belichtung und Farbgebung über einen Bildverband hinweg zu erzeugen. Bei nicht optimaler Beleuchtung zeigen die Bilder zudem ein starkes Rauschen, insbesondere bei Geräten mit Koaxialkamera und Okular. Hier wird nur ein Teil des Lichtes, das in das Teleskop einfällt, auf den Kamerachip geleitet. Dies könnte sich zum Teil mit der (bereits begonnenen) Entwicklung okularloser Instrumente verbessern; generell zeigen sich die verbauten Kameras (speziell in Innenräumen) als nicht sehr lichtstark. Hier wäre eine Verbesserung der Kameraqualität wünschenswert. Ebenfalls zeigen die verbauten Kameras nur einen kleinen Dynamikumfang, sodass eine inhomogene Beleuchtung der Szene schnell zu Über-/Unterbelichtung einzelner Bildbereiche führt. Hier wären Funktionen zum Erzeugen von HDR-Bildern hilfreich.

Eine weitere praxisrelevante Größe ist die Übertragungsgeschwindigkeit der Daten. Die vorgestellte Methode erfordert derzeit noch die Übertragung der

aufgenommenen Bilder und Scans an einen externen Auswerterechner. Dies ist insbesondere bei der Speicherung der Bilddaten sehr zeitintensiv. Zwar bieten die Hersteller auch die Live-Übertragung eines Videostreams an (meist um das Arbeiten im Ein-Mann-Betrieb zu ermöglichen), dieser ist jedoch in der Auflösung und Bildrate stark beschränkt und kann nicht für eine sinnvolle Auswertung verwendet werden.

Natürlich übertreffen terrestrische Laserscanner die Tachymeter in der Punkt- rate bei weitem – die Vorteile der kombinierten Auswertung von Scan- und Bilddaten für die strenge Deformationsanalyse kompensieren den Geschwindigkeitsverlust (außer für dynamische Spezialaufgaben) jedoch in überzeugendem Maße.

Literatur

Holst, C.; Klingbeil, L.; Esser, F.; Kuhlmann, H. (2017): Using point cloud comparisons for revealing deformations of natural and artificial objects. In: Kopáčik, A.; Kyrinovič, P.; Henriques, M. J. (Hrsg.): Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Surveying (INGEO 2017), S. 265–274.

Kauker, S.; Holst, C.; Schwieger, V.; Kuhlmann, H.; Schön, S. (2016): Spatio-temporal Correlations of Terrestrial Laser Scanning. In: *avn – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 123 (6), S. 170–182.

Mischke, A. (2000): Entwicklung eines Videotheodolit-Messsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten. Dissertation, Technische Universität Wien.

Reiterer, A. (2013): Novel Observation Concepts for Image Assisted Total Stations in Applied Geodesy – Development Steps and Applications. Habilitation, Technische Universität München.

Scherer, M. (2004): Intelligent Scanning with Robot-Tacheometer and Image Processing – a Low Cost Alternative to 3D Laser Scanning? In: Proceedings of the FIG Working Week, CD-ROM.

Schlemmer, H. (1996): Grundlagen der Sensorik. Eine Instrumentenkunde für Vermessungingenieure. Heidelberg.

Schrock, G. (2017): Behind the Big Eye, In: *xyHt* (July 2017), S. 16–23.

Vogel, M. (2006): Vom Pixel zur Richtung. Die räumlichen Beziehungen zwischen Abbildungsstrahlen und Tachymeter-Richtungen. Dissertation, TU Darmstadt.

Wagner, A. (2016): A new approach for geo-monitoring using modern total stations and RGB+D images. In: *Measurement* 82, S. 64–74. DOI: [10.1016/j.measurement.2015.12.025](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.025).

Wagner, A.; Wasmeier, P.; Wunderlich, T.; Ingensand, H. (2014): Vom selbstzielenden Theodolit zur Image Assisted Total Station. In: *avn – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 121 (5), S. 171–180.

Walser, B. (2004): Development and Calibration of an Image Assisted Total Station. Dissertation, ETH Zürich.

Wasmeier, P. (2009): Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter. Dissertation, Technische Universität München.

Wiedemann, W.; Wagner, A.; Wunderlich, T. (2017): Ableitung von 3D-Verschiebungsvektoren aus fusionierten Laserscan- und Bilddaten. In: *avn – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 124 (11-12), im Druck.

Wunderlich, T. (2017): 3D Congruency – The Point Cloud Problem. 7th International Conference on Engineering Surveying (INGEO2017), 18–20 Oktober 2017. Lissabon, Portugal.

Zhou, Y.; Wagner, A.; Wunderlich, T.; Wasmeier, P. (2016): Calibration Method for IATS and Application in Multi-Target Monitoring using Coded Targets. In: *Journal of Applied Geodesy* 11 (2), S. 99–106. DOI: [10.1515/jag-2016-0021](https://doi.org/10.1515/jag-2016-0021).

Kontakt

Wolfgang Wiedemann | Andreas Wagner | Peter Wasmeier | Thomas Wunderlich
Technische Universität München, Lehrstuhl für Geodäsie
Arcisstraße 21, 80333 München
w.wiedemann@tum.de

Handgeführte 3D-Scansysteme zur Vervollständigung von Punktwolken aus terrestrischen oder mobilen Laserscannern

Markus Gerke | Benjamin Rein | Yahya Ghassoun

1 Einleitung

Das Laserscanning im Innenraum zum Zwecke der baulichen Bestandsaufnahme hat sich in den letzten Jahren immer stärker etabliert. Hierbei spielt nach wie vor das statische terrestrische Laserscanning (TLS) eine wichtige Rolle: ein Panoramascanner erfasst die interessierenden Bereiche in einer klassischen polaren Konfiguration. Bei dieser Erfassungsgeometrie kommt es zu Abschattungen, wenn Objekte im Vordergrund den Sichtstrahl blockieren. Aus wirtschaftlichen, aber auch aus baulichen Gründen vor Ort, ist es nicht immer möglich, weitere Gerätestandorte zu wählen, um diese Abschattungen zu minimieren. Selbst beim mobilen Laserscanning (MLS), bei dem sich Zeilenscanner auf einer mobilen Plattform befinden, sind Verdeckungen nicht immer zu verhindern.

In solchen Situationen bietet es sich an, mit handgeführten Scannern, die mittlerweile in verschiedenen Variationen auf dem Markt existieren, zu arbeiten. Schwer zugängliche Abschnitte können mit ihnen abgescannt und hinterher in die Punktwolke des TLS oder MLS eingepasst werden. Zu Genauigkeitsanalysen dieser Systeme unter Laborbedingungen siehe Kersten et al. (2016).

In den folgenden Untersuchungen wird die Eignung zweier Handscanner für typische Anwendungen zur Bestandsdokumentation beleuchtet. Es wird unter realen Bedingungen analysiert, mit welcher Genauigkeit diese Geräte arbeiten und inwieweit diese von den Eigenschaften des aufgenommenen Objektes abhängen. Letztendlich soll eine vollständige, homogene Punktwolke eines Innenraums erstellt werden, die einer weiteren Verwendung, beispielsweise einer 3D-CAD-Modellierung zugeführt werden kann.

Die hier betrachteten Fragen sind:

- a) Wie hoch ist die Punktqualität von Handscannern in typischen Innenraumszenarien?
- b) Können Teilbereiche, die mit Handscannern erfasst werden, automatisch in die übergeordnete Punktwolke aus TLS eingefügt werden: welche Randbedingungen sind zu beachten und welche Genauigkeiten sind zu erzielen?

Es ist anzumerken, dass es sich bei den untersuchten Geräten um Systeme handelt, die die Punktinformation mithilfe von Bildkorrelationsverfahren ableiten, also im Gegensatz zu klassischen TLS/MLS nicht über ein aktives Lasersystem Abstände messen. Das Hauptaugenmerk liegt hier nicht so sehr in der absolut erreichbaren Genauigkeit, sondern, wie sehr die Punkte in Abhängigkeit von Oberflächenbeschaffenheit von denen eines aktiven Systems abweichen. Ferner sollen gegebenenfalls Artefakte, die in realen Umgebungen beobachtet werden, dokumentiert werden. Diese können beispielsweise von unzureichender Korrelationen oder Ko-Registrierung zur Verknüpfung benachbarter Teil-Punktwolken herrühren. Aus dem Grund wurde auch u. a. eine typische Industrie-Szenerie (*Rohrsystem*) gewählt, denn glatte, spiegelnde Oberflächen stellen korrelationsbasierte Ansätze vor große Herausforderungen.

2 Evaluierungsmethodik, Szenarien und gewählte Systeme

Die Evaluierung der von den Handscannern erstellten Szene erfolgte in drei Schritten:

- a) Visuelle Kontrolle, beispielsweise hinsichtlich offensichtlicher Artefakte in der Punktwolke,
- b) Statistische Analyse der Punktabstände zu einer Referenzebene (in Teilbereichen; vorzeichenbehaftet),
- c) Statistische Analyse der absoluten Punktabstände zur Referenzpunktewolke.

Zur Herstellung der erforderlichen Ko-Registrierung zwischen zu testender Punktwolke und der Referenz-Punktwolke aus TLS wurden zwei Verfahren angewendet und deren Ergebnis getrennt betrachtet: es kam sowohl eine manuelle Auswahl von Transformationspunkten, wie auch eine auf dem ICP-Algorithmus (Horn 1987, Besl und McKay 1992) basierende automatische Ko-Registrierung zum Einsatz. In beiden Fällen wurde eine 3D-Ähnlichkeitstransformation ohne Schätzung des Maßstabs (sechs Parameter) angewendet.

2.1 Abstand zu Referenzebene

Bei hinreichend ebenen Objekten wird bei diesem Verfahren eine Ebene in die Referenzpunktewolke geschätzt (Pandžić et al. 2014, Nex et al. 2015). Der vorzeichenbehaftete Abstand jedes Punktes des zu testenden Datensatzes kann dann in eine statistische Analyse Eingang finden. In der Regel wird für diese Abstände die Normalverteilung angenommen: Liegen keine groben Fehler vor, liefert ein von Null signifikant verschobener Mittelwert einen Hinweis auf einen systematischen Fehler, und die Höhe der Standardabweichung hängt von den im

Messprozess vorhandenen zufälligen Fehlern ab. Insbesondere die Möglichkeit, das Vorzeichen des Abstandes zu bestimmen (liegt ein Punkt vor oder hinter der Referenzebene?) kann oftmals wertvolle Erkenntnisse über systematische Einflüsse bringen.

2.2 Absoluter Punkt-zu-Punkt-Abstand

Bei nicht-parametrisierbaren Flächen, wie sie häufig beispielsweise in Industrie-Szenarien zu finden sind, ist die Schätzung einer Referenzfläche oder anderer

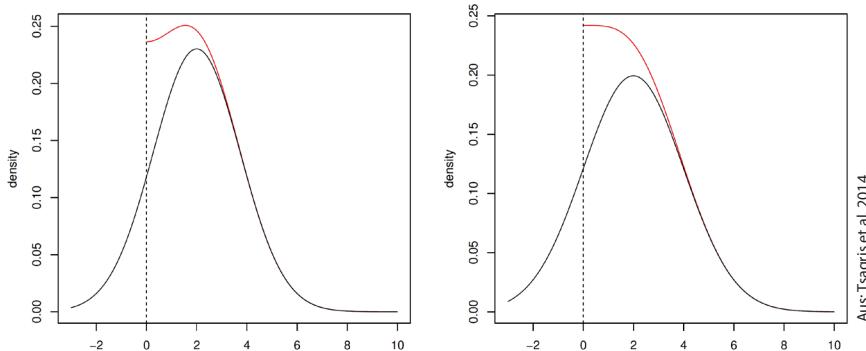


Abb. 1: Beispielhafte Dichtefunktionen für die (gefaltete) Normalverteilung: $\mu = 2$ und $\sigma^2 = 3$ (links) und $\mu = 2$ und $\sigma^2 = 4$ (rechts)

regulärer Körper wie Zylinder nicht möglich. Um auch in solchen Fällen die Qualität einer Punktwolke bewerten zu können, wird in der Regel auf die Berechnung der Abstände der am nächsten liegenden Punkte des Referenz- und Testdatensatzes zurückgegriffen. Nächste Nachbarn werden effizient mit einer KD-Baum-Suche ermittelt. In diesem Fall ist die Topologie innerhalb der Referenzpunktewolke nicht bekannt, bzw. kann eine über die gesamte Szene hinweg einheitliche Orientierung vermaschter Punkte aus der lokalen Nachbarschaft nicht ohne Weiteres abgeleitet werden. Aus diesem Grund kann dem Abstand der Punkte kein Vorzeichen zugeordnet werden. Diese Abstände folgen einer *gefalteten Normalverteilung* (Leone et al. 1961, Tsagris et al. 2014): Von der eigentlich normalverteilten Zufallsgröße ist nur der absolute Wert beobachtbar. **Abb. 1** zeigt beispielhaft die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer Normalverteilung (schwarz) und einer gefalteten Normalverteilung (rot) für $\mu = 2$ und $\sigma^2 = 3$ (links) und $\mu = 2$ und $\sigma^2 = 4$ (rechts) (Tsagris et al. 2014). In den Versuchen, die hier beschrieben werden, wurden die Parameter der gefalteten Normalverteilung der Abstände mithilfe des Programmsystems R bestimmt.

Aus: Tsagris et al. 2014

2.3 Szenarien

Es wurden zwei Handscanner untersucht: DotProduct DPI-8 und Faro Free-style 3D. Als terrestrischer Laserscanner stand eine Scanstation P20 von Leica zur Verfügung. Die Aufnahme der Daten erfolgte in zwei verschiedenen Standorten. Der Datensatz *Vorlesungssaal* wurde in einem Bereich eines Vorlesungssaals der Technischen Universität Braunschweig erzeugt. Das Besondere an dieser Aufnahme ist, dass der interessierende Bereich lediglich seitlich vom TLS erfasst wurde, und nur frontal mit den Handscannern. Der zweite Datensatz *Rohrsystem* wurde in einem im Bau befindlichen Industriekomplex erfasst: Es handelt sich um einen Bereich mit metallischen Rohrleitungen verschiedener Durchmesser, Oberfläche und Struktur.

Zur effizienteren manuellen Registrierung und Evaluierung der Handscannerdaten mit denen des TLS wurden Signaltafeln und gedruckte Muster in den Szenen platziert. In Abb. 2 sind beispielhaft Ausschnitte für beide Datensätze gezeigt. Es ist gut zu erkennen, welche Bereiche jeweils nicht mit dem TLS, aber mit dem Handscanner erfasst worden sind: Im Vorlesungssaal der Tisch mit dem darauf platzierten Gerät und bei den Rohrsystemen Teile des wandseitigen Rohres.

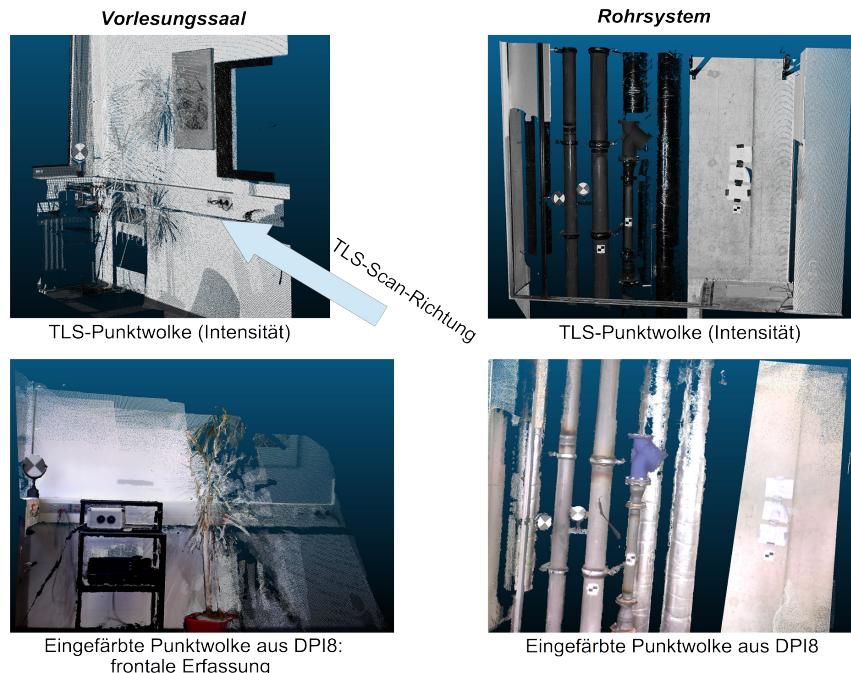


Abb. 2: Ausschnitte aus den Datensätzen *Vorlesungssaal* (links) und *Rohrsystem* (rechts)

2.4 DotProduct DPI-8

Dieses handgeführte System besteht im Wesentlichen aus dem von der Microsoft Kinect erster Generation bekannten PrimeSense-Sensor und einem daran fest montierten Android-Tablet. Der Sensor besteht aus einer Infrarot-Lichtquelle und einer Infrarot-, sowie einer RGB-Kamera. Die IR-Lichtquelle und die IR-Kamera spannen eine Stereobasis bekannter Länge auf. Das von der Lichtquelle emittierte Licht wird mittels eines Gitters gebeugt, so dass ein Muster entsteht. Ein (virtuelles) Referenzmuster, das sich auf einen bekannten Abstand von der Basis bezieht wird mit dem tatsächlich durch die IR-Kamera beobachteten Muster pixelgenau korreliert. Der Abstand, den die beiden Muster von einander im Bildraum haben, ist proportional zum Abstand senkrecht zur Basis (Disparität). Auf diese Weise wird pro Bild und pro Pixel über ein Triangulationsverfahren ein Entfernungswert berechnet, denn sowohl die Brennweite der IR-Kamera, als auch die Basis sind bekannt. Da neben dem Entfernungswert pro Pixel auch ein Farbwert von der RGB-Kamera erfasst wird, spricht man von RGB-D-Daten. Die so gewonnenen „Punktwolken“ der einzelnen Bilder („Frames“) werden mithilfe des Beschleunigungssensors des Android-Tablets miteinander verknüpft, so dass eine homogene 3D-Punktwolke entsteht. Siehe Tab. 1 für die Spezifikationen des Systems.

In Kersten et al. (2016) werden verschiedene Systeme des Vorgängermodells DPI-7 untersucht. Es zeigt sich, dass beispielsweise die mittleren Abweichungen und die Standardabweichung von Messungen zu einem Referenzkörper relativ

Tab. 1: Spezifikationen DotProduct DPI-8

Allgemeine Angaben	Spezifikationen	DotProduct DPI-8
Reichweite	0,6–3,3 m	
Betriebstemperaturbereich	5–33 °C	
Abmessungen	23 × 27 × 8 cm	
Gewicht	<1 kg	
Bedienoberfläche	Android-Betriebssystem	
Nomineller Punktabstand	≤1,7 mm bei 1 m Entfernung ≤3,4 mm bei 2 m Entfernung	
Nominelle Mindestgenauigkeit	Bei Reichweite <1 m → 0,4 % Bei Reichweite 2 m–3,3 m → 1,2 %	
Preis	5.000–6.000 Euro Netto	 © digitalstoryofanarchitect.com

stark von Gerät zu Gerät schwanken, aber meist jeweils über einen Millimeter, bis hin zu mehr als 2 mm betragen. Khoshelham und Oude Elberink (2012) untersuchen die von der Kinect (PrimeSense) erreichbare Punktgenauigkeit. Da der DPI ebenfalls mit diesem Sensor ausgestattet ist, scheint ein Vergleich angezeigt, obwohl in dem DPI-System beispielsweise die Beschleunigungssensoren des Tablet-Computers zur Ko-Registrierung genutzt werden. Khoshelham und Oude Elberink ermitteln die Punkt-Abstandsgenauigkeit mithilfe eines TLS höherer Genauigkeit. Im Vergleich zu Kersten et al. (2016) werden typische Innenraumszenen gewählt, beispielsweise die durch Türblätter aufgespannten Ebenen. Die ermittelten Ablagen zur geschätzten Türebene weisen Standardabweichungen zwischen 4 mm im Nahbereich (bis zu 1 m Abstand) bis zu 5 cm bei Abständen von 3 m oder 5 m auf.

2.5 Faro Freestyle 3D

Der Faro Freestyle 3D ist über ein Kabel mit dem Tablet gekoppelt. Wie auch beim DPI-8 kann die Aufnahme in Echtzeit auf dem Tablet verfolgt und somit fehlende Datenbereiche ausgeschlossen werden. Es sind zwei Infrarotkameras, eine RGB-Kamera und eine Laserquelle integriert: Ähnlich wie bei DotProduct dient die Infrarot-Laserquelle dazu, ein Muster zu projizieren, das von den beiden Infrarotkameras aufgenommen, korriktiert, und trianguliert wird. Die RGB-Kamera dient zur Einfärbung der Punktwolke. Tab. 2 fasst wesentliche Merkmale des Systems zusammen.

Tab. 2: Spezifikationen Faro Freestyle 3D

Allgemeine Angaben	Spezifikationen	Faro Freestyle 3D
Reichweite	0,5–3,0 m	
Betriebstemperaturbereich	0–40 °C	
Abmessungen	26 × 31 × 10,5 cm	
Gewicht	0,98 kg	
Scanvolumen	8,1 m ³	
Nominelle Punkt-messgenauigkeit	<1,5 mm bei 1 m Entfernung	
Preis	ca. 13.500 Euro Netto	© faro.com

2.6 Leica P20

Der Leica P20 gehört zu den terrestrischen Laserscannern, die nach dem Prinzip der Laufzeitmessung arbeiten. Es misst bei einem Sichtfeld von 360°, mit einer Messgeschwindigkeit von bis zu einer Million Punkte pro Sekunde. Der Entfernungsmessfehler liegt nominell im Nahbereich – je nach Reflektivität – im sub-mm-Bereich.

3 Ergebnisse

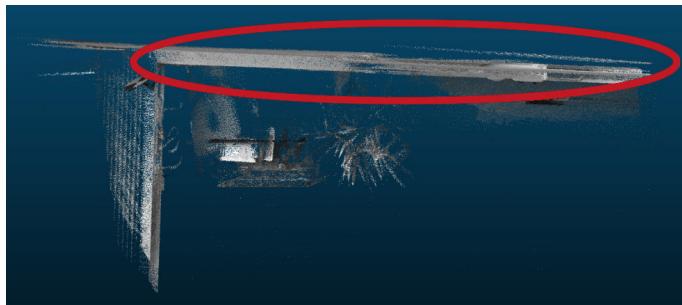
Bei der Aufnahme wurden die Handscanner in einem ungefährten Abstand von 1 m vor den Objekten entlanggeführt. Dabei ist aber zu bedenken, dass es nicht verhindert werden kann, dass auch Objekte erfasst werden, die im Hintergrund oder seitlich in einem größeren Abstand platziert sind. Diese werden zwangsläufig wegen der entfernungsabhängigen Messgenauigkeit in geringerer Qualität und Punktdichte erfasst. Soweit möglich wurde aber versucht, diese Bereiche mit in die kurzabständige Aufnahme einzubeziehen.

3.1 Vorlesungssaal

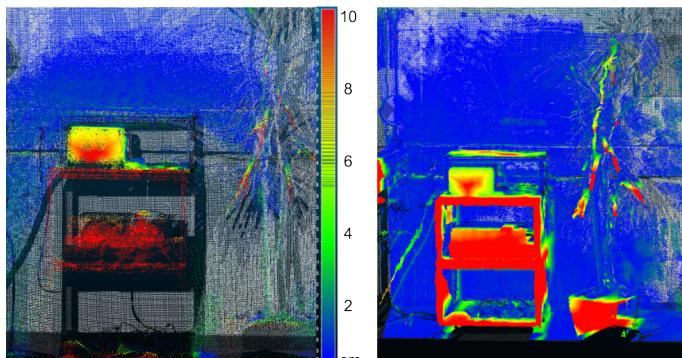
In Abb. 3 (oben) ist eine vertikale Draufsicht auf die Punktwolke, die mit dem Faro Freestyle 3D erzeugt wurde, zu sehen. Ein Fehler, der in diesen Daten vorhanden ist, ist hier erkennbar: Die rückwärtige Wand des Raumes ist doppelt in den Daten repräsentiert. Hierbei scheint es sich um Ko-Registrierungsfehler zu handeln. In den Daten des DotProduct DPI-8 sind keine nennenswerten Artefakte zu sehen. Insgesamt ist zu erkennen, dass die DPI-8-Punktwolke in diesem Fall dichter ist, als die des Faro. Generell ist die Punktdichte abhängig von der Geschwindigkeit, mit der ein Objekt erfasst wird. Daher ist dieser Parameter in der Praxis weniger vom Gerät als vielmehr vom Operateur oder anderen objektiven Umständen abhängig.

Die großen Abstände zur TLS-Punktwolke (Abb. 3, unterer Bereich) sind auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Objekte im Vordergrund nicht von dem TLS erfasst wurden.

Der Fehler in der Punktwolke des Faro, der sich in einer doppelt in der Punktwolke repräsentierten Rückwand zeigt, macht sich auch bei der Analyse der Punkt-zu-Ebene-Abstände bemerkbar: nach der manuellen Registrierung beträgt der mittlere Fehler zwar $m = 0$ mm, die Standardabweichung ist mit $s = 13$ mm aber sehr hoch. Der ICP-Algorithmus führt zu einer Ausmittelung der Fehler: $m = 5$ mm ($s = 9$ mm). Beim DPI-8, bei dem keine Artefakte dieser Art auftreten, ist der mittlere Abstand zur Referenzebene nach einer manuellen Ko-Registrie-



Faro Punktwolke: Draufsicht



Faro und DPI-8: Abstand zu TLS-Punktwolke

Abb. 3:
Faro Free-style 3D und
DPI-8: Draufsicht (Faro)
und Punkt-zu-Punkt-Ab-
stände zur
TLS-Punkt-
wolke, Vor-
lesungssaal

rung 2 mm ($s = 3$ mm); nach dem ICP ist der mittlere Abstand $m = -3$ mm und die Standardabweichung ist etwas geringer ($s = 2$ mm). **Abb. 4** zeigt in der oberen Hälfte den farblich kodierten vorzeichenbehafteten Abstand der ICP-ko-registrierten Punktwolke zur Referenzebene. Die automatisierte Einpassung führt zu einer leichten Verkipfung der Ebenen (Abstand von ca. 0 cm am Boden bis 2 cm oben). Diese Verkipfung wird jedoch nicht bei der Berechnung der Punkt-zu-Ebenen-Abstände berücksichtigt, was zu einer veränderten Standardabweichung führt. **Abb. 4** im unteren Bereich sowie **Tab. 3** geben pro Datensatz und Ko-Registrierungstyp (F: Faro, D: DotProduct, M: manuell, I: ICP) den mittleren Abstand (Punkt) und die einfache Standardabweichung als Streumaß an.

3.2 Rohrsystem

Die Punktwolken beider Handscanner weisen bei der Erfassung des Rohrsystems teilweise erhebliche Fehler auf.

Wie in **Abb. 5**, oben links beispielhaft zu sehen, sind in der Punktwolke des Faro-Systems wieder einige Bereiche doppelt in der Punktwolke dargestellt. Zu

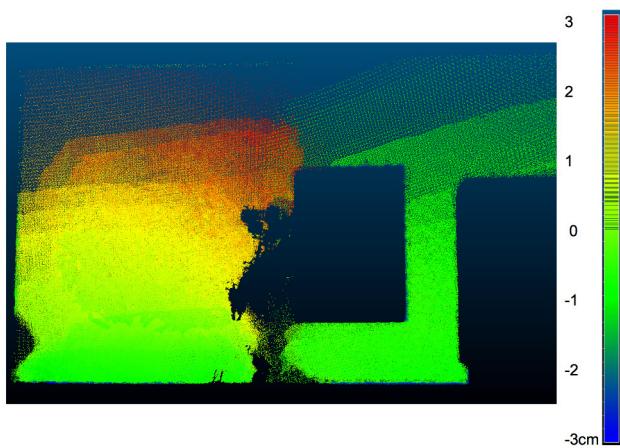
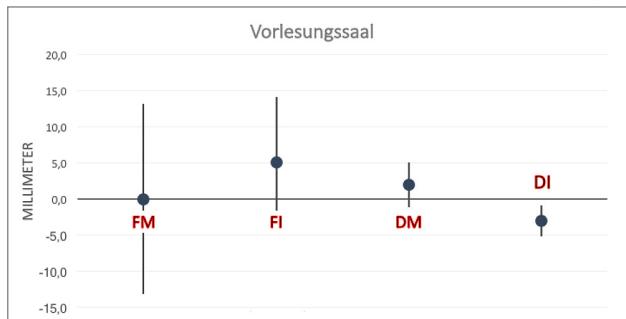


Abb. 4:
Punkt-zu-Ebe-
ne-Abstand Faro
Freestyle zu
Referenzebene
nach ICP-basierter
Ko-Registrierung
(oben), Mittelwert
und Streuung
(einfache Standard-
abweichung) für
alle vier Kombi-
nationen – F: Faro,
D: DotProduct,
M: manuell, I: ICP,
Vorlesungssaal



Tab. 3: Ebenenbasierte Evaluierung Datensatz „Vorlesungssaal“

Scanner/ Registrierungs- methode	Mittel- wert [mm]	Standard- abweichung [mm]
FM	0	13
FI	5	9
DM	2	3
DI	-3	2

dem fehlerhaften Bereich gehört ein signalisierter Punkt, der dadurch für die manuelle Registrierung der Punktwolken nicht mehr effizient genutzt werden konnte. Des Weiteren wurden zwei der Rohre versetzt bzw. zweifach abgebildet. Im oberen rechten Bereich in Abb. 5 sind ähnliche Artefakte in den Daten des DPI-8 zu sehen. Die unteren Grafiken in Abb. 5 zeigen den farblich kodierten

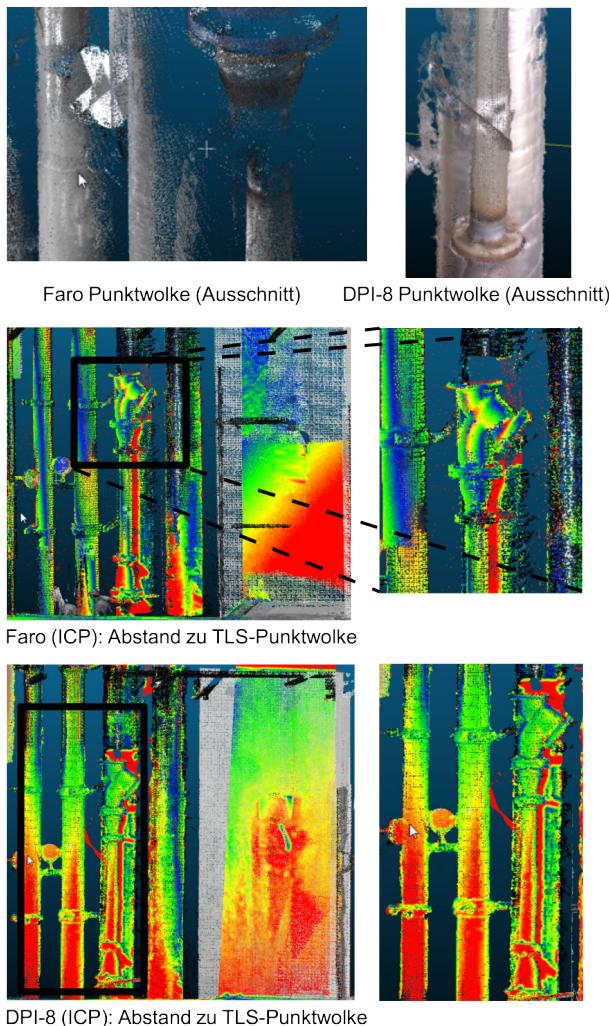


Abb. 5:
Faro Freestyle
3D und und
DPI-8: Daten-
ausschnitte
und Punkt-
zu-Punkt-Ab-
stände zur
TLS-Punkt-
wolke, Rohr-
system

Abstand der Punkte (jeweils nach ICP-basierter Ko-Registrierung) zur Referenz. Der Bereich wurde auf max. 3 cm beschränkt, um den Einfluss, den nicht erfass- te Objektbereiche auf die Statistik haben klein zu halten; dennoch sind die Areale hinter dem Y-Rohr nicht in der TLS-Referenz (siehe Vergrößerung), was zu dem maximalen Punktabstand von 3 cm führt. Unabhängig davon sind jedoch systematische Verschiebungen zu beobachten; beim Faro ersichtlich direkt an dem Y-Rohr, beim DPI an den beiden Vertikalrohren auf der linken Seite. Diese Beobachtung ist dadurch zu erklären, dass der ICP-Algorithmus die Abstände

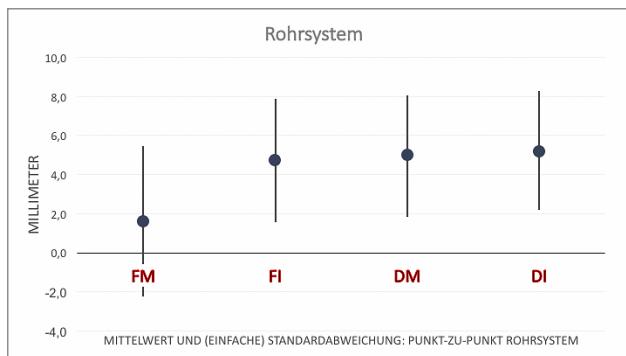


Abb. 6:
Mittelwert und Streuung (einfache Standardabweichung) für alle vier Kombinationen – F: Faro, D: DotProduct, M: manuell, I: ICP, Rohrsystem

Tab. 4: Punkt-zu-Punkt-basierte Evaluierung Datensatz „Rohre“

Scanner/ Registrierungs- methode	Mittel- wert [mm]	Standard- abweichung [mm]
FM	1,6	3,8
FI	4,7	3,1
DM	5,0	3,1
DI	5,2	3,0

über alle Punkte der Szene minimiert und die „Doppelabbildungen“ dadurch zwangsläufig zu einer globalen Verschlechterung führt. Es wird während der ICP-Iterationen zwar ein vorgegebener maximaler Abstand berücksichtigt, damit die in TLS nicht erfassten Bereiche keine Auswirkung haben. Die gezeigten Artefakte/Doppelabbildungen fallen aber hierdurch nicht heraus.

Dieser Effekt ist auch bei den Statistiken aus der Punkt-zu-Punkt-Analyse ersichtliche (Abb. 6 und Tab. 4): Zumindest bei den Faro-Daten führt die manuelle Punktregistrierung zu global besseren Ergebnissen als die durch ICP erfolgte Registrierung.

4 Fazit

Die Benutzung der Handscanner in der Praxis gestaltet sich in der Regel unkompliziert. Der DotProduct DPI-8 braucht nach dem Start ca. 10 Minuten als Aufwärmzeit und ist danach jedoch ohne Einschränkungen einsatzbereit. Schon während der Erfassung der Daten kann bei beiden Systemen in Echtzeit mitverfolgt werden, welche Bereiche des Objekts erfasst wurden und es wird zusätzlich

farblich dargestellt, in welcher Dichte die Punktwolke aufgenommen wurde. Wenn man nach der Aufnahme feststellen sollte, dass einige Bereiche noch nicht in der gewünschten Dichte vorliegen, kann man an diese Bereiche einen neuen Scan anknüpfen, der dann mit der bereits vorhandenen Punktwolke ko-registriert wird. Zu empfehlen ist es, das Gerät langsam und in kleinen Kreisbewegungen zu führen, da die Daten so schneller aufgenommen werden können. Es ist ratsam Objekte mit fehlender Struktur mit Punkten zu bekleben, da sich die Aufnahme sonst schwierig gestaltet bzw. die Ko-Registrierung verloren gehen könnte. Wegen der hohen Punktdichte werden sehr viele Daten, damit auch große Dateien, erzeugt, weshalb der DPI-8 nicht für sehr große Volumen geeignet scheint.

Bei dem Faro Freestyle gestaltet es sich schwierig, bei Abbruch der Frame-Ko-Registrierung diese innerhalb der noch laufenden Messung wiederherzustellen. Ist die Ko-Registrierung nicht mehr gegeben, wird die Messung nach einiger Zeit selbstständig gestoppt. Es ist danach eine neue Messung zu starten. Die Daten der beiden einzelnen Messungen sind zu einer einzelnen Punktwolke zusammensetzbare. Um diesen Schritt zu umgehen, ist darauf zu achten, den Handscanner ruhig und gleichmäßig über das Objekt zu führen. Generell ist es wegen der bildbasierten Erfassung bei Objekten ohne bzw. mit wenig Struktur (z.B bei weißen Wänden) ratsam, diese mit einer (künstlichen) Textur zu versehen, sofern das möglich ist.

Zu den datenspezifischen Beobachtungen ist zu sagen, dass sowohl die Punktwolken des Faro Freestyles 3D als auch die des DotProduct DPI-8 zum Teil relevante Artefakte und Deformationen aufweisen. Dies kann zum einen an technischen Beschränkungen liegen, wie zum Beispiel der Entfernungsabhängigkeit, und zum anderen an der Oberfläche der gescannten Objekte. Durch spiegelnde Oberflächen, wie die der beschichteten Rohrleitungen kann es zu Reflexionen und Fehlern bei der Bildkorrelation kommen, die wiederum die fehlerhaft duplizierten Punktwolken zur Folge haben. Mit den Artefakten geht selbstverständlich auch eine Unsicherheit einher, nämlich, ob und wenn ja welche der Teilpunktwolken das Objekt richtig repräsentieren. Ist dieses nicht klar aus den Daten ersichtlich, muss ggf. erneut erfasst, bzw. auf die betreffenden Teile verzichtet werden.

Bei einer Aussage zur Genauigkeit der Daten muss zwischen den zwei Unterschiedlichen Registrierungsmethoden unterschieden werden. Die Ergebnisse der beiden Geräte mit manueller Registrierung zeigen überwiegend kleine Differenzen zur Referenz. Durch Anwendung der ICP-Methode bei der Registrierung verschlechtern sich die Ergebnisse, wenn die genannten Artefakte auftreten. Wenn genügend Struktur in der Szene ist, und verhältnismäßig wenig Ausreißer oder Deformationen in der Punktwolke sind, kann der ICP-Algorithmus global

die Registrierung verbessern, wie im Datensatz Vorlesungssaal beim DPI-8 gesehen.

Eine gesicherte quantitative Aussage zur erreichbaren Genauigkeit ist sehr schwierig zu treffen, denn wie bei den beiden recht praxisnahen Beispielen gezeigt, ist die erzielbare Messgenauigkeit nicht nur ein Parameter des Systems an sich, sondern auch konkret von der Umgebung, bzw. der Oberflächenbeschaffenheit der zu erfassenden Objekte abhängig. Dieses ist zu beachten, vor allem, wenn Systeme mit verschiedener Erfassungstechnik verglichen oder kombiniert werden.

Unter relativ guten Voraussetzungen (hier *Vorlesungssaal*) und unter der Berücksichtigung, dass die hier verwendete Referenz etwas unsicherer bestimmt wurde als in Kersten et al. (2016) können wir die dort dokumentierten Werte für den DPI-8 in etwa bestätigen. Weiterhin liegt die Messgenauigkeit im von Khoshelam und Oude Elberink (2012) ermittelten Bereich. Außerdem kann für den idealen Fall auch festgehalten werden, dass die vom Hersteller angegebenen Genauigkeitsbereiche nicht zu optimistisch angegeben sind, sofern unter dem Wert „Mindestgenauigkeit“ die einfache Standardabweichung verstanden wird.

Für den Faro Freestyle 3D ist der globale Fehler bei dem Datensatz *Rohre* geringer als in dem anderen Datensatz, da dort die doppelte Repräsentation der Wand einen größeren Einfluss auf die Registrierungsgenauigkeit hat.

Wir danken der Firma Laserscanning Europe GmbH für die Bereitstellung der beiden Handscannersysteme.

Literatur

Besl, P.J.; McKay, N.D. (1992): A Method for Registration of 3D-Shapes. In: IEEE PAMI, 14(2), S. 239–256.

Horn, B.K.P. (1987): Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. In: Journal of the Optical Society of America, 4(4), S. 629–642.

Kersten, T.P.; Przybilla, H.-J.; Lindstaedt, M. (2016): Investigations of the Geometrical Accuracy of Handheld 3D Scanning Systems. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (5-6), S. 271–283.

Khoshelham, K.; Elberink, S.O. (2012): Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications. In: Sensors (12), S. 1437–1454.

Leone, F.C.; Nottingham, R.B.; Nelson, L.S. (1961): The Folded Normal Distribution. In: Technometrics 3(4), S. 543–550.

Nex, F.; Gerke, M.; Remondino, F.; Przybilla, H.-J.; Bäumker, M.; Zurhorst, A. (2015): ISPRS Benchmark For Multi-Platform Photogrammetry. In: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., II-3/W4, S. 135–142. DOI: [10.5194/isprsaannals-II-3-W4-135-2015](https://doi.org/10.5194/isprsaannals-II-3-W4-135-2015).

Pandžić, J.; Erić, V.; Božić, B.; Pejić, M. (2014): The Accuracy Analysis of Leica ScanStation P20 Data by Means of Point Cloud Fitting Algorithm. In: INGEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying, Prague.

Tsagris, M.; Beneki, C.; Hassani, H. (2014): On the folded normal distribution. In: Mathematics 2(1), S. 12–28.

Kontakt

Markus Gerke | Benjamin Rein | Yahya Ghassoun

Technische Universität Braunschweig

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie

Bienroder Weg 81, 38106 Braunschweig

m.gerke@tu-bs.de

Vergleichende Untersuchungen zur Erfassung und 3D-Modellierung des Kreisels der Bobbahn Altenberg mit unterschiedlichen Aufnahmetechnologien

Wolffried Wehmann | Martin Ocipka | Philipp Knötzsch | Matthias Schramm

DKB Altenberg 2017

1 Motivation und Messobjekt

Datenerfassung mittels Terrestrialem Laserscanning (TLS), mittels UAV-Photogrammetrie oder doch klassisch tachymetrisch – darüber wird seit einigen Jahren diskutiert, besonders, wenn als Ergebnis ein 3D-Modell des Messobjektes gefordert wird. Da für die Erfassung von Gebäudefassaden und für Gebäudeinnenaufnahmen inzwischen eine Reihe von Ergebnissen vorliegt, soll im Folgenden ein Technologievergleich an einem großen, teils langgestreckten Bauwerk vorgenommen werden, wo alle untersuchten Aufnahmetechnologien gewissen Restriktionen unterliegen. Als Untersuchungsobjekt wurde dafür der Kreisel der Bobbahn Altenberg gewählt. Diese Wintersportanlage, deren offizielle Bezeichnung „DKB Eiskanal Altenberg“ lautet, befindet sich im sächsischen Osterzgebirge, ca. 30 km südlich von Dresden und nahe der tschechischen Grenze. Diese Kunsteisbahn für den Bob-, Skeleton- und Rennrodelnsport wurde 1986 fertiggestellt und war in der Vergangenheit mehrfach Austragungsort von Welttitelkämpfen in den oben genannten Disziplinen. Die Bahn (Abb. 1) mit einer

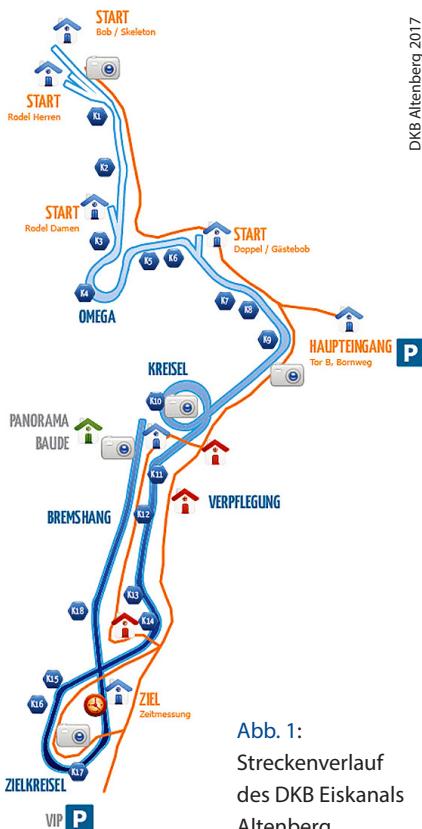


Abb. 1:
Streckenverlauf
des DKB Eiskanals
Altenberg

Gesamtlänge von 1.413 m hat seit 2007 insgesamt 18 Kurven (DKB Altenberg 2017) – davon einen Kreisel: die 320°-Kurve 10 (K10 in Abb. 1), das Objekt nachfolgender Untersuchungen. Dieses doch eher komplizierte Untersuchungsobjekt befindet sich auf einer Fläche von 50 m × 50 m und besitzt eine Breite von ca. 3 m (Abb. 2). Die besondere Herausforderung bilden die starken Krümmungen des Baukörpers in mehreren Achsen sowie nicht unerhebliche Abschattungen, die an alle Aufnahmeverfahren höhere Ansprüche stellen.



Abb. 2: Kreisel (Kurve 10) des DKB Eiskanals Altenberg

Im Rahmen von zwei Bachelorarbeiten und einer vorherigen Projektarbeit wurde der Kreisel des DKB Eiskanals mit drei unterschiedlichen Messtechnologien aufgenommen, um daraus eine 3D-Modellierung des Untersuchungsobjektes vorzunehmen. Ziel der Arbeiten war es, die einzelnen Technologien zur Datenerfassung mit anschließender einfacher 3D-Modellierung hinsichtlich Vollständigkeit, Genauigkeit und Effektivität miteinander zu vergleichen. Außerdem wurden aus der jeweiligen Punktwolke des Messobjektes Horizontal- und Vertikalschnitte von vorgegebenen Bereichen des Kreisels erstellt. Zum Einsatz kamen dabei die Methoden der Photogrammetrie unter Einsatz von RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) und terrestrischen Messbildern, die Elektronische Tachymetrie sowie das Terrestrische Laserscanning (TLS). Des Weiteren sollte nur in Vermessungsbüros häufig im Einsatz befindliche kommerzielle Standardsoftware zur 3D-Modellierung verwendet werden.

2 Schaffung der Messungsgrundlagen

Als Grundlage für alle drei Aufnahmeverfahren wurde ein 3D-Netz mit einer Ausdehnung von $180\text{ m} \times 80\text{ m}$, bestehend aus elf Festpunkten neu vermarkt, bestimmt und ausgeglichen. Die Festpunkte wurden dabei um das Messgebiet angelegt und im inneren Bereich des Kreisels verdichtet. Es wurde auf gute Sicht untereinander geachtet. Die Netzmessung erfolgte als kombiniertes Richtungs- und Streckennetz mit einem Tachymeter Leica Viva TS 15. Zur Kontrolle und Verbesserung der Höhengenauigkeit des Netzes wurden alle Netzpunkte zusätzlich mit einem Digitalnivellier Leica DNA03 nivelliert.

Die Netzauswertung erfolgte als lokales 3D-Netz mit der Ausgleichungssoftware Java Graticule 3D (JAG3D) als freies Netz mit zwei Datumspunkten (Lösler 2015). Die erreichte Netzgenauigkeit aus der Ausgleichung betrug für die Koordinaten aller Netzpunkte weniger als 1 mm.

Des Weiteren wurden für die Planung der Befliegung Fotos vom Messungsgebiet erstellt, die zur Flugplanung genutzt werden sollten. Im Zuge dieser Vorbereitungen erfolgte außerdem die Einholung einer Fluggenehmigung für das RPAS vom Eigentümer des DKB Eiskanals.

3 Datenerfassung mit photogrammetrischen Verfahren sowie Modellierung mittels digitaler Bildverarbeitung und CAD-Software

Um das geplante dreidimensionale Modell später in ein übergeordnetes Koordinatensystem übertragen zu können, wurden vor Beginn der Messungen 24 Schachbrettmarken auf DIN A3- bzw. DIN A4-Plastik- oder Papiertafeln als Passpunkte im Messgebiet ausgelegt und deren Koordinaten tachymetrisch bestimmt. Dabei wurden je zehn Passpunkte innerhalb und außerhalb des Kreisels verteilt. Weitere vier Passmarken wurden in der Kehlung der Bahn für die Aufnahme der nach oben abgeschatteten Teile der Bobbahn für Bilderfassung mittels terrestrischer Photogrammetrie angebracht. Aus der Ausgleichung dieser Marken als angeschlossenes 3D-Netz ergab sich eine vernachlässigbar geringe Verschlechterung der Genauigkeit der Passpunktkoordinaten gegenüber dem Festpunktnetz.

3.1 Datenerfassung mittels Aerophotogrammetrie

Die Aufnahme des Kreisels des DKB Eiskanals Altenberg erfolgte zuerst mittels Aerophotogrammetrie mit dem Remotely Piloted Aircraft System. Dazu stand als Ausrüstung mit dem MikroKopter MK ARF Okto XL 4s12 der Firma

HiSystems GmbH ein preiswerter Octocopter (Anschaffungspreis 8.000 Euro) zur Verfügung (Abb. 3) (HiSystems GmbH 2016).

Die Steuerung des Octocopters erfolgte mit dem Pultsender Graupner MC-32 HoTT, der um einen Videosender mit 25 mW Leistung, einen 7"-Monitor und einen Range Extender erweitert wurde (Graupner/SJ GmbH 2014). Die Aufnahme erfolgte am 27. Juli 2016 in drei Messzyklen zu je 15 Minuten und in einer



Abb. 3:
Mikrokopter
MK ARF Okto
XL 4s12 der
HiSystems GmbH

Flughöhe von ca. 40 m bei guten Messungsbedingungen. Mit den streifenweisen Überfliegungen des Kreisels wurden insgesamt 245 Bilder im ersten und dritten Bildflug sowie ein Video im MTS-Format beim zweiten Bildflug aufgenommen. Eine Besonderheit bei den RPAS-Aufnahmen bestand darin, dass aufgrund dichter Bewaldung links und rechts des Eiskanals keine Bildflugplanung möglich war, sondern alle Flüge manuell gesteuert werden mussten.

Da aufgrund der Abdeckungen von Teilen des Eiskanals keine vollständige photogrammetrische Aufnahme mit dem Octocopter möglich war, wurden die Kehlung sowie große Teile der gekrümmten Innenbande und der Außenwand ergänzend mit der Spiegelreflexkamera Canon EOS 5D Mark III terrestrisch erfasst. Um eine ausreichende Überlappung der Bilder zu erhalten, wurden insgesamt 630 Fotos terrestrisch zusätzlich aufgenommen.

3.2 Auswertung der photogrammetrischen Daten und Modellierung des Kreisels

Die Auswertung der photogrammetrischen Aufnahmen des Kreisels des DKB Eiskanals Altenberg erfolgte mit der Auswerteprogrammen *Agisoft Photoscan Professional*, Version 1.2.6, *AutoCAD 2016* und *ReCap 2016* von Autodesk, Version 20.1.49.0 sowie den AutoCAD Plug-Ins *PointSense Pro* und *PointSense Plant* von FARO. Dabei wurde technologisch wie folgt vorgegangen:

- Transformation der UAV-Aufnahmen in TIF-Dateien unter Verwendung der Software Capture One von Phase One,
- Einlesen aller terrestrischen und Bildflugaufnahmen in Agisoft Photoscan Professional, Verknüpfung und Referenzierung der Aufnahmen und Erzeugen einer verbesserten einheitlichen dichten Punktwolke für das Aufnahmeobjekt,
- Export der dichten Punktwolke im Format E57,
- Einlesen der Punktwolke in AutoCAD 2016 mithilfe des Programmes Autodesk ReCap,
- Ausarbeitung des kolorierten 3D-Modells des Kreisels mit AutoCAD 2016 sowie den AutoCAD Plug-Ins PointSense Pro und PointSense Plant,
- Semiautomatische Schnittgenerierung der geforderten Horizontal- und Vertikalschnitte aus dem 3D-Modell in AutoCAD 2016,
- Visualisierung und Export des 3D-Modells.

Insgesamt lief die Modellierung des Kreisels ([Abb. 4](#)) nach obiger Technologie recht gut, obgleich die Verwendung von AutoCAD zur 3D-Modellierung aus photogrammetrischen Daten keine optimale Lösung war. Dadurch entstanden einige kleinere Probleme im Modellierungsprozess, deren Behebung manuelle Nacharbeiten erforderte, was letztendlich die Effektivität etwas minderte. Weitere Details werden nachfolgend im Rahmen des Modellvergleichs diskutiert.



Abb. 4: 3D-Modell des Kreisels der Bobbahn Altenberg aus photogrammetrischen Daten

4 Datenerfassung mittels Terrestrischem Laserscanning und Modellierung mittels TLS-Auswertesoftware und CAD-Software

4.1 Datenerfassung mittels TLS

Nahezu zur gleichen Zeit wie die photogrammetrische Aufnahme erfolgte die Datenerfassung des Kreisels des DKB Eiskanals Altenberg mittels Terrestrischem Laserscanning. Dazu wurde der hochschuleigene Laserscanner Focus^{3D} S120 der Firma FARO Technologies Inc. eingesetzt, dessen optimale Reichweite bei 0,6 m bis 120 m liegt und damit für das Messungsobjekt sehr gut geeignet war. Das gilt auch aufgrund seiner guten Handlichkeit und seiner hohen Messgeschwindigkeiten. Nachteilig war hingegen, dass mit diesem Scanner faktisch nur Panoramascans gemessen werden können.

Zur Verknüpfung und Referenzierung der einzelnen Scans wurden wie bei der photogrammetrischen Aufnahme Passpunkte innerhalb und außerhalb des Kreisels eingesetzt, deren Koordinaten zuvor in Bezug zum Festpunktfeld tachymetrisch bestimmt wurden. Zum Einsatz kamen sowohl Schachbrettmarken im Format A3 und A4 als auch FARO-Kugeln. Damit wurde gewährleistet, dass in jedem Scan mindestens vier Passpunkte zur Referenzierung in der Punktwolke enthalten waren.

Der Außenbereich des Kreisels wurde mit einer Auflösung von 3,1 mm (1/2) und vierfacher Qualität erfasst. Das bedeutete eine Punktrasterauflösung von 3,1 mm auf 10 m Entfernung sowie eine Vierfachmessung aller Punkte der Scanwolke, wobei sich die Mehrzahl der aufzunehmenden Objekte in einem Entfernungsbereich von weniger als 10 m befand. Um die Bobbahn im Innenbereich des Kreisels vollständig zu erfassen, waren mehr Scannerstandpunkte und kürzere Zielweiten erforderlich. Deshalb wurden in diesem Bereich die Scans nur mit dreifacher Qualität bei gleicher Auflösung ausgeführt, wodurch sich eine Zeitersparnis von ca. 15 Minuten pro Standpunkt ergab. Insgesamt erfolgte die Datenerfassung des Kreisels der DKB Eisbahn Altenberg mit insgesamt 41 Scans, die alle mit ausreichender Genauigkeit verarbeitet werden konnten.

4.2 Auswertung der TLS-Daten und Modellierung des Kreisels

Die Auswertung der Laserscandaten des Kreisels des DKB Eiskanals Altenberg erfolgte mit den Auswerteprogrammen *Faro Scene*, Version 1.2.6, von FARO, *ReCap 2016* und *AutoCAD 2016* von Autodesk (Version 20.1.49.0) sowie den AutoCAD Plug-Ins PointSense Pro und PointSense Plant von FARO. Dabei wurde folgende Auswertetechnologie angewandt:

- Datenimport sowie Vorauswertung in Faro Scene mit den Arbeitsschritten Einlesen der Scans, Referenzierung und Kolorierung, Filterung der Punkt- wolken und Verknüpfung der Scans,
- Datenexport im ReCap-Format in AutoCAD 2016, der so einfacher und vor allem schneller verlief als bei Nutzung des Austauschformates E57,
- Ausarbeitung des kolorierten 3D-Modells des Kreisels mit AutoCAD 2016 sowie den AutoCAD Plug-Ins PointSense Pro und PointSense Plant,
- Semiautomatische Schnittgenerierung der geforderten Horizontal- und Vertikalschnitte aus dem 3D-Modell in AutoCAD 2016,
- Visualisierung und Export des 3D-Modells.

Dabei erfolgten alle Verarbeitungen in Faro Scene halbautomatisch, da zur Referenzierung und Verknüpfung der Scans sowohl die Cloud-to-Cloud-Registrierung als auch Targets genutzt wurden, um das Modell im übergeordneten lokalen Festpunktkoordinatensystem zu erstellen. Die erreichten Standardabweichungen der Zielmarken-Spannungen und damit die Referenzierungs- genauigkeit aus allen 41 Scans betrug 9,2 mm.



Abb. 5: 3D-Modell des Kreisels der Bobbahn Altenberg aus Laserscandaten

Die Modellierung des 3D-Modells des Kreisels in AutoCAD aus den mittels TLS erstellten Punktwolken (Abb. 5) verlief insgesamt zufriedenstellend, zeigte aber auch die Grenzen von AutoCAD einschließlich der verwendeten Plug-Ins auf. Die Modellierung von unregelmäßig gekrümmten 3D-Flächen, aus denen die Bobbahn besteht, sowie von Volumenkörpern für die übrigen Elemente und Aufbauten gestaltete sich schwierig, da momentan keine gleichzeitige Modellierung beider Elementgruppen in AutoCAD realisierbar ist. Das führte in einzelnen Überschneidungsbereichen, beispielsweise bei der Modellierung der Stützen an der Unterseite der Bobbahn zu kleinen Ungenauigkeiten im Modell. Diese wurden hingenommen, da das Ziel des 3D-Modells ein vereinfachtes Modell war.

5 Datenerfassung mittels elektronischer Tachymetrie

Neben den Aufnahmen des Kreisels des DKB Eiskanals Altenberg mittels photogrammetrischer Datenerfassung sowie mittels Terrestrischem Laserscanning wurde das Messobjekt ein drittes Mal tachymetrisch faktisch zur gleichen Zeit aufgenommen. Diese Aufmessung erfolgte mit einem elektronischen Tachymeter Viva TS15 R400 der Firma Leica. Dazu wurden insgesamt drei Instrumentenstandpunkte im Kreisel sowie zwölf Standpunkte um den Kreisel mittels Freier Stationierung im Festpunktfeld bestimmt. Von diesen Standpunkten wurden alle wesentlichen Punkte, die zur Modellierung des Messobjektes in einem CAD-System unbedingt notwendig sind, polar mit Reflektor oder reflektorlos aufgemessen. Zusätzlich wurde vom Innenbereich des Kreisels ein Panoramabild mit dem Tachymeter aufgenommen. Damit erfolgte jedoch nur eine punktuelle Objekterfassung, woraus sich ein späterer höherer Modellierungsaufwand ergibt. Alle Messdaten wurden abschließend in die CAD-Software *AutoCAD 2016* von Autodesk vor Ort importiert und die eingelesenen Daten auf Vollständigkeit und grobe Fehler geprüft.

Die geplante weitere Bearbeitung der tachymetrisch erfassten Daten ist aufgrund von Problemen des Bearbeiters bislang noch nicht erfolgt, sodass für diese Technologie lediglich für die Datenerfassung wirtschaftliche Vergleichsdaten vorliegen, hingegen keine zum vollständigen Modellierungsaufwand und zur Qualität des Endproduktes.

6 Vergleich der erstellten 3D-Modelle sowie der unterschiedlichen Technologien

6.1 Bewertung der Modellgenauigkeiten

Zur Bewertung der Qualität der aus photogrammetrischen Aufnahmen bzw. aus TLS-Punktwolken erzeugten 3D-Modelle des DKB Eiskanals Altenberg wurden elf Kontrollmaße zwischen eindeutig identifizierbaren Teilen des Messobjektes in der Örtlichkeit mit einem Handlaserentfernungsmesser Disto von Leica bzw. einem Gliedermaßstab bestimmt. Diese Kontrollmaße wurden anschließend in beiden Modellen digital abgegriffen. Die Ergebnisse sind in [Tab. 1](#) dargestellt.

Vergleicht man die Ergebnisse, so wird deutlich, dass das aus Scandaten erstellte Modell wesentlich besser zur Realität passt, die Standardabweichung aus den Kontrollmaßen beträgt 1,3 cm. Das ist durch die hohe und weitgehend einheitliche Messgenauigkeit beim Laserscanning sowie die insgesamt hohe und faktisch homogene Punktdichte begründet. Das Modell aus photogrammetrischen Aufnahmen ist ungenauer, was die berechnete Standardabweichung aus

Tab. 1: Ergebnisse der Vergleichsmessungen in den 3D-Modellen sowie am Messobjekt

Objektteil	Realität in [m]	Photo- grammetrie in [m]	Laserscanning in [m]
Fundament an Treppe (Länge)	2,04	1,97	2,04
Fundament an Treppe (Breite)	0,31	0,29	0,31
Abstand Fundament – Unterkante			
Verkleidung	1,02	1,00	1,02
Verkleidung Stütze – Rückseite (Länge)	0,80	0,76	0,80
2. Verkleidung Kühlsystem (links)	0,61	nicht erfassbar	0,62
2. Verkleidung Kühlsystem (rechts)	0,67	0,67	nicht erfassbar
Breite Unterseite Bahn (Gerade)	2,07	2,05	2,09
Höhe Bande (Gerade)	0,85	0,80	0,84
Relative Höhe Bahn (Kreisel)	4,25	4,14	4,22
Breite Innenbande (Kreisel)	0,32	0,46	0,33
Höhe Innenbande (Kreisel)	0,86	0,86	0,86

den Kontrollmaßen von 6,5 cm belegt. Das ist auf die geringere Datenkonsistenz und die Streuungen in der Punktfolge, aber auch auf nicht optimale Parameterstellungen in der photogrammetrischen Prozessierung zurückzuführen. Als Beispiele dafür seien aufgeführt:

- fehlende Vorkalibrierung der RPAS-Kamera,
- Berechnung der Punktfolge in Qualitätsstufe „high“ statt „highest“,
- nur teilweise Nutzung der Filterfunktionen in der RPAS-Punktfolge.

Allerdings passen wesentliche Elemente des Modells wie Länge und Breite der Bahn im Kreisel auf <5 cm zur Realität, während einige Aufbauten etwas ungenauer modelliert sind. Gleiche Aussagen zur Genauigkeit können auch mittels der aus den Modellen abgeleiteten Längs- und Querschnitte getroffen werden, wobei die Schnitte aus dem TLS-Modell wiederum etwas besser zur Realität passen.

Nahezu identische Resultate können aus einem Vergleich der bearbeiteten Punktfolgen abgeleitet werden. Obgleich aus der Auswertung für beide Verfahren Registrierungsgenauigkeiten von 1 cm aus den Ausgleichungen angegeben werden, betragen die maximalen Standardabweichungen einer Markierung



Abb. 6:
3D-Modell des Kreisels
der Bobbahn Altenberg
aus Laserscandaten von
schräg oben betrachtet

bzw. Referenz bei der photogrammetrischen Auswertung 5 cm, beim Laserscanning hingegen nur 3 cm. Noch größer sind die Unterschiede in der Streuung der Punktwolke zugunsten des Laserscanning.

Hinsichtlich der Vollständigkeit der Modelle gibt es faktisch keine Unterschiede. Allerdings werden komplizierte Strukturen des Aufnahmeobjektes im Modell aus TLS-Daten etwas feingliedriger abgebildet, wie auch [Abb. 6](#) optisch veranschaulicht.

6.2 Bewertung der Modellerstellung hinsichtlich Zeitaufwand und Kosten

Bei Betrachtung des Zeit- und Kostenaufwandes zur Modellierung des Kreisels der Bobbahn Altenberg sind alle Arbeitsschritte von der koordinatenmäßigen Bestimmung der Passpunkte, der Registrierung bzw. Generierung der Punktwolke und die Modellierung mit einbezogen (siehe [Tab. 2](#)).

Die Abschreibung der verwendeten Messinstrumente und der Software wird mit einem Stundenpreis berechnet. Der Stundenpreis setzt sich aus dem Kaufpreis, der Abschreibungsdauer in Jahren und dem jährlichen Einsatz in Tagen zusammen, wobei von einer 40-Stunden-Woche ausgegangen, jeder Arbeitstag mit 8 Stunden veranschlagt und ein Geräteeinsatz von 50 % der Arbeitstage angesetzt wurde. In der Zeit- und Kostenerfassung nicht enthalten sind die Messung und Auswertung des Festpunktnetzes inklusive des Nivellements. Dies wird aufgrund der Notwendigkeit für die beiden Verfahren vernachlässigt. Ähnlich verhält sich dies bei den Anschaffungskosten für PCs. Die Hardware ist für beide Verfahren notwendig. Die Berechnungszeiten, die in den vorliegenden

Tab. 2: Gegenüberstellung von Erstellungszeiten und -kosten für beide Verfahren

Bereiche	Photogrammetrie		Laserscanning	
	Zeit [h]	Kosten [€]	Zeit [h]	Kosten [€]
Außendienst	6,5	451	20,4	1.552
Innendienst	71,5	4.507	77,0	4.788
Gesamt	78,0	4.958	97,4	6.340

Untersuchungen erfasst wurden, können bei anderen Hardwarevoraussetzungen jedoch variieren.

In der Gesamtzeiterfassung sind lediglich die Zeiten berücksichtigt worden, die für die erforderliche Anzahl an Arbeitskräften notwendig sind. Die Kostenberechnung beinhaltet zusätzlich die Berechnungszeiten der Software. Für die Rechnerkosten sind lediglich die Abschreibungskosten der Software berücksichtigt, da während reiner Berechnungszeiten kein Personaleinsatz erfolgt. Um eine Vergleichbarkeit zu erreichen und realistische durchschnittliche Personalkosten anzusetzen, wurden dafür Stundensätze aus der HOAI 2009 entnommen, obgleich diese Verordnung nicht mehr verbindlich ist. So wurde ein Personalkostensatz von 60 Euro pro Stunde als Ingenieurtätigkeit in den Berechnungen verwendet.

Die Generierung der Punktwolke mit Agisoft PhotoScan Professional beinhaltet Bearbeitungs- und Berechnungszeit. Die Berechnung unterteilt sich in das Ausrichten der Fotos, das Erzeugen der dichten Punktwolke und den Export der Punktwolke. Das Setzen der Markierungen beansprucht mit ca. 8 Stunden einen Großteil der Bearbeitungszeit. Die restliche Bearbeitungszeit teilt sich in Bereinigen der Punktwolken und den Import der Passpunkte. Die Kosten für die Agisoft PhotoScan Software sind für die Professional Version mit einem Preis von 3.130 Euro angenommen, obgleich für die meisten der im Projekt genutzten Softwarefunktionen bereits die mit 195 Euro Anschaffungskosten preiswertere Standardversion ausreicht.

Wie bei der photogrammetrischen Auswertesoftware sind Zeit und Kosten bei der Bearbeitung der Laserscandaten mit der Software Faro Scene ebenfalls in Bearbeitung und Berechnung unterteilt. Die Berechnungszeit bezieht sich auf das Anlegen der Datenbank beim Import, die Vorverarbeitung der Scans und den Export der Punktwolke in das Autodesk ReCap-Format. Für die Bearbeitungszeit wird die Registrierung der Daten angegeben. Dies beinhaltet das Markieren der Referenzen, das Anlegen der Korrespondenzen und die Ausführung der eigentlichen Registrierung. Der zusätzliche Einsatz des Plug-In PointSense Plant von FARO 3D Software GmbH, ehemals kubit Software GmbH, wurde genutzt, um u. a. Stahlkonstruktionen und Rohre automatisch zu generieren.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die genutzte Technologie und Ausrüstung der Photogrammetrie zur 3D-Modellierung des Kreisels des DKB Eiskanals Altenberg am effektivsten wie kostengünstigsten ist – ca. 20 % günstiger als die angewandte Laserscanning-Technologie.

Für die Modellierung des Kreisels unter Nutzung der klassischen Technologie der elektronischen Tachymetrie stehen nur Daten zur Effektivität des Außen- dienstes zur Verfügung, da die geplante Abschlussarbeit für diese Technologie bisher nicht realisiert werden konnte. Die tachymetrische Aufnahme des Mess- objektes einschließlich einer Datenkontrolle vor Ort dauerte ca. 16 Stunden und verursachten Kosten von 1.177 Euro, (d. h. die reine Außen- dienstzeit). Damit liegt diese Technologie im Außen- dienst sowohl zeit- wie kostenmäßig zwischen Photogrammetrie und Laserscanning. Allerdings erfordert die Modellierung aus den diskret erfassten Objektdaten erfahrungsgemäß einen höheren Aufwand im Innendienst und bringt oft Probleme hinsichtlich der Vollständigkeit und Detailtreue des Modelles mit sich.

7 Fazit und Ausblick

Ziel der Untersuchungen zur Erstellung eines 3D-Modells vom Kreisel des DKB Eiskanals in Altenberg war es, vergleichend mit unterschiedlichen Messtechnologien das Untersuchungsobjekt zu erfassen und zu modellieren sowie die Ergebnisse hinsichtlich Vollständigkeit, Genauigkeit und Effektivität miteinander zu vergleichen. Zum Einsatz kamen die Methoden der Photogrammetrie unter Einsatz von RPAS in Verbindung mit terrestrischer Photogrammetrie, die Elektronische Tachymetrie sowie das Terrestrische Laserscanning. Aus den beschriebenen Technologien und Modellierungsansätzen wird ersichtlich, dass jedes der untersuchten Verfahren für sich betrachtet Grenzen aufweist.

Die Aufnahme des Objektes stellte an alle Aufnahmetechnologien spezielle Anforderungen. Die gekrümmte Oberfläche im Außenbereich und die starke Abschattung der Bände im Innenbereich des Kreisels erschweren die konsistente Datenerfassung mittels Laserscanning. Diese Gegebenheiten ließen den Zeitaufwand und somit die Kosten steigen. Hier besitzt die Terrestrische Photogrammetrie wegen ihrer weitgehend uneingeschränkten Mobilität Vorteile. Die Registrierung der Messdaten und die anschließende Auswertung zeigten aber, dass die Daten aus dem Laserscanning als genauer und realitätsnaher anzusehen sind als die der Photogrammetrie. Auch die Modellierung verläuft bei der Auswertung der Punktwolke aus dem Laserscanning günstiger. Dem gegenüber stehen die notwendige Aufnahmezeit und die damit entstandenen Personalkosten für den Außen- dienst. Diese waren bei der Aufnahme mit TLS um das Dreifache höher als die bei der photogrammetrischen Aufnahme.

Die Genauigkeit des photogrammetrischen Modells war hingegen in Teilen der Bahn nicht von gleicher Qualität, sodass dieses Verfahren, allein angewandt für hohe Genauigkeitsanforderungen nichtvoll genügen würde. Eine Ausnahme bildet bei den Untersuchungen jedoch die Außenseite des Kreisels. Die für diesen Bereich entstandenen Punktwolkendaten aus den Aufnahmen mit der digitalen Spiegelreflexkamera waren hinreichend genau. Dieser Bereich des Aufnahmeobjektes war dagegen mit Laserscanning wegen der Abschattungen durch sich in der Nähe befindliche Bäume nur sehr schwer erfassbar.

Aus diesen Gründen kann aus den Untersuchungen als optimale Technologie ein Mix aus Terrestrischem Laserscanning und photogrammetrischer Aufnahme abgeleitet werden:

Die Außenseite des Kreisels der Bahn sollte mittels terrestrischer Photogrammetrie erfasst werden. Gleiches gilt teilweise auch für die Erfassung der Bahn im Innenbereich des Kreisels. Die Sohle der Bahn sollte mittels Terrestrischer Photogrammetrie aufgenommen werden, der übrige Teil mittels Laserscanning. Dies verringert die Standpunktanzahl und somit die Kosten im Außendienst. Für detaillierte Aufnahmen, zum Beispiel der Rohre, Stahlträger und Dachkonstruktionen, ist die Verwendung des Laserscanners unverzichtbar. Soll die Dachkonstruktion ebenfalls vollständig erfasst werden, so sollte dieser Bereich auch photogrammetrisch, jedoch unter Einsatz von RPAS aufgenommen werden.

Somit besteht die *optimale Datenerfassung* des Kreisels der Bobbahn Altenberg aus der *Kombination der untersuchten Technologien*. Diese Aussage ist jedoch nicht automatisch auf andere Objekte verallgemeinerbar, sondern stets entscheidend vom Messobjekt sowie von den Anforderungen des Auftraggebers an das 3D-Modell abhängig. Je genauer und detaillierter die Anforderungen sind (z. B. Erfassung als verformungsgerechtes 3D-Modell), umso stärker ist bei der Technologiebetrachtung TLS als vordergründiges Verfahren in Erwägung zu ziehen. Terrestrische Photogrammetrie einschließlich der Nutzung eines RPAS ist optimal bei langgestreckten Anlagen und gut sichtbaren Teilen eines Objektes einsetzbar und bei Genauigkeitsforderungen von wenigen Zentimetern aus Effektivitätsgründen unschlagbar.

Abschließend kann festgehalten werden, dass beide bis zum 3D-Modell untersuchte Aufnahmetechnologien für die Modellierung mithilfe von Punktwolken in AutoCAD 2016 geeignet sind, jedoch im Regelfall mit Einschränkungen. Deshalb sollte bei Modellierungen mit hoher Genauigkeit und Detailtreue besser auf spezielle Modellierungssoftware zurückgegriffen werden.

Literatur

DKB Altenberg (2017): Streckenübersicht DKB Eiskanal Altenberg. www.wia-altenberg.de/bobbahn-altenberg/bahninfo.php, letzter Zugriff 21.10.2017.

Graupner/SJ GmbH (2014): Pultsender einzeln mc-32 HoTT DE, 16 Kanal. www.graupner.de/Pultsender-einzeln-mc-32-HoTT-DE-16-Kanal/33032.77/, letzter Zugriff 22.11.2016.

HiSystems GmbH (2016): MikroKopter – Oktocopter XL. <http://wiki.mikrokopter.de/MK-OktoXL>, letzter Zugriff 21.10.2017.

Knötzsch, P. (2017): Vergleichende Untersuchungen zur Erfassung und 3D-Modellierung des Kreisels der Bobbahn Altenberg mit unterschiedlichen Aufnahmetechnologien. Technologie Photogrammetrie. Bachelorarbeit (unveröffentlicht), HTW Dresden, Fakultät Geoinformation.

Kühn, M. (2016): 3D-Scanner? Agisoft Photoscan! Vom schnellen Foto zum texturierten Mesh: Ein Erlebnisbericht vom Photoscanner. www.software3d.de/downloads/agisoft-photoscan-artikel.pdf, letzter Zugriff 21.10.2017.

Lösler, M. (2015): Java Graticule 3D (JAG3D), Tutorials. <http://wiki.derletztekick.com/tutorial>, letzter Zugriff 21.10.2017

Schramm, M. (2017): Vergleichende Untersuchungen zur Erfassung und 3D-Modellierung des Kreisels der Bobbahn Altenberg mit unterschiedlichen Aufnahmetechnologien. Technologie Terrestrisches Laserscanning. Bachelorarbeit (unveröffentlicht), HTW Dresden, Fakultät Geoinformation.

Kontakt

Wolffried Wehmann | Martin Oczipka | Philipp Knötzsch | Matthias Schramm
Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden
Fakultät Geoinformation
Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
wolffried.wehmann@htw-dresden.de

Fusion von TLS-Punktwolken mit Thermalbildern zur Inspektion von Bauwerken

Ludwig Hoegner | Uwe Stilla

1 Einleitung

Zur Inspektion von Bauwerken sind geometrische Eigenschaften und radiometrische Eigenschaften gleichermaßen wichtig. Während man mit TLS eine hochgenaue geometrische Abtastung der Oberfläche erreichen kann, wird für die Beurteilung von Oberflächendefekten wie Rissen oder Verfärbungen auf Kamerabilder zurückgegriffen. Im Gegensatz zu Bildern aus dem sichtbaren Spektrum ermöglichen Bilder aus dem thermischen Infrarot (TIR) indirekt einen Blick unter die Oberfläche. Aus Unterschieden in der Strahlungsintensität lassen sich Unterschiede im Material wie zum Beispiel Übergänge von Bauwerksteilen unter Putz sichtbar machen. Außerdem können Wärme- oder Kältequellen im Mauerwerk wie Heizungsleitungen oder Leckagen erkannt werden. Im Alltag werden solche Thermalbilder zumeist im Einzelbild manuell ausgewertet ohne einen 3D-Bezug herzustellen.

Die Fusion von 3D-Punktwolken eines Laserscanners und von Thermalbildern kombiniert die hochgenaue Geometrie des Laserscanners mit der radiometrischen Information von Thermalbildern. Hierbei werden die 3D-Punkte um einen zusätzlichen TIR-Kanal in ihrem Merkmalsvektor ergänzt. Möglich ist damit auch, mehrere Epochen zu kombinieren und zeitliche Verläufe auszuwerten. Dabei wird unterschieden, ob die Punktwolke und die Thermalbilder von einem gemeinsamen Träger mit bekannter relativer Orientierung des Scanners und der Kamera aufgenommen werden wie beim Aufbau der Firma Zoller+Fröhlich (Zoller+Fröhlich 2017), oder, ob beide Sensoren unabhängig voneinander aufnehmen. Dabei ist die unterschiedliche Abbildungsgeometrie für die Festlegung von Sichtbarkeiten und Verdeckungen zu berücksichtigen. Anwendungsgebiete für fusionierte Punktwolken mit zusätzlichen Thermaldaten sind die Überwachung von Bauwerken und Industrieanlagen, bei denen sowohl geometrische Abweichungen von Sollplänen oder Deformationen wichtig sind, als auch die Erfassung von Schäden wie Rissen und Leckagen.

Zwar lassen sich Verfahren zur Erzeugung photogrammetrischer Punktwolken auf Thermalbilder von terrestrischen (Hoegner und Stilla 2015) und

UAV- oder flugzeuggetragenen Kameras (Westfeld et al. 2015, Hoegner et al. 2016) übertragen, doch sind sowohl die Dichte als auch die Genauigkeit von TIR-Punktwolken für die meisten Anwendungen nicht ausreichend.

Daher wird die Auswertung von Thermalbildern meist gemeinsam mit einer anderen 3D-Datenquelle durchgeführt. Ein gegebenes Gebäudemodell (Hoegner et al. 2007, Iwaszczuk et al. 2012) erlaubt ein direktes Referenzieren der Thermalbilder auf ein 3D-Bauwerksmodell. Dadurch können aus den Thermalbildern 2D-Fassadentexturen erzeugt und ausgewertet werden. Die in den Thermaltexturen gefundenen Objekte werden dann im Koordinatensystem des Bauwerks diesem hinzugefügt. Meist sind diese Gebäudemodelle aus generalisierten Flächen zusammengesetzt. Feine geometrische Strukturen fehlen hier oder sind nur in Form einer Textur im Modell vorhanden. Neben einem Gebäudemodell kommt für die Registrierung auch eine bereits vorhandene 3D-Punktwolke in Frage. Diese kann entweder aus hochauflösten Bildern photogrammetrisch erstellt sein (Tuttas et al. 2015, Hoegner et al. 2016) oder von einem entfernungs-messenden Sensor wie einer Time-of-Flight-Kamera (Hoegner et al. 2014) oder einem Laserscanner stammen (Borrmann et al. 2013).

In diesem Beitrag werden verschiedene Varianten der Fusion von 3D-Punktwolken und Thermalbildern diskutiert. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Auswertung der jeweils erzielbaren Genauigkeiten in der geometrischen Abbildung.

2 Fusion von 3D-Punktwolken und Thermalbildern

Eine notwendige Voraussetzung für eine Fusion von 3D-Punktwolke und Thermalbildern ist die Bestimmung der Abbildungsgeometrie der Thermalkamera. Hierfür müssen die innere Orientierung aus Kamerakonstante und Bildhauptpunktage sowie Verzeichnungsparameter bestimmt werden ([Kap. 2.1](#)).

Anschließend können die verzeichnungsfreien Thermalbilder weiterverarbeitet werden. Im Folgenden werden drei Varianten für die Koregistrierung von 3D-Punktwolken und Thermalbildern vorgestellt:

1. Koregistrierung des Tiefenbildes der 3D-Punktwolke und des Thermalbildes ([Kap. 2.2.1](#)).
2. Erzeugung einer 3D-Punktwolke aus den Thermalbildern, Projektion beider Punktwolken in eine gemeinsame Bildebene und Koregistrierung beider Bilder ([Kap. 2.2.2](#))
3. Koregistrierung auf Basis der 3D-Punktwolken.

Während die ersten beiden Verfahren annehmen, dass markante Strukturen in der aufgenommenen Umgebung sowohl in der 3D-Punktwolke als auch in den

Thermalbildern ausreichend vorkommen und ähnlich detektierbar sind und in der Koregistrierung daraus zunächst eine 2D-Bildtransformation bestimmen, geht die dritte Variante davon aus, dass die Thermalbilder eine ausreichend vollständige und genaue Punktwolke ergeben, um daraus direkt eine 3D-Transformation zwischen 3D-Punktwolke und Thermalbildern zu bestimmen. Liegt eine stabile relative Orientierung, zum Beispiel über die Montage auf einem gemeinsamen Träger vor, so kann die Orientierung der Thermalbilder relativ zur 3D-Punktwolke erfolgen. In diesen Fällen kann die Punktwolke direkt in die einzelnen Thermalbilder projiziert werden.

2.1 Geometrische Kalibrierung von Thermalkameras

Die geometrische Kalibrierung von thermischen Infrarotkameras ist ein erster wesentlicher Schritt. Hier hat sich gezeigt, dass die bekannten Verfahren auf Infrarotkameras übertragbar sind, dass jedoch auf Grund der deutlich geringeren Pixelzahl und geringerer Details neben den Parametern der inneren Orientierung zumeist nur ein bis zwei Parameter der radialsymmetrischen Verzeichnung und maximal ein Parameter der tangentialen Verzeichnung signifikant bestimmbar sind (Laguela et al. 2011, Luhmann et al. 2010, Simmler 2009). Als Kalibrierfeld eignen sich sowohl aktive, punktförmige Strahler als auch reflektierende Marken. Als aktive Strahler kommen Lampen oder aufgeheizte Metallschrauben zum Einsatz. Reflektormarken müssen entweder für thermisches Infrarot geeignet sein, um die Wärmestrahlung z. B. einer Lampe zu reflektieren, oder sie werden wie beispielsweise CD-Scheiben zur Reflexion des kalten Himmels eingesetzt (Simmler 2009).

2.2 Koregistrierung von 3D-Punktwolken und Thermalbildern

2.2.1 Koregistrierung von Tiefenbild und Thermalbild

Bei diesem Verfahren wird die 3D-Punktwolke als Tiefenbild in die Bildebene der Thermalbilder projiziert und die Intensitätswerte der Pixel aus den Tiefenwerten bestimmt. Da die Intensitätswerte der Punktwolke und der Thermalbilder nicht korrelieren, ist eine Koregistrierung auf Basis von radiometrischen Ähnlichkeiten auf den Bildern nicht möglich. Gleiches gilt auch zwischen dem Tiefenbild und dem Thermalbild. Auf Basis von geometrischen Features wie 2D-Liniensegmenten wird eine Koregistrierung im 2D-Bildraum durchgeführt. Für dieses Verfahren wird angenommen, dass es kaum Sichtbarkeitsunterschiede zwischen den Sensoren gibt, die äußeren Orientierungen zum Aufnahmezeitpunkt bekannt sind und dass ausreichend markante Kanten sowohl im Tiefenbild der 3D-Punktwolke als auch im Thermalbild auftreten und Tiefensprünge

zugleich Material- oder Objektwechsel kennzeichnen, bei denen sich die gemessene Strahlung im thermischen Infrarot ändert. In diesem Verfahren werden die Thermalbilder einzeln mit der 3D-Punktwolke koregistriert.

Als Vorverarbeitungsschritt wird zunächst ein ungefährer Skalierungsfaktor zwischen dem Tiefenbild und der Thermalkamera bestimmt. Dieser wird vorab aus den Parametern der Thermalkamera geschätzt. Dabei wird für die geometrische Auflösung der projizierten Punktwolke ein Vielfaches der geometrischen Auflösung der Thermalkamera verwendet. Der Grund hierfür ist, dass im zweiten Schritt in dieser Abbildung nach Kanten gesucht wird. Bei einer Projektion der Punktwolke auf eine Abbildung derselben niedrigen geometrischen Auflösung wie sie die Thermalbilder haben, würden etliche Kanten verschwinden, die im Thermal angedeutet noch sichtbar sind.

Es werden nun sowohl im Tiefenbild als auch im Thermalbild mittels Sobel-Operator Kanten detektiert und anschließend über eine Non-Maximum-Suppression ausgedünnt. Betrachtet man die beiden Kantenbilder des Tiefenbildes und des Thermalbildes, so zeigen sie jetzt ein ähnliches radiometrisches Verhalten – helle Werte an Kanten und dunkle in homogenen Bereichen. Beide Kantenbilder werden koregistriert. Hierfür werden in einer Ähnlichkeitsmetrik (similarity metric) (Styner et al. 2000) die Parameter einer Affintransformation bestimmt. Mittels dieser Parameter lässt sich für jeden Pixel des Tiefenbildes ein Intensitätswert aus dem Thermalbild interpolieren. Da für das Tiefenbild die Transformationsparameter aus der 3D-Punktwolke vorliegen, werden diese Intensitätswerte auf die 3D-Punkte der Punktwolke übertragen. Hierfür werden die 3D-Punkte in das Tiefenbild projiziert und dort die Infrarotintensitäten interpoliert. Bei dieser Projektion werden alle 3D-Punkte im Sichtfeld des Thermalbildes eingefärbt werden, unabhängig davon, ob sie aus der Perspektive des Thermalbilds sichtbar sind oder nicht. Als Lösung dient das bereits vorhandene Tiefenbild. Wird ein 3D-Punkt in das Tiefenbild projiziert, wird der Abstand des Punktes von der Bildebene mit dem Tiefenwert der Pixel verglichen, aus denen der Intensitätswert interpoliert werden soll. Ist der Abstand größer als alle vier Tiefenwerte, so wird das Pixel als verdeckt eingestuft und nicht mit einem Infrarotwert belegt. Ist ein 3D-Punkt in mehreren Infrarotbildern sichtbar, so wird aus den ermittelten Intensitäten der Mittelwert gebildet.

2.2.2 Koregistrierung von TLS- und TIR-Punktwolke im 2D-Bildraum

Im Unterschied zur vorhergehenden Methode wird hier zunächst aus den Thermalbildern eine photogrammetrische 3D-Punktwolke erzeugt. Die Erzeugung photogrammetrischer 3D-Punktwolken lässt sich in zwei Hauptschritte unterteilen. Im ersten Schritt werden über homologe Punkte wie beispielsweise SIFT-Features (Lowe 2004) die relativen Orientierungen der Bilder zueinander

bestimmt (Hartley und Zisserman 2004, Mayer et al. 2012, Nister 2004, Pollefey et al. 2002). Im zweiten Schritt werden auf Basis der bekannten Orientierungen die Bilder zunächst auf eine gemeinsame Abbildungsebene rektifiziert und anschließend eine dichte 3D-Punktwolke aus den Disparitäten der korrespondierenden Pixel zweier Bilder geschätzt (Hirschmüller 2008).

Nun wird sowohl für die 3D-Punktwolke aus den Thermalbildern als auch für die Punktwolke aus dem Laserscanning ein Tiefenbild mit denselben Orientierungsparametern erstellt. Diese Tiefenbilder werden anschließend wie in Verfahren 1 über eine Ähnlichkeitsmetrik (Styner et al. 2000) koregistriert und die Parameter der nötigen Affintransformation bestimmt. Hieraus wird die korrigierte Abbildung der TIR-Punktwolke in die gemeinsame Bildebene korrigiert. Über die bekannte Abbildungsgeometrie von 3D-Punktwolken in 2D-Bildebene kann nun für die 3D-Punkte der Laserpunktwolke ein Infrarotwert im künstlich erzeugten Infrarotbild interpoliert werden.

Der Vorgang der Erzeugung von Bildern aus beiden Punktwolken wird mehrfach wiederholt, um die verschiedenen Sichtbarkeiten der künstlich erzeugten Bilder für eine möglichst komplett Übertragung der Thermaldata auf die Laserpunktwolke zu verwenden. Die Auswahl der künstlichen Kamerapositionen orientiert sich dabei an den aus der Bündelblockausgleichung geschätzten Kamerasstandorten der Thermalkamera, da es keinen Sinn macht, eine Orientierung zu wählen, die außerdem des Sichtbereichs aller Bilder der Thermalkamera liegt. Dieses Verfahren bietet gegenüber Verfahren 1 den Vorteil, dass hier die unterschiedlichen Abbildungsgeometrien und Sichtbarkeiten von Laserscanner und Thermalkamera durch den Übergang in 3D und dann zurück in 2D keinen Einfluss mehr auf die projizierten Bilder haben. Der Nachteil ist die notwendige Erstellung der 3D-Punktwolke aus den Thermalbildern mit deutlich geringerer Genauigkeit und Punktdichte als der Punktwolke des Laserscanners. Die Sichtbarkeitsanalyse für die Laserpunktwolke folgt analog dem Vorgehen in Methode 1 mit dem Abgleich, ob der Abstand des projizierten Punktes größer ist als alle vier Tiefenwerte der Bildpunkte, zwischen denen der Intensitätswert interpoliert wird.

2.2.3 Koregistrierung von TLS- und TIR-Punktwolke im 3D-Objektraum

Hat man bereits über homologe Punkte einen Bündelblock der Thermalbilder bestimmt und eine dichte Punktwolke geschätzt, so kann man im Gegensatz zur Koregistrierung der Punktwolken über Abbildungen im 2D-Raum auch im 3D-Raum die beiden Punktwolken koregistrieren. Geht man davon aus, dass die Orientierungsparameter der Thermalbilder ansatzweise bekannt sind oder Passpunkte vorliegen, so können beide Punktwolken in einem gemeinsamen Koordinatensystem betrachtet werden. Liegen zwischen den Punktwolken noch

größere Differenzen in den Koordinaten, so kann eine erste Koregistrierung über ein Flächenmatching erfolgen (Hebel und Stilla 2009). Hierfür werden in den beiden Punktwolken Ebenen geschätzt und korrespondierende Ebenen in beiden Punktwolken gesucht. Dabei werden sowohl Größe, als auch Normalenrichtung und Abstand der Ebenen berücksichtigt. Aus der Zuordnung ergeben sich Transformationsparameter, die auf die TIR-Punktwolke angewandt werden. Anschließend findet eine zweite, feinere Koregistrierung auf Basis des Iterative-Closest-Point-Verfahrens (ICP) statt (Rusinkiewicz und Levoy 2001). Die daraus insgesamt abgeleiteten Transformationsparameter werden nun verwendet, um die Orientierungsparameter der Thermalbilder zu korrigieren und die Laserpunktfolke in die Bildebene der Thermalbilder zu projizieren, um dort die Intensitätswerte zu interpolieren und auf die Laserpunktfolke zu übertragen. Die Sichtbarkeit des 3D-Punktes im Thermalbild wird nun wieder analog zu den beiden ersten Verfahren durch Erstellung eines Tiefenbildes festgelegt.

3 Evaluierung der verschiedenen Verfahren

Für die Evaluierung der Qualität der Koregistrierung werden zum einen die verbliebenen Restabstände zwischen korrespondierenden 2D-Features in der Abbildung der 3D-Punktwolke und den Thermalbildern betrachtet. Zum anderen werden die Restabstände benachbarter 3D-Punkten zwischen der Laserpunktfolke und der TIR-Punktwolke verglichen. Darüber hinaus werden für Passpunkte die Abweichungen der zwischen den gemessenen Koordinaten und den geschätzten Koordinaten aus der Koregistrierung verglichen.

3.1 Kalibrierung der Thermalkameras

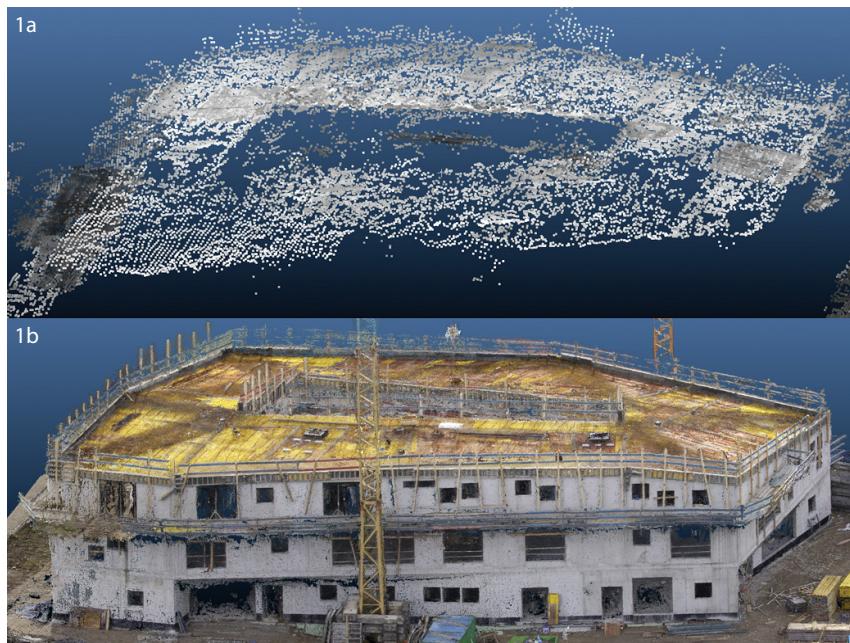
Für die unten diskutierten Beispiele wurden zwei verschiedene Thermalkameras verwendet, eine FLIR Tau640 und eine Infratec VarioCAM hr 384. [Tab. 1](#) zeigt die Ergebnisse der geometrischen Kalibrierung beider Kameras. Da nur ein Parameter der radialsymmetrischen Verzeichnung signifikant bestimmt wurde und der zweite Parameter der radialsymmetrischen sowie ein Parameter der tangentialen Verzeichnung nur als Näherungswerte für die Ausgleichung dienen, werden diese beiden Parameter hier nicht aufgeführt.

3.2 Verwendete Datensätze

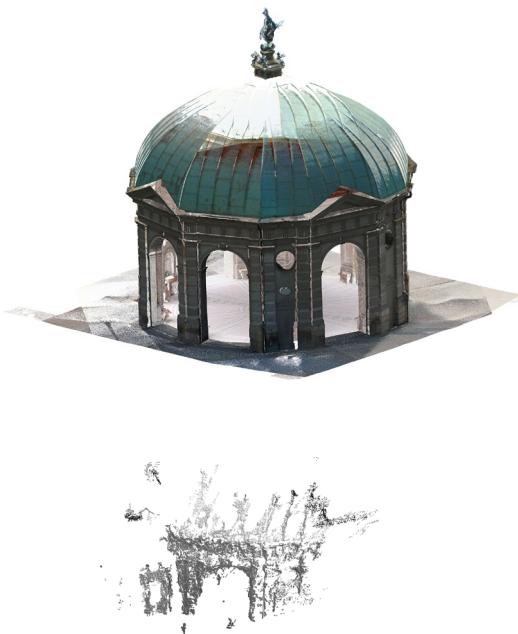
Als Testdatensätze werden hier zwei verschiedene Objekte verwendet. Zum einen liegt eine 3D-Punktwolke einer Baustelle vor, bei der zusätzlich Thermalbilder aufgenommen worden sind ([Abb. 1](#)).

Tab. 1: Ergebnisse der geometrischen Kalibrierung der Thermalkameras

		Tau640	VarioCam 384
Standardabweichung [μm]	σ_0	14,4	10,5
Kammerkonstante [mm]	c	19,2	12,4
	σ_c	0,011	0,035
Bildhauptpunkt Korrektur [μm]	x_0	0,2	1,2
	y_0	4,8	2,4
	σ_x	0,94	0,23
	σ_y	1,3	1,8
Radialsymmetrische Verzeichnung	A_1	$-5,6166 \cdot 10^{-6}$	$-2,0259 \cdot 10^{-3}$
	σ_{A1}	$1,6452 \cdot 10^{-6}$	$7,7746 \cdot 10^{-5}$

**Abb. 1:** Szene Baustelle. 1a) oben: Punktwolke aus den Thermalbildern und 1b) unten: deutlich dichtere Punktwolke mit in RGB-eingefärbten Punkten

Die TIR-Punktwolke (Abb. 1a) zeigt deutlich weniger Punkte (ca. 100 Punkte/ m^2) als die dichte Punktwolke (ca. 1.000 Punkte/ m^2) (Abb. 1b), bei der die Punkte entsprechend aufgenommenen RGB-Werten eingefärbt sind.



← **Abb. 2:**

Tempel-Szene: 3D-Laserpunktewolke eingefärbt mit RGB-Werten von gleichzeitig erstellten Bildern

↗ **Abb. 3:**

Tempel-Szene: 3D-Punktwolke erstellt aus den Thermalbildern mit gleichem Blickwinkel wie Abb. 2. Das Objekt am linken Rand ist eine Holzverkleidung, die beim Laserscan noch nicht aufgestellt war.

Zum anderen liegt eine 3D-Punktwolke eines Tempels vor, bei dem die Thermalbilder zu einem späteren Zeitpunkt getrennt aufgenommen worden sind (Abb. 2). Die TIR-Punktwolke zeigt hier lediglich einen der acht Bögen des Objekts (Abb. 3). Man sieht deutlich die unterschiedliche Punktdichte (Laserscan ca. 3.000 Punkte/m², TIR-Punktwolke ca. 650 Punkte/m²). In der TIR-Punktwolke ist am linken Rand ein rechteckiges Objekt zu sehen. Dabei handelt es sich um eine Holzverkleidung, die erst nach der Erstellung des Laserscans aufgestellt wurde.

3.3 Erstellung der 3D-Punktwolke aus Thermalbildern

Für die beiden TIR-Punktwolken (Abb. 1a und Abb. 3) sind die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung in Tab. 2 aufgeführt. Es ist zu sehen, dass die innere Orientierung der Kamera aus der geometrischen Kalibrierung nur kleine Verbesserungen aufweist. Während in der ersten Szene hauptsächlich die äußere Orientierung verbessert wird und die Passpunkte fast fehlerfrei sind, ist es bei Szene 2 genau umgekehrt. Das liegt an der unterschiedlichen Aufnahmekonfiguration. Szene 1 wurde von einem UAV aus aufgezeichnet. Die initialen äußeren Orientierungen sind im Verhältnis zu den eingemessenen Standorten der Szene 2 ungenau. Umgekehrt hat die Aufnahme vom UAV aus nur 7 Passpunkte, die

Tab. 2: Ergebnisse Bündelausgleichung zu Erstellung der TIR-Punktwolken

	Abb. 1a	Abb. 3
Abweichung initiale innere Orientierung	1,97 %	1,95 %
Abweichung initiale äußere Orientierungen		
RMS X_0 , Y_0 , Z_0 [m]	0,61	0,03
RMS v_0 , f_0 , k_0 [grad]	7,54	3,83
Mittlerer Fehler Passpunkte [m]	0,09	0,126
Mittlere Anzahl homologer Punkte	1.608	412
Mittlere Rückprojektionsfehler [pixel]	0,21	0,35

um die Baustelle herum verteilt liegen. Szene 2 hingegen verfügt über 30 Passpunkte am Boden. Während die Passpunkte vom UAV aus praktisch senkrecht zu sehen sind, sind die Punkte in Szene 2 von der terrestrischen Kamera aus nur in einem flachen Winkel zu sehen und daher entsprechend ungenau.

3.4 Koregistrierung von 3D-Punktwolke und Thermalbildern

Für Szene 1 werden die Lösungsansätze 1 und 2 untersucht, also die Koregistrierung durch Projektion der 3D-Punktwolke in ein einzelnes Thermalbild (Ansatz 1, siehe [Kap. 2.2.1](#)) und die Koregistrierung der beiden Punktwolken durch Projektion in eine gemeinsame Bildebene (Ansatz 2, siehe [Kap. 2.2.2](#)). Bei Ansatz 1 verbleibt ein mittlerer Rückprojektionsfehler korrespondierender Punkte von 0,86 Pixeln (in der Szene 0,36 m), bei Ansatz 2 beträgt der mittlere Rückprojektionsfehler 0,53 Pixel (in der Szene 0,22 m). Es wird also eine leichte Verbesserung erreicht durch die Kombination der einzelnen Thermalbilder zu einem Bündelblock. [Abb. 4](#) zeigt die 3D-Punktwolke eingefärbt mit RGB-Werten, bei denen für die in einem Thermalbild sichtbaren Punkte der RGB-Wert durch den Thermalwert ersetzt wurde. Dieser ist für die bessere Erkennbarkeit ebenfalls farbig dargestellt.

Nun soll für beide Szene Lösungsansatz 2 (siehe [Kap. 2.2.3](#)) untersucht werden. Nach Anwendung des ICP ergibt sich dabei für Szene 1 ein mittlerer quadratischer Fehler Rückprojektionsfehler in den Passpunkten von 0,26 Pixeln (in der Szene 0,11 m). In Szene 2 ergibt sich ein mittlerer quadratischer Fehler in den Passpunkten von 0,42 Pixeln (in der Szene 0,15 m). Die Registrierung der beiden Punktwolken im 3D-Raum liefert also für Szene 1 bessere Ergebnisse als die Registrierung im 2D-Raum. Die Ergebnisse für Szene 2 liegen in der gleichen Größenordnung.

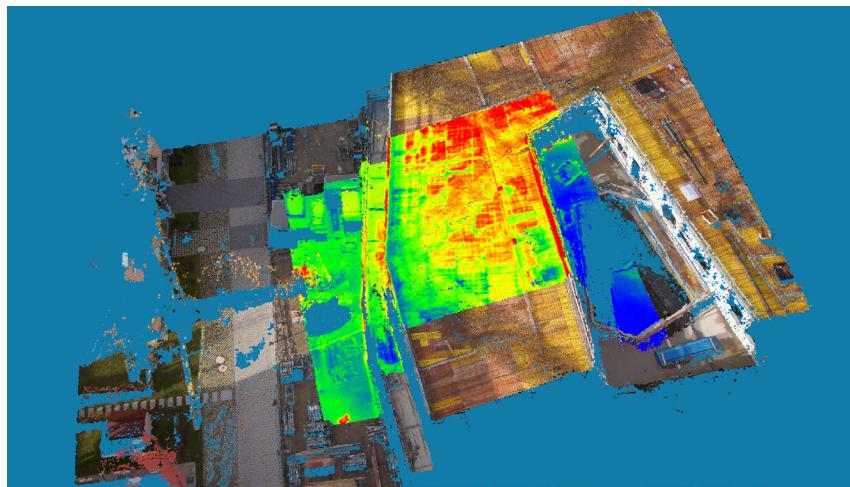


Abb. 4: Punktwolke von Szene 1, bei der die im Thermalbild sichtbaren Bereiche die ursprüngliche RGB-Intensität durch eine TIR-Intensität ersetzt wird. Die Thermalwerte sind zur besseren Sichtbarkeit ebenfalls farbcodiert.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Es zeigt sich, dass je nach Genauigkeitsanforderungen alle drei Verfahren tauglich für die Koregistrierung sind. Voraussetzung ist eine vorangestellte geometrische Kalibrierung. Die fusionierten Punktwolken können anschließend für die Extraktion von Objekten im thermischen Infrarot verwendet werden. So können beispielsweise Heizungsleitungen und Leckagen extrahiert werden (Abb. 5).

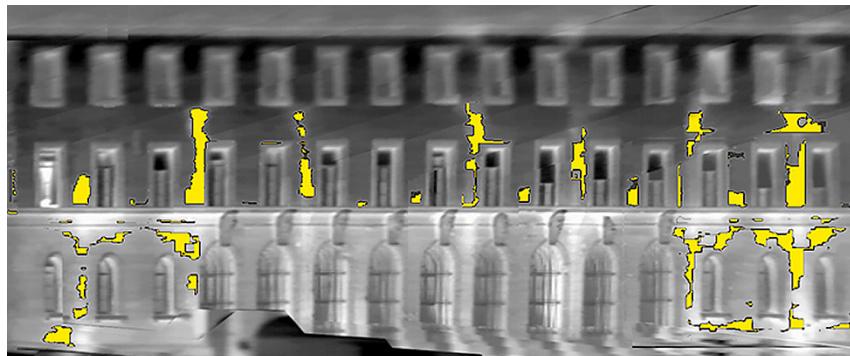


Abb. 5: Ansicht einer Fassade im thermischen Infrarot. Mögliche Leckagestellen sind gelb hervorgehoben.

Literatur

Borrmann, D.; Houshiar, H.; Elseberg, J.; Nüchter, A. (2013): Vom Kombinieren von 3D-Modellen mit Farb- und Temperaturinformationen. Photogrammetrie – Laser-scanning – Optische 3DMesstechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013, S. 246–253.

Hartley, R.; Zisserman, A. (2004): Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press. ISBN 0521540518.

Hebel, M.; Stilla, U. (2009): Automatische Koregistrierung von ALS-Daten aus mehreren Schrägansichten städtischer Quartiere. PFG Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation 2009(3), S. 161–175.

Hirschmüller, H. (2008): Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 30(2), S. 328–341.

Hoegner, L.; Kumke, H.; Meng, L.; Stilla, U. (2007): Automatic extraction of textures from infrared image sequences and database integration for 3d building models. PFG Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation 2007(6): S. 459–468.

Hoegner, L.; Stilla, U. (2015): Building facade object detection from terrestrial thermal infrared image sequences combining different views. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-3/W4, S. 55–62.

Hoegner, L.; Tuttas, S.; Xu, Y.; Eder, K.; Stilla, U. (2016): Evaluation of methods for co-registration and fusion of RPAS-based 3D point clouds and thermal infrared images. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B3, S. 725–732

Iwaszczuk, D.; Hoegner, L.; Schmitt, M.; Stilla, U. (2012): Line based matching of uncertain 3d building models with ir image sequences for precise texture extraction. PFG Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation 2012(5), S. 511–521.

Laguela, S.; Gonzalez-Jorge, H.; Armesto, J.; Arias, P. (2011): Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements. Infrared Physics & Technology 54, S. 92–99.

Lowe, D. (2004): Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision 60(2), S. 91–110.

Luhmann, T.; Ohm, J.; Piechel, J.; Roelfs, T. (2010): Geometric calibration of therographic cameras. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spacial Information Sciences 38(5), S. 411–416.

Mayer, H.; Bartelsen, J.; Hirschmüller, H.; Kuhn, A. (2012): Dense 3d reconstruction from wide baseline image sets. In: Dellaert, F.; Frahm, J.-M.; Pollefeys, M.; Leal-Taixe, L.; Rosenhahn, B. (eds), Outdoor and Large-Scale Real-World Scene Analysis. 15th International Workshop on Theoretical Foundations of Computer Vision, Dagstuhl Castle, Germany, June 26 – July 1, 2011, Vol. 7474, Springer, Berlin, S. 285–304.

Nister, D. (2004): An efficient solution to the five-point relative pose problem. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 26(6), S. 756–777.

Pollefeys, M.; Verbiest, F.; Gool, L. V. (2002): Surviving dominant planes in uncalibrated structure and motion recovery. In: Proceedings of the ECCV 2002. Part II, Vol. 2351, Springer, Heidelberg, S. 837–851.

Rusinkiewicz, S.; Levoy, M. (2001): Efficient variants of the icp algorithm. In: Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, S. 145–152.

Simmler, C. (2009): Entwicklung einer Messanordnung zur geometrischen Kalibrierung von Infrarot-Kameras. Bachelor's Thesis, Technische Universität München.

Styner, M.; Brechbuehler, C.; Székely, G.; Gerig, G. (2000): Parametric estimate of intensity inhomogeneities applied to mri. IEEE Transactions on Medical Imaging 19(3), S. 153–165.

Tuttas, S.; Braun, A.; Borrmann, A.; Stilla, U. (2015): Validation of bim components by photogrammetric point clouds for construction site monitoring. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-3/W4, S. 231–237.

Westfeld, P.; Mader, D.; Maas, H. (2015): Generation of tir-attributed 3d point clouds from uav-based thermal imagery. PFG Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation 2015(5), S. 381–394.

Zoller+Fröhlich (2017): www.zf-laser.com/Z-F-T-Cam.150.0.html, letzter Zugriff 25.10.2017.

Kontakt

Ludwig Hoegner
Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung
Technische Universität München
Arcisstraße 21, 80333 München
ludwig.hoegner@tum.de

Session 3: Laserscanning im interdisziplinären Umfeld

Erfahrungsbericht zur Mobilen Multi-Sensorik der Stadt Essen – Erfassung des Straßenraumes mittels Foto, Laserscanner und Georadar

Frank Knospe

1 Einleitung

Essen liegt im Zentrum des Ruhrgebiets, dem drittgrößte Ballungsraum Europas. In der Liste der bevölkerungsreichsten Großstädte in Deutschland nimmt Essen mit ca. 590.000 Einwohnern den neunten Rang ein und gehört zu den drei Städten in Deutschland mit dem stärksten wirtschaftlichen Wachstum.

Vor diesem Hintergrund startete der „Stadtentwicklungsprozess Essen – Perspektive 2015+“ (STEP) mit dem Ziel, mittelfristige Perspektiven für die Stadtentwicklung zu erarbeiten: Grundlage eines solches Prozesses ist die Erfassung und die kontinuierliche Fortführung von Infrastrukturen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind neben rein geoinformatorischen Prozessen, auch die Möglichkeiten einer vermessungstechnischen Datenerfassung und Informationsgewinnung im Fachbereich Geoinformation, Vermessung und Kataster betrachtet worden. Insbesondere sind die Themenbereiche verkehrs- und netzgebundene Infrastrukturen sowie der Gebäudebestand in den Fokus weiterer Überlegungen gerückt. Luft- und fahrzeuggestützte Messverfahren, die bislang noch keinen Einzug in die kommunale Vermessung gefunden hatten, wurden durch diverse Projekte (z.B. Solarkataster aus ALS, 2010 [vgl. Solar-energieanalyse der Stadtwerke Essen AG 2017]; Straßenschäden aus MLS, 2012; Wärmeausstrahlung mittels ATS, 2013 [vgl. Stadt Essen 2017]; Bodenbewegungskataster aus Satellitendaten, 2017) und Forschungsansätze (z.B. WeBest, 2013 bis 2016 [vgl. WeBest 2017]) untersucht. Aus einer strukturellen Untersuchung dieser Ergebnisse sind folgende Punkte für eine Zukunftsbetrachtung des Vermessungsdienstes (und der Geoinformation) der Stadt Essen als Ziele erkannt worden:

- Ergänzung der klassischen Vermessung durch Aufnahme von Massenpunkten,
- Einführung einer kinematisch gestützten (Multi-)Sensorik,
- Speicherung der Messergebnisse in einem Datenpool,

- Entwicklung geoinformatorischer Ansätze zur selektiven Filterung des Datenbestandes anhand von Fragestellungen,
- Weiterveredelung zu (handlungsorientierten) Produkten,
- Zentrale Visualisierung sowie Bereitstellung von Daten und Produkten in einer Geodateninfrastruktur,
- Entwicklung eines Geschäftsmodells zur Darstellung einer Kosteneffizienz von mobilen Erfassungssystemen in Planungsprozessen.

1.1 Vom MLS zur Mobile-Multi-Sensorik (MMS)

Das Ziel der Einführung einer kinematisch gestützten Sensorik zur Vermessung wurde zugunsten einer fahrzeuggestützten Lösung getroffen. Damit wurde die Erfassung von Objekten im Bereich des Straßenumfeldes festgeschrieben. Neben dem Einsatz von Lasersannern wurden auch weitere Sensoren mit in Überlegungen zu Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einbezogen: der Zeit- und Personalaufwand wird dadurch auf der Datenerfassungsseite optimiert. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Sensorik und deren Produkte alleine nicht punkten. Die Investition in Technologie und eine flächendeckende Vermessung sowie Abbildung des Straßennetzes sind eine kostenintensive Herausforderung. Dies gilt sowohl für eine Auftragsvergabe, als auch für den Betrieb eines eigenen Messfahrzeugs sowie der dazugehörigen Infrastruktur. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht stellt sich deshalb die Frage, wie kann dieses Investitionsvolumen einer Kosteneinsparung (-optimierung) gegenüber gestellt werden? Zudem ist zu bedenken, dass im Ergebnis der Messung letztlich nur Daten vorliegen, aus denen noch Informationen extrahiert werden müssen: Nutzer wollen für Ihre Aufgabenstellung vorkonfektionierte Endprodukte oder webgestützte Anwendungen, die entsprechende Funktionalitäten vorhalten. In der Regel sind Auswertungen, aufgrund der Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der kommunalen DV-Infrastruktur, auch heute noch dem Experten vorbehalten. Deshalb muss, neben der technisch-inhaltlichen Zukunftsbetrachtung, der Wissen- und Erfahrungsschatz der Mitarbeiter, insbesondere in der Startphase, mit in weitere Entwicklungsberichtigungen einbezogen werden.

Für das Geschäftsmodell sind demnach folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Bereits im Start-up muss eine Produktivität und Wirtschaftlichkeit gegeben sein, ohne dass potenzielle Mehrfachnutzungen oder Mehrwertabschöpfungen dazu beitragen.
- Das Geschäftsmodell muss skalierbar sein: von einem projektbezogenen Ansatz bis zur flächendeckenden Erfassung und Web-gestützten Darstellung in einem Informationssystem.
- Softwarelösungen müssen aus Daten Wissen generieren (Handlungen ermöglichen) und zur Kostenoptimierung beitragen.

In der Vermessungsbranche haben sich mobile Datenerfassungssysteme im Bereich von Verkehrswegen etabliert. Bestückt sind sie mit Laserscannern in Kombination mit kalibrierten Kameras. Charakteristisch ist das schnelle Messen im fließenden Stadtverkehr. Ein weiterer Wert der erzeugten 3D-Daten ist deren gewaltige Informationstiefe: Sie bildet die erfassten Objekte nicht nur in einer hohen Genauigkeit ab, sondern liefert systematisch Basisdaten von allen Gegenständen im gesamten Straßenraum – Laternen, Straßenschilder, Fahrbahnmarkierungen, Straßenbäume, Oberleitungen von Straßenbahnen und vieles mehr. Im Ergebnis liegen ganzheitlich Daten in Bildern und Messpunkten vor. Heutige Systeme können über 1 Million Messpunkte in der Sekunde produzieren: In Fahrzeughöhe erreicht man, auch bei Geschwindigkeiten von 50 km/h, schnell eine Punktdichte von mehr als 1.500 Punkten pro Quadratmeter. 2016 hat die Stadt Essen dies in Kooperation mit der Firma Trimble in zwei Pilotprojekten getestet (Ortsdurchfahrt Werden und Ausbau Frankenstraße). Jedoch wird mit einer solchen Technologie zur Vermessung von Straßen „nur“ ein Messverfahren durch ein anderes abgelöst. Auch wenn der Wert durch ein Mehr an Informationen eindeutig ist, fehlt aus betriebswirtschaftlicher Sicht ein finanzielles Einsparpotenzial. Im Einsatz von MLS ist dies deshalb durch zusätzliche Sensorik zu erwirtschaften. Ein ergänzend eingesetztes Georadarverfahren setzt genau an diesem Punkt an. Georadar ist ein mobiles, zerstörungsfreies Messverfahren und basiert auf Aussendung und Empfang elektromagnetischer Strahlen. Beim Befahren der Straßen wird der vorhandene Straßenaufbau unter Geländeoberkante gemessen. Dadurch wird der bislang fehlende Bestandteil für eine umfassende Datenbasis zum „Bauwerk Straße“ hinzugefügt: Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Straßenoberfläche und des Untergrundes lassen sich herstellen – Ursache und Wirkung können durch den Straßenbauexperten erkannt werden. Der Einsatzschwerpunkt in der Startphase des Multi-Sensorik Messfahrzeugs wird im Dreiklang „Umfassende Grundlagen des Straßenaufbaus für Ausschreibungsunterlagen“, „Abnahme von Baumaßnahmen“ und „Prüfen möglicher Gewährleistungsansprüche“ zu einer Kosteneffizienz und zur Minde rung von Nachträgen im Bereich der Straßenunterhaltung und -erneuerung führen.

1.2 Straßen in Essen

Die kommunale Straßeninfrastruktur ist Essens Lebensader. Der Straßenkörper ohne Infrastrukturen hat bereits einen Wert von 358 Millionen Euro und damit einen erheblichen Anteil am Anlagevermögen der Stadt! Neben 1.552 km Straßen, gilt es z. B. 49.000 Laternen, 60.000 Senkkästen und 62.000 Straßenbäume und mehr als 100.000 Straßenschilder zu betreuen.

Viele Straßen und Brücken sind sanierungsbedürftig. Vielfach ist das heutige Verkehrsaufkommen erheblich größer, als zum Zeitpunkt der Planung und Ausführung prognostiziert. Vor diesem Hintergrund stellte der Rat der Stadt Essen im Sommer 2016 Fragen an die Verwaltung (Stadt Essen 2016): Wie können die Grundlagen zur Planung von Sanierungs- und Neubaumaßnahmen verbessert und letztendlich Kosten optimiert oder gesenkt werden? Wie kann dies mit einem vertretbaren Aufwand und ohne kilometerlange Staus geschehen?

Die bautechnisch wirtschaftlichste Lösung für Sanierungs-, Erhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen beinhaltet im Allgemeinen eine gezielte Nutzung des vorhandenen Altbestandes (gebundene und ungebundene Schichten). Grundvoraussetzung ist jedoch eine möglichst genaue und lückenlose Kenntnis des „Bauwerks Straße“. Besonders im Untergrund kommunaler Straßen, d.h. bei lokal stark variierenden Straßenbauverhältnissen, der in den letzten hundert Jahren entstandenen Straßen, stößt man mit der bislang vorherrschenden, rein punktuellen Betrachtung durch Bohrkernentnahmen, schnell an die Grenzen einer gesicherten Aussage. Die daraus entstehenden Unsicherheiten führen häufig zu erheblichen Nachträgen und zeitlichen Verzögerungen der Baumaßnahmen.

1.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die in Betracht kommenden Komponenten der Mobilen Multi-Sensorik in Essen bestehen aus der Erfassung durch Kamerasyteme, Laserscanner und Georadar. Eine Marktanalyse im Jahr 2016 zeigt, dass derzeit die Anbieter Leica und Trimble derartige Systeme für bis zu 800.000 Euro im Portfolio haben.

Demgegenüber sind die Kosten vergleichbarer Vermessungsdienstleistungen zu stellen. Ausgehend von Vergaben einzelner Leistungen in den letzten Jahren lassen sich die Kosten zur Datenerfassung im Bereich Straßenplanung überschlägig herleiten:

- Erfassen von Panoramabildern 75 bis 100 Euro je km,
- Laserscanvermessung 4.000 bis 6.000 Euro je km,
- Georadar zur Erfassung des Untergrundes bis ca. 1 m unter Fahrbahnoberfläche 500 Euro je km (prüfen der Homogenität und des Volumens der Schichtung des Untergrundes bedürfen zwei bis drei Tracks je Richtungsfahrbahn); bei mehrspurigen Straßen/Konfliktbereichen im Untergrund ist von bis zu 2.000 Euro je km auszugehen.

Die Stadt Essen erneuerte im Durchschnitt der letzten fünf Jahre ca. 20 km Straßen per anno. Damit sind vergleichbare Leistungen im Bereich von Straßen mit je einer Richtungsfahrbahn, ohne Konfliktbereich im Untergrund, für ca. 6.000 Euro je km bzw. 120.000 Euro jährlich einzukaufen. Bei einem höheren

Anteil an mehrspurigen Straßen und/oder Konfliktbereichen im Untergrund lägen die Vergabekosten bei ca. 7.000 Euro je km bzw. 140.000 Euro jährlich. Aufgrund der Erfordernisse im Vergabeverfahren sind hierzu jeweils die Punkte der Marktanalyse, Ausschreibung und Vergabe zu tätigen. Der durchschnittliche Zeitaufwand bei einer beschränkten Ausschreibung ist mit mehreren Wochen je Projekt zu veranschlagen. Normalerweise sind bei der kommunalen Jahresplanung kurzfristige, flexible Einkäufe von Leistungen oder Anpassungen laufender Verträge durch die vergaberechtlichen Vorschriften nur begrenzt möglich.

Zur wirtschaftlichen Vergleichbarkeit zwischen einer Vergabe von Leistungen am Markt und einer Eigenerledigung sind die Beschaffungskosten der Mobilen Multi-Sensorik auf den Zeitraum einer Abschreibung umzulegen. Bei einer Gesamtnutzungsdauer von ca. sechs Jahren und unter den o. a. Ansätzen sollte der Schwellenwert der Anschaffungskosten unter 720.000 Euro liegen – natürlich unter der Annahme, dass das vorhandene Personal die Vermessung des Straßenraumes tätigt. Die denkbare Alternative eines Leasingmodells stellte sich im Jahr 2016 nicht, da ein entsprechendes Leasingangebot für ein vergleichbares Messfahrzeug nicht verfügbar war.

Neben einer reinen wirtschaftlichen Betrachtung (Mittelabfluss, Werterhaltung des Anlagevermögens) spielen strategische Überlegungen und die Nachhaltigkeit des Wissens im Konzern Stadt Essen ebenfalls eine wesentliche Rolle. Ein effizientes Baukostencontrolling bedarf einer zielgerichteten und den örtlichen Erfordernissen angepassten Datenerhebung, Auswertung und Analyse. Kommunale Straßen unterliegen kontinuierlich Eingriffen durch Infrastrukturmaßnahmen (Kanalbau, Leitungen), die den Untergrund inhomogenisieren. Jede Erneuerung von Straßen(-abschnitten) erfordert deshalb ein individuelles Anforderungsprofil. Häufig ergeben sich diese Erkenntnisse erst anhand einer Ersterfassung und bedingen ggf. einen weiteren Untersuchungsaufwand.

Das Wissen um eine ganzheitliche Betrachtung der Infrastruktur und deren Werterhalt (Bilanzwerte) ist von großer Bedeutung. Hinsichtlich der Minimierung von Nachträgen bei Ausschreibungen, der Bauabnahme und dem Einhalten von vereinbarten Baustandards, aber auch zur Kontrolle innerhalb von Verjährungszeiträumen sowie hinsichtlich Mängelbeseitigungsansprüchen ist dieses Know-how ein wesentlicher Baustein für die Kostensicherheit und Einhaltung vorgegebener Bauzeiten.

2 Einführung der Technologie

Seit Frühsommer 2017 ist bei der Stadt Essen ein Georadarverfahren in Kombination mit Laserscanning und Kameratechnik produktiv im Einsatz. Das durch die Firma AllTerra Deutschland GmbH konfigurierte Messfahrzeug besteht aus



Abb. 1:
Multi-Sensor-
Messfahrzeug
der Stadt Essen

den Grundkomponenten Trimble MX8, PointGrey Ladybug 5 sowie je zwei Georadar-Hornantennen mit 1,0 und 2,0 GHz aus dem Hause GSSI.

Die zentrale Infrastruktur zur Standortbestimmung ist im MX8-System integriert. Eine Georadartechnologie wurde bislang noch nicht über die inertiale Messeinheit (IMU) des MX8 gesteuert. Auch die Anordnung der Sensorik am Fahrzeug wurde erst im Rahmen des Essener Prototyps entwickelt. Im Gegensatz zur herkömmlichen Anordnung eines MLS am Heck des Kraftfahrzeugs, musste, vor dem Hintergrund einer Zulassung zum Straßenverkehr, dort das Hornantennensystem verbaut werden. Der MX8 wurde in gedrehter Anordnung über der Fahrzeugfront befestigt, so dass nun in Fahrtrichtung gescannt wird (siehe Abb. 1).

2.1 Trimble MX8

Die Außeneinheit des MX8 beinhaltet zwei Laserscanner VQ-450 der Firma RIEGL mit einer Messrate von jeweils 550.000 Pkt/sec, einer Reichweite von bis zu 800 m und einer Messgenauigkeit von 8 mm (bis 50 m Entfernung) sowie eine nach vorne und drei nach hinten bzw. seitlich gerichtete 5 Megapixel Grasshopper Kameras (Trimble 2017). Den höchsten Punkt im System bildet die zusätzlich installierte 360°-Kamera (Ladybug 5 mit 6 × 5 Megapixel Bildsensoren), die in ca. 3,6 m über der Fahrbahn angeordnet ist.

Die exakte Positionsbestimmung des Fahrzeugs erfolgt über eine inertiale Messeinheit (IMU) innerhalb der MX8-Box, zwei GNSS-Antennen sowie ein Radsensor zur Erfassung von Wegstreckendaten (*Distance Measurement Instrument, DMI*). Sie gehören zum Applanix-Positionierungssystem POS LV 520 (*Position and Orientation Solution for Land Vehicles*), das im Wageninneren verbaut ist (siehe Abb. 2).

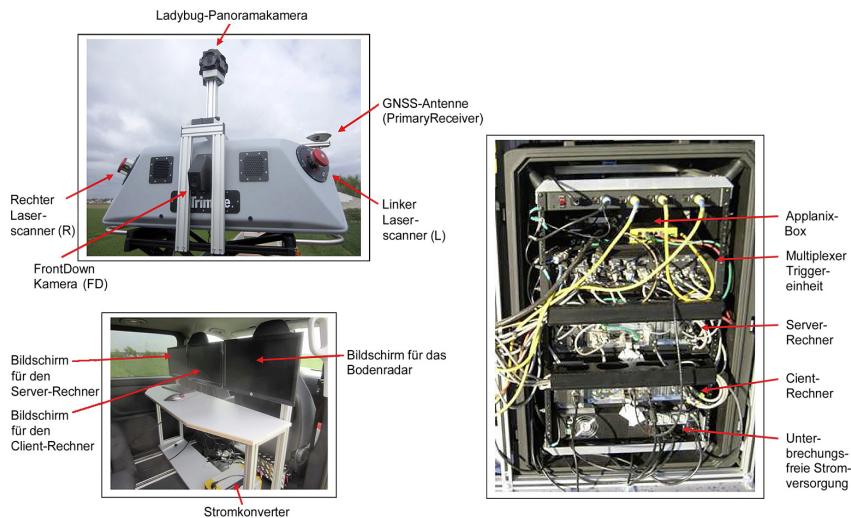


Abb. 2: Hauptkomponenten des Trimble MX8-Systems

Im Wageninneren sind Server- und Client-PC, zwei (oder auch drei) Monitore, die Applanix-Box (Empfang und Speicherung der Positionsdaten von IMU, GNSS und Radsensordaten), die Multiplexer-Trigger-Einheit zur Steuerung der Datenströme und eine unterbrechungsfreie Stromversorgung mit einem 12V-230V-Wandler verbaut. Bedient wird das Gesamtsystem über Steuerungsprogramme der Sensoren, wobei die Hauptsteuerung (Trigger) über die Erfassungssoftware der Ladybug 360°-Kamera läuft. Mit einem Klick werden sämtliche Kameras und Scanner gestartet. Die Daten werden je Sensor in getrennten Verzeichnissen auf dem Server gespeichert (Grasshopper-Kamera: *.avi; Ladybug: *.prg; Scandaten je run *.LA20; GPS-Trajektorie *.gps) und umfassen ca. 45 GB je Kilometer.

2.1.1 Datenpositionskorrektur (Software POSPac 8.1)

Die Software *POSPac* dient derzeit zur Erstellung eines Postprocessing-Files der erfassten Trajektorie aus der Aplanix-Box. Die dazu notwendigen Korrekturdaten der virtuellen SAPOS-Referenzstation müssen im *RINEX*-Format (*Receiver INdependent EXchange*) nach der Befahrung zeitnah heruntergeladen werden. Zur Berechnung wird zunächst die Bestimmungsrate von 10 Hz auf 200 Hz erhöht. Die Positions korrekturen der Trajektorien werden anschließend durch einen Vorwärts-, einen Rückwärts- sowie einen weiteren, präziseren Vorwärtsschnitt berechnet. Im Ergebnis liegt eine *Smoothed Best Estimate of Trajectory* (SBET-File) vor, die als Grundlage zur Prozessierung aller Positionsdaten notwendig ist.

2.1.2 Datenaufbereitung Punktwolken (Software Trident 7.3)

Die *Trident*-Software bietet Werkzeuge für die Qualitätskontrolle der Eingangsdaten aus der Messung. Sie dient der Handhabung von Felddatenerfassung, interpretieren von Bildern und Punktwolken. Neben einer manuellen Erfassung von Objekten, sind Funktionen zum automatischen Extrahieren vorhanden. Die wesentlichen, automatisierten Prozesse sind Oberflächenmodellierung, Fahrbahnschild und Pole-Detektion, Spurmarkierungserkennung, Kanten- und Breakline-Erkennung, Straßengeometrie und Abstandsmessungen.

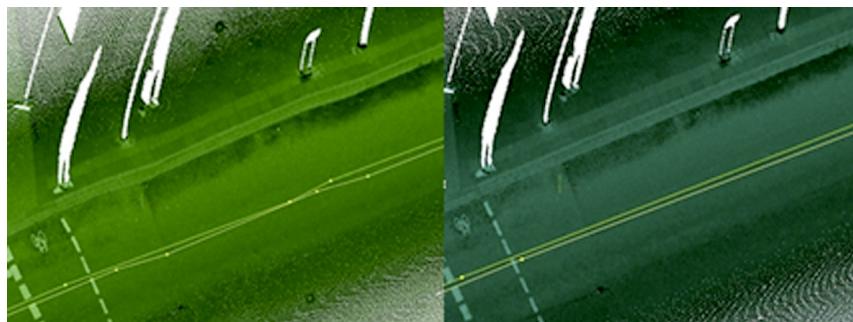


Abb. 3: Korrektur der Punktwolken auf Grundlage der verbesserten Trajektorienlage; rechts: vorher; links: nachher

Nachdem die Daten vom mobilen System auf den Auswerterechner übertragen wurden, muss zunächst die Korrektur der Trajektorie angewandt werden. Mit diesem Schritt sind auch alle Positionsdaten der Bilder angepasst, da diese direkt über Track und Zeit verstandortet sind. Anschließend werden die gemessenen Punktwolken auf Grundlage der verbesserten Trajektorienlage neu berechnet (siehe Abb. 3). Dadurch ermöglicht das integrierte Werkzeug mit einem Minimum an Interaktion die Ausgleichung der Punktwolken unter Verwendung der verfügbaren Sensordaten, d. h. GNSS-, IMU- und Odometrie-Daten.

Registrierung von Punktwolken

Im Funktionsumfang lassen sich darüber hinaus Punktwolken sowohl relativ als absolut registrieren. Als Registrierung man bezeichnet das Überführen der gemessenen (Teil-)Punktwolken in ein Lagebezugssystem.

Trotz des Postprocessing der Trajektorie haben Punktwolken wiederholter Befahrungen Lagedifferenzen im Zentimeterbereich (in Abhängigkeit von der zufälligen GNSS-Lösung). Damit nachträgliche Befahrungen von zuvor abgedeckten Bereichen lagegleich mit ursprünglichen Befahrungen sind, gibt es die

Möglichkeit der relativen Registrierung. Dabei wird je Scanner eine Referenzpunktewolke ausgewählt, worauf die Nachmessungen (Wiederholungsmessungen) in ihrer Lage angepasst werden. Die Software nutzt dafür homogene Bereiche der Punktewolken, wie Fahrbahnoberflächen und Hausfassaden.

Nach der Korrektur von Punktewolken auf Grundlage der verbesserten Trajektorienlage ist eine weitere Steigerung der Genauigkeit mithilfe von präzisen Passpunkten (Sollpunkten) möglich, die absolute Registrierung. Diese können auch „natürliche Targets“ sein. Die (Gesamt-)Punktewolke kann in diesem Fall sofort erstellt werden. Erst im Nachgang erfolgt eine manuelle Zuordnung (soll/ist) anhand ausgewählter Objekte in der Punktewolke. Von diesen müssen präzise tachymetrische und nivellitische Referenzmessungen durchgeführt werden. Auf eine Registrierung mit hochreflektiven Targets wird verzichtet, da der Aufwand erheblich ist und die im Rahmen einer Straßenausbauplanung notwendigen Genauigkeiten auch über natürlich Targets erreicht werden.

2.1.3 Datenauswertung Punktewolken (Software Trident 7.3)

Die hohe Detaillierung und der Informationsgehalt von Punktewolken versetzen den Betrachter ins Staunen. Jedoch dient die Punktewolke auch heutzutage dem Experten häufig nur als Konstruktionsgrundlage. Dies führt zu einem erheblichen Zeitaufwand bei der Datenauswertung. Das Verhältnis zwischen Erfassungs- (Außendienst) und Auswertungswertungszeit (Innendienst), z. B. zur Erstellung eines Lageplans, liegt in der Regel bei 1:20 und mehr. In Abschattungsbereichen sind zudem ergänzende Vermessungen notwendig. Für das Bauwerk Straße kann dies nicht zielführend sein. Es gilt aus der Informationsflut einer Punktewolke möglichst (semi-)automatisch Objekte über geometrische oder attributive Eigenschaften zu erfassen (z. B. Reflexionsstärke, Farbextraktion, konturbasierte Segmentierung). Leider sind die Ergebnisse (semi-)automati-

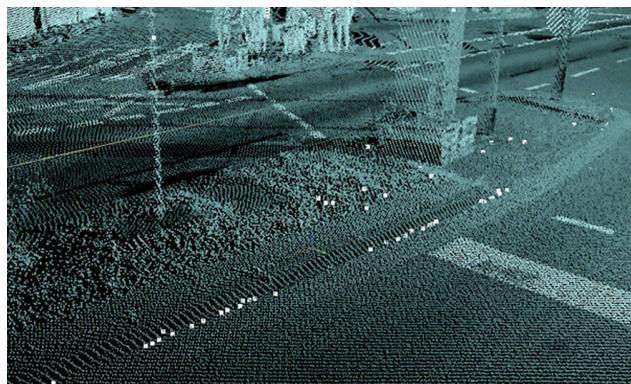


Abb. 4:
Automatisierte
Bruchkanten-
detektion in Trident

tischer Extraktion häufig für die Aufgabenstellung nicht zu verwenden. So zeigen z. B. die Funktionen *pavement-marking*-, *brakeline*-, *pole*- und *sign-detection*, dass ein sinnvoller Umfang an verwertbaren Ergebnissen nicht zu erzielen bzw. der manuelle Nachbearbeitungsaufwand erheblich ist (siehe Abb. 4).

2.2 GSSI Georadar

Für Messungen mit dem Georadar können verschiedene Antennentypen eingesetzt werden. Es wird unterschieden in bodengekoppelte Antennen und luftgekoppelte Antennen (*Hornantenne*). Die Hornantenne wird in der Regel fahrzeuggebunden in einer Höhe von 40 bis 50 cm über Grund eingesetzt. Da diese auch für Geschwindigkeiten bis zu 80 km/h nutzbar sind, kann auf weitere Sicherungsmaßnahmen im fließenden Verkehr verzichtet werden. Aufgrund der Zielstellung wird mit hochfrequenten 1,0 GHz und 2,0 GHz Antennen gemessen. Die höherfrequente Antenne erzielt eine zentimetergenaue Auflösung und ist mit einer Wirktiefe von bis zu ca. 0,70 m besonders für die Detektion der gebundenen Schichten der Straße geeignet. Die Erfassung der ungebundenen Schichten liegt bei der 1,0 GHz Antenne, die bis zu 1,20 m Tiefe in einer Auflösung von 3 bis 5 cm messen kann.

2.2.1 Georadar Technologie

Am Messfahrzeug verbaut sind je zwei Georadar-Hornantennen mit 1,0 und 2,0 GHz, die mit dem Hochleistungs-Multi-Kanal-Steuergerät SIR 30 von GSSI verbunden sind. Damit können in Fahrtrichtung gleichzeitig zwei Schnitte durch den Straßenuntergrund gemessen werden. Nachträglich musste noch ein RTK-Modem (*Real Time Kinematic*) zum Empfang von Echtzeit-GNSS-Korrekturdaten installiert werden, da ein Postprocessing derzeit nicht möglich. Aufgezeichnet werden 2D-Linescans (*Radargram*) in Echtzeit, die die Laufzeit des Signals und die vom Fahrzeug zurückgelegte Distanz beschreiben (siehe Abb. 5). Dabei werden ca. 1.000 Scans je Sekunde durchgeführt, die im Ergebnis je Antenne und gemessenem Kilometer eine Datenmenge von 2,5 GB in einem File erzeugen.

2.2.2 Georadar Auswertung

Zur Auswertung der Daten kommen derzeit die Programme *Radan 7* von GSSI (Datenaufbereitung und Interpretation) und *GPR Slice* (3D-Betrachtung und Auswertung, insbesondere für bodengebundene Antennen) zum Einsatz. Zur Auswertung müssen die vorliegenden Informationen in einzelne Kanäle aufgeteilt werden.

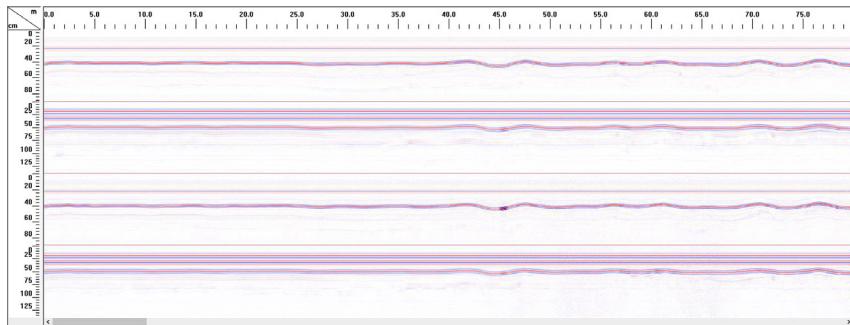


Abb. 5: Radargramme aller Antennen (Signallaufzeit als Messtiefe in cm)

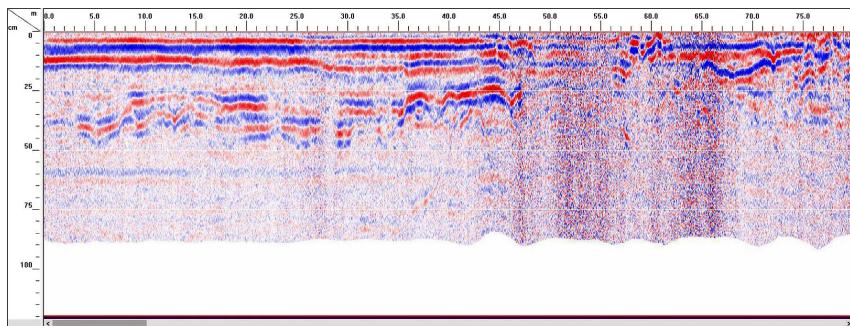


Abb. 6: Messergebnis einer 2 Ghz-Antenne nach Kalibrierung

Die einzelnen Radargramme werden über eine Kalibrierungsdatei von Störfrequenzen zwischen Antenne und Untergrund bereinigt. Die Kalibrierungsdatei wird durch statisches Messen je Antenne zu einer reflektierenden Bodenplatte aus Metall erzeugt. Dadurch wird die Distanz zur Messoberfläche der Straße definiert (Nullpunkt bzw. TimeZero) und die Laufzeit geeicht. Nach der Kalibrierung liegen georeferenzierte und bereinigte Radargramme vor.

Die Amplituden der einzelnen Radargramme zeigen welcher Frequenzaus- schlag an jeder Stelle gemessen wurde. Schicht können entweder positive oder negative Amplituden besitzen – Schichtgrenzen sind dementsprechend anhand der Veränderung des Vorzeichens einer Amplitude zu erkennen. Die Amplituden in der Abb. 6 sind in rot (positiv) und blau (negativ) dargestellt. Deutlich zeigen sich Schichtungen und Heterogenität.

2.2.3 Interpretation des Straßenaufbaus

Eine (semi-)automatische Detektion von Schichtgrenzen aus einem Radargramm ist grundsätzlich als Funktion in *Radan 7* als automatische und inter-

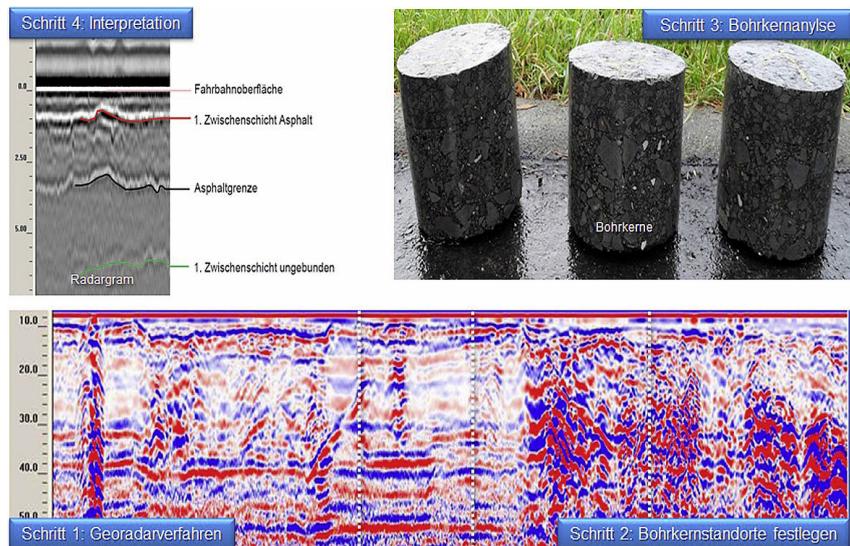


Abb. 7: Arbeitsschritte der Interpretation eines Radargramms

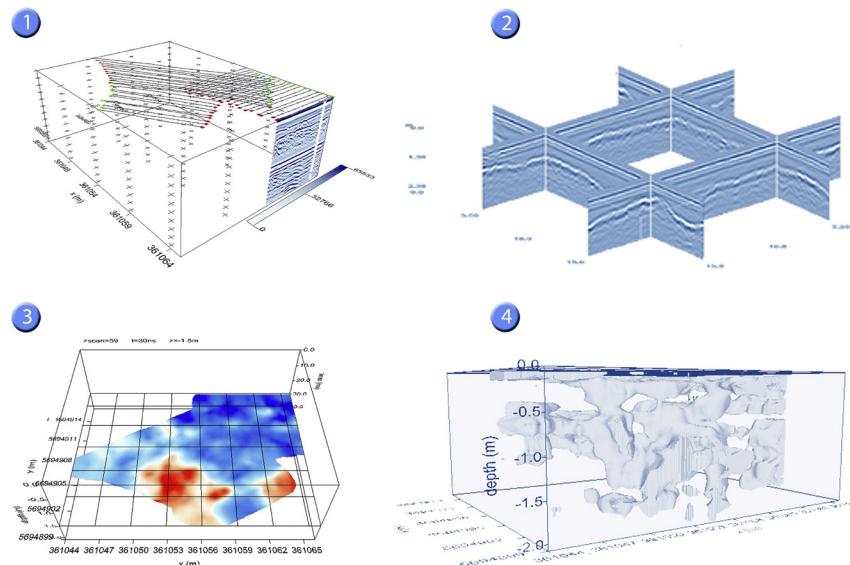


Abb. 8: Erstellen eines 3D-Modells durch Generieren von Schichtoberflächen, aus denen das Volumen homogener Bereiche berechnet wird.

aktive Ebenen-Interpretation beinhaltet. Die Inhomogenität kommunaler Straßen führen jedoch nicht zu verwertbaren Ergebnissen, so dass derzeit eine händisch interaktive Interpretation erfolgt. Dabei dienen Bohrkerne der Ansprache von physikalischen und chemischen Materialeigenschaften. Gezielt können im Radarbild „typische“ oder „auffällige“ Stellen ausgewählt werden, an denen eine Bohrung erfolgen soll. Im Computer entsteht aus Radargramm und Bohrkernansprache eine quasi lückenlose und flächendeckende Berechnung des Straßenuntergrundes in Schnitten (siehe Abb. 7). Aussagen über Schichtdicken, Schichtverteilungen und Schichtanordnungen können berechnet werden. Darüber hinaus werden eventuell auftretende Irregularitäten in Form von Störungen oder Hohlräumen detektiert. Im Ergebnis liegt eine umfassende Basis für Grundsatzbeurteilungen und Kostenprognosen zur Sanierung des Straßenuntergrundes vor.

Die Interpretation vieler paralleler oder sich kreuzender Radargramme erlaubt die Interpolation von Schichtoberflächen und Volumenmodellen (siehe Abb. 8). Dazu kommt die Software *GPR Slice* zur Modellierung der Oberflächen und 3D-Visualisierung zum Einsatz. Eine Exportfunktion der 3D-Volumenmodelle ist nicht vorhanden. Aus diesem Grund erfolgt die Abschließende Massenberechnung durch Differenz zweier Oberflächen z. B. in den Programmen Inpho Scoop ++ / Trimble DTMaster.

3 Resümee und Ausblick

Eine mobile Datenerfassung mittels TLS, Kamera und Georadar hat sich bereits nach wenigen Wochen als alltagstauglich und robust bewährt. Ein Messtrupp, bestehend aus einem Fahrer und einem Operator, kann im fließenden Verkehr ohne zusätzliches Sicherungsfahrzeug eine Datenerfassung durchführen. Im Anschluss der Messung werden derzeit noch zeitaufwändig Daten aus dem Fahrzeug auf externe Speicher übertragen. In Zukunft soll dies per Netzanschluss optimiert werden, so dass nachts Daten in die Geodateninfrastruktur transferiert werden.

Eine (Lage-)Aufbereitung zur Visualisierung und Auswertung kann mit der derzeit im Einsatz befindlichen *Trident*-Software problemlos (semi-)automatisch erfolgen. Wesentlicher Schwachpunkt im Workflow ist die weitgehend fehlende oder mangelhafte Objekterkennung zur Ableitung notwendiger Resultate. Eine manuelle Auswertung von Mengengerüsten des Straßenaufbaus für Ausschreibungen und die Erstellung von Planunterlagen, in einem Umfang von ca. 20 km pro Jahr, lässt sich noch mit vier Personen im Innendienst bewerkstelligen.

3.1 Integrierte Prozessierung (Software Orbit GT)

Die Ergebnisse der Messungen können – mit Ausnahme der Radargramme – mit der Software *Orbit Mobile Map Publisher* problemlos verwaltet und dargestellt werden (vgl. Orbit 1 2017). Die in einer zentralen Datenhaltungskomponente vorgehaltenen Informationen sollen zukünftig für die Gesamtverwaltung



Abb. 9: Panoramakamera und Punktwolke im OrbitGT-Viewer (vgl. Website Orbit 2 2017)

über eine interaktive Web-Anwendung bereitgestellt werden, was bereits für ein Pilotprojekt umgesetzt wurde (siehe Abb. 9). Dies geschieht einfach und intuitiv auf Standardrechnern der Kommunalverwaltung: so können einer Vielzahl von Mitarbeitern die Ergebnisse in einem Browser zur Verfügung gestellt werden. Derzeit wird die aktuelle Version 18, basierend auf HTML 5, getestet. Damit sind Anwendungen auf mobilen Endgeräten (Android und iOS) möglich und es entfällt das Plug-In-Sicherheitsrisiko von Adobe Flash im Webbrowser.

Durch kostenfreie Zusatzprogramme kann der Fachnutzer aber auch in seiner gewohnten CAD- und GIS-Arbeitsumgebung auf die Mobile-Mapping-Daten direkt zugreifen sowie diese mit vorhandenen GDI-Informationen überlagern und manuell auswerten. Hierzu steht derzeit die Erarbeitung eines Konzeptes zum Workflow und zur notwendigen IT-Infrastruktur an. Es ist Grundlage für eine regelmäßige, flächendeckende Befahrung der Straßen in Essen, die je Zeitschnitt ca. 85 TB umfassen wird. Zudem soll eine integrierte Datenhandhabung von der Positionskorrektur, über die Registrierung bis hin zur Verwaltung und Visualisierung getestet und eingeführt werden.

Da derzeit noch keine Integration, Klassifikation und Präsentation von Georadarmessungen möglich sind, besteht hier vordringlicher Entwicklungsbedarf.

In diesem Zusammenhang muss die Darstellung gleichzeitig einen Überblick von Phänomenen auf und unter der Erdoberfläche ermöglichen. Ein weiteres Hauptaugenmerk liegt im Bereich einer (semi-)automatischen Extraktion von Objekten und Eigenschaften, da 1.500 km Straßen zu analysieren sind.

3.2 Anforderungen an die Analytik

Esse wird spätestens mit einer regelmäßigen Vermessung aller Straßen mittels MMS mitten in Big Data ankommen. Um in dieser üppigen Geodatenwelt Wichtiges von weniger Wichtigem zu unterscheiden, bedarf es einer tragfähigen Analytik, die automatisch filtert und strukturiert. Themen wie Straßenzustand, Rauigkeit, Schlaglöcher, Neigung, Spurrillen, Flickstellen, Durchfahrtshöhen und Lichtraumprofile müssen aus der Messung zeitnah in den Arbeitsprozess der Straßenbauverwaltung kommen, da sie Grundlage für ein Erhaltungsmanagement sind. Auch eine Verknüpfungen zwischen den Auswertungsergebnissen unterschiedlicher Sensoren ist wünschenswert: hat das in der Straßenoberfläche detektiert Loch eine Entstehung durch exogene Beanspruchung oder durch Schäden im Straßenaufbau? D. h. neben der Erarbeitung von Workflows für die Auswertestrategie jedes einzelnen Sensors, müssen sich die Ergebnisse aller Sensoren automatisiert korrelieren lassen. Nur so können effiziente Entscheidungsgrundlagen für die Straßenerhaltung erstellt werden. Hierzu wird derzeit das Werkzeug *Orbit feature extraction* getestet (vgl. Orbit 3 2017).

Aber auch für weniger komplexe Fragestellungen, wie einer Objekterkennung, müssen softwareseitig Lösungsansätze geboten werden. Hier wird insbesondere der Bereich der Inventarisierung von Straßeninfrastrukturen gesehen, z. B. Kanaldeckel und -einläufe, Straßenmarkierung, Masten (erkennen und nach Durchmesser/Höhe klassifizieren), Verkehrszeichen und sonstige Schilder, Brückendurchfahrtshöhen sowie Bäume im Straßenraum. Von Vorteil wäre eine Funktion, die durch manuelles anlernen Objektmuster speichert und anschließend automatisch als Objektklasse extrahieren kann.

Literatur

Orbit 1 (2017): https://orbitgt.com/kb/180/products/product_comparison, letzter Zugriff 25.10.2017.

Orbit 2 (2017): http://demo.orbitgt.com/3d_mapping (siehe Trimble MX8 Demo Essen), letzter Zugriff 25.10.2017.

Orbit 3 (2017): <https://orbitgt.com/3dm-feature-extraction>, letzter Zugriff 27.10.2017.

Stadt Essen (2017): www.essen.de/rathaus/aemter/ordner_62/gebaeude_1.de.html, letzter Zugriff 29.9.2017.

Stadt Essen (2016): Berichterstattung Baukostencontrolling im Bau- und Verkehrsausschuss (Vorlage 1107/2016/6A 25.8.2016) und im Rat (1624/2016/6A 10.11.2016)

Solarenergieanalyse der Stadtwerke Essen AG (2017): <https://essen.publicsolar.de>, letzter Zugriff 29.9.2017.

Trimble (2017): www.trimble.com/imaging/pdf/Trimble_MX8_Datasheet.pdf, letzter Zugriff 16.10.2017.

WeBest (2017): www.hft-stuttgart.de/Forschung/Projekte/Projekt103.html/de, letzter Zugriff 4.10.2017.

Kontakt

Frank Knospe

Stadt Essen, Amt für Geoinformation, Vermessung und Kataster

Lindenallee 10, 45127 Essen

frank.knospe@amt62.esen.de

Terrestrisches Laserscanning am Flughafen Frankfurt/Main für Facility Management-Aufgaben

Stephan Och

1 Flughafen Frankfurt/Main

Die Fraport AG betreibt mit dem Flughafen Frankfurt eines der bedeutendsten Luftverkehrsdrehkreuze der Welt (Abb. 1). Zu dem Leistungsspektrum der Fraport AG gehören sämtliche Services rund um den Flugbetrieb sowie Kompetenzen im Airport-Retailing. Neben diesen Leistungen stehen vor allem die Aufgaben aus der Rolle des Eigentümers des Flughafens Frankfurt im Fokus der Tätigkeiten.

Das Immobilienportfolio der Fraport AG umfasst am Standort Frankfurt rund 450 Gebäude auf einer Gesamtfläche von knapp 23 Quadratkilometer. Die



Abb. 1: Luftbild Flughafen Frankfurt 2015

gesamte Bruttogeschoßfläche beläuft sich auf rund 3,2 Millionen Quadratmeter, was flächenmäßig umgerechnet fast 40 Frankfurter Messeturmen entspricht.

Im Gegensatz zu vielen anderen Immobilienbetreibern ist das Gebäudeportfolio der Fraport AG extrem heterogen strukturiert; so finden sich am Flughafen neben den Terminals unter anderem Büro- und Verwaltungsgebäude, Werkstätten, Logistikgebäude und Parkhäuser.

An diese Gebäude werden die unterschiedlichsten Anforderungen von internen und externen Kunden und Nutzern gestellt. Zahlreiche Gebäude unterliegen einer 24-Stunden-Nutzung. Der Flughafen Frankfurt ist eine dynamische, sich ständig verändernde Immobilie. Immer wieder werden neue Anforderungen beispielsweise aus dem Brandschutz oder aus dem Retailgeschäft an die Infrastruktur formuliert, die möglichst effizient, schnell und kostengünstig im Rahmen von Planungs- und Bauprojekten umzusetzen sind. So investiert die Fraport AG alleine im Norden des Flughafens 300 bis 400 Millionen Euro jährlich für Modernisierungen, Erweiterungen und Neubauten. Der Großteil dieser Projekte findet in bestehenden Flughafengebäuden und -anlagen, insbesondere in den bestehenden Terminals 1 und 2, statt. Neben Neubauprojekten wie dem Flugsteig A-Plus sind es somit überwiegend Projekte im Bestand, die in den Betrieb des Technischen Facility Managements übergehen.

2 Fakten rund um den Flughafen Frankfurt

- 167.000 Passagiere täglich
- 5.800 Tonnen Cargo täglich
- 79.000 Stück Abfluggepäck
- über 390 Züge an den Flughafenbahnhöfen täglich
- über 400 Gebäude
- 3,2 Millionen Quadratmeter BGF
- 52.500 Räume
- davon 1,3 Millionen Quadratmeter vermietbar
- jährliche Raumänderungen ca. 10 %
- heterogene Gebäudestruktur
- Terminals, Büro- und Verwaltungsgebäude
- Werkstätten, Logistikgebäude
- Parkhäuser
- verschiedenste Kunden- und Nutzeranforderungen
- 24-Stunden-Gebäudenutzung
- zahlreiche weitere Anlagen wie Tunnel, Abwasserreinigungsanlage und Kanalkanäle

3 Ausbau und Erweiterung

In den letzten Jahren wurde von der Fraport AG die Infrastruktur im Norden des Flughafens Frankfurt modernisiert und erweitert. Das umfassende Kapazitätsausbauprogramm der Fraport AG beinhaltete auch den Bau einer neuen



Abb. 2: Ausbau und Erweiterung der letzten und kommenden Jahre

Landebahn und die Erweiterung des Terminal 1 durch den Neubau des Flugsteigs A-Plus. Zum weiteren Ausbau soll unter anderem auch ein drittes Terminal am Standort Frankfurt entstehen. Außerdem wird Fraport kontinuierlich Maßnahmen zur Erschließung zusätzlicher Retailflächen und eine Erweiterung des Immobiliengeschäfts am Standort Frankfurt durchführen (Abb. 2).

Mit diesen Kapazitätserweiterungen wird der Flughafen Frankfurt der steigenden Nachfrage von Passagieren und Fluggesellschaften gerecht. Laut Prognosen sollen zukünftig knapp 90 Millionen Passagiere jährlich in Frankfurt Airport ankommen, abfliegen oder umsteigen.

In Zukunft werden auch weitere Passagier- und Gepäckanlagen sowie neue Einrichtungen zur Wartung von Flugzeugen benötigt. Das im Süden geplante neue Passagier-Terminal 3 könnte das bisherige Kapazitätsangebot von rund 60 Millionen Fluggästen pro Jahr um nochmals ca. 25 Millionen aufstocken.

4 Digitale Bestandsdaten in 3D

Die Fraport AG nutzt bereits seit vielen Jahren digitale Methoden, um die Qualität und Prozesse des Planens, Bauens und Betreibens weiter zu optimieren. So liegen von ca. 95 % aller Fraportgebäude dreidimensionale Gebäudemodelle vor.

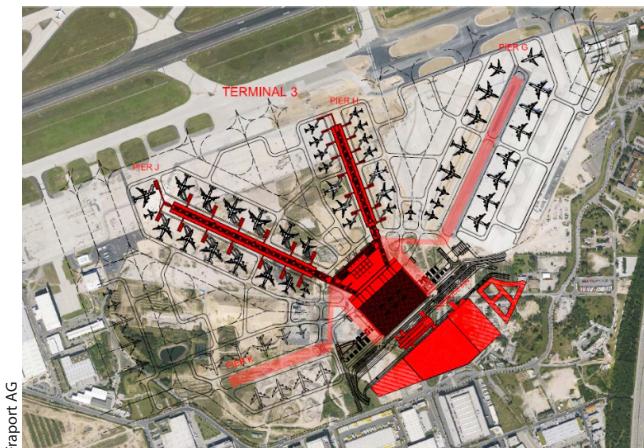


Abb. 3:
Planung Terminal 3

Aufbauend auf den Erfahrungen der letzten 20 Jahre in Bezug auf 3D-Modelle wurde beispielsweise der gesamte Neubau des Flugsteigs A-Plus ausschließlich in Form von 3D-Modellen in CAD geplant sowie zur Qualitätssicherung ein flächendeckendes 3D-Laserscanning eingesetzt (vgl. [Kap. 5 „Praxisbeispiel Flugsteig A-Plus“](#)).

Alle digitalen Dokumente und Modelle basieren bei der Fraport AG auf der CAD-Standardsoftware MicroStation von Bentley Systems. Die Bestandspläne sind in einer zentralen Dokumentenmanagement-Plattform (ProjectWise) abgelegt und können von den relevanten Akteuren im Bereich Planen, Bauen und Betreiben eingesehen und genutzt werden ([Abb. 3](#)).

5 Praxisbeispiel Flugsteig A-Plus

Beim Flugsteig A-Plus ([Abb. 4](#)) handelt es sich um eine Erweiterung des bestehenden Terminals 1 nach Westen mit einem Investitionsvolumen von rund 800 Millionen Euro. Der Neubau umfasst eine Fläche von 185.400 Quadratmetern und erstreckt sich über vier Ebenen. Mit knapp 800 Metern Länge bietet der Flugsteig 6 Millionen Passagieren Platz. Entsprechend der vertraglichen Vereinbarung stellte das Gebäudemodell des Architekten die Grundlage für die



Abb. 4: Flugsteig A-Plus

Fachplanermodelle. Dieses Modell des Architekten wurde als Fortschreibung des bestehenden Gebäudemodells Terminal 1 mit den vom Bauherrn vorgegebenen Softwareprodukten konstruiert. Durch den kontinuierlichen Einsatz von Kollisionsprüfungs-Programmen konnte die Qualität der koordinierten Planung deutlich verbessert werden.

Darüber hinaus hat die Fraport AG wertvolle Erfahrungen mit einer anderen digitalen Methode, dem 3D-Laserscanning, gesammelt. Mit diesem Verfahren können in kurzer Zeit große Räumlichkeiten von innen sehr genau dreidimensional erfasst werden. Erstmals wurde vollflächig ein CAD-Revisionsdatenabgleich mit Unterstützung von 3D-Laserscanning durchgeführt. Hierzu wurde der gesamte Flugsteig A-Plus baubegleitend gescannt und die 3D-Punktwolke mit den CAD-Revisionsdaten abgeglichen. Mit diesem Verfahren konnte eine bisher nicht erreichte Qualität an eigenständigen Bestands- bzw. Revisionsunterlagen geschaffen werden (Abb. 5).

Aufgrund der verschiedenen Scanphasen (Architektur und verschiedene TGA-Einbauabschnitte) hat TPI in der Erweiterung Flugsteig A und in den Umbaubereichen in Summe ca. 230.000 Quadratmeter gescannt (Abb. 6 und Abb. 7).

Neben dem Scannen und der Georeferenzierung war die Verarbeitung, Verwaltung und Sicherung der Daten eine große Herausforderung. Mehrere Rechner liefen rund um die Uhr, um die Datenbanken zu generieren und die notwendigen Abgabeprodukte zu erzeugen. Insgesamt wurde ein Terabyte Speicherplatz auf externen Festplatten benötigt. Für die insgesamt ca. 8.000 Scans wurden ca. 7.500 Targets angebracht und eingemessen.

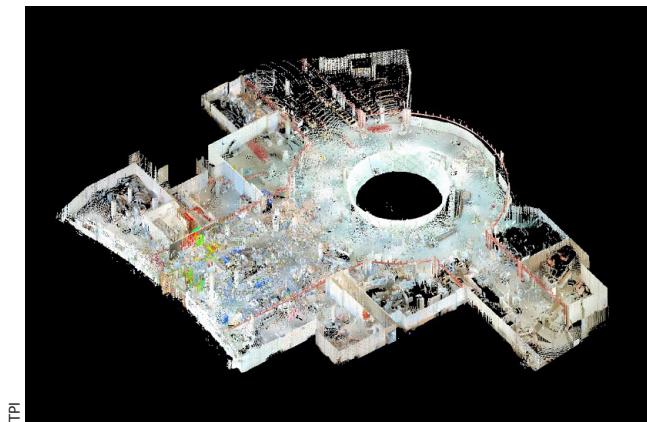


Abb. 5:
Ausschnitt
Bereich „Wurzel“
3D-Modell Flug-
steig A-Plus



Abb. 6:
Soll-Ist-Vergleich
Architektur-Bereich
„Wurzel“ Flugsteig
A-Plus

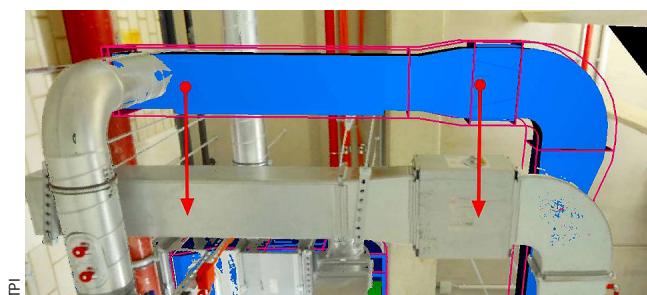


Abb. 7:
Soll-Ist-Vergleich
TGA-Bereich
„Wurzel“ Flugsteig
A-Plus

6 Praxisbeispiel Aufzugsschacht

Für die „as-built-Aufnahme“ von Aufzugsschächten wird am Flughafen Frankfurt ebenfalls die Laserscanntechnologie und die damit verbundenen Auswertemethoden eingesetzt. Mithilfe von ausziehbaren Stativen können aus der Aufzugsunterfahrt Scans in verschiedenen Höhen ausgelöst werden (Abb. 8).

Die entsprechende Registrierung der Einzelscans wird durch „cloud to cloud“ realisiert (Abb. 9). Somit sind z. B. auch Schieflagen des Aufzugsschachtes



TPI

Abb. 8:
Aufzugsschacht mit
ausgefahremem Stativ



TPI

Abb. 9:
Punktwolke
Aufzugsschacht

nachweisbar. Aufgrund der kurzen Scanzeiten ist ein Stillstand der Aufzugsanlage nur für einen vertretbaren Zeitraum notwendig.

7 Praxisbeispiel Gepäckförderanlage

Die automatische Anlage war 1974 noch 26 Kilometer lang und fertigte täglich 13.000 Gepäckstücke ab. Heute wird das Gepäck durch 80 Kilometer lange Tunnel im Keller der Terminals und unter dem Vorfeld befördert. Dabei werden bis zu 20.000 Koffer mit bis zu 18 Stundenkilometern innerhalb von 45 Minuten von einem Flugzeug ins andere verladen – so kann Fraport auch knappe Umsteigezeiten gewährleisten. Um in Teilbereichen der Gepäckförderanlage neue Kabeltrassen an den Decken ohne Eingriff in die sensible Anlage montieren zu können, werden die entsprechenden Störkonturen benötigt.



Abb. 10:
TruView, Gepäck-
förderanlage

Mit insgesamt 100 Scans wird ein Teilbereich erfasst und anschließend werden alle Objekte (Stahlbau, Förderanlage, Kabeltrasse, Rohre, Leitungen und Gitterroste u. ä.) modelliert. Die Abgabe erfolgt als MicroStation 3D-Datei als Planungsrundlage an die Fraport AG (Abb. 10).

Natürlich gilt der Bereich der Gepäckförderanlage an jedem Flughafen als „Hochsicherheitsbereich“, der Zugang wird nur nach gesonderter Überprüfung gestattet. Des Weiteren wurden die Scanarbeiten bei laufendem Betrieb der Anlage und mit der entsprechenden Geräuschkulisse durchgeführt. Aufgrund des komplexen Fördersystems sind die Platzverhältnisse für Scanner und Personal extrem eingeschränkt. Kreative Lösungen mit Klemmstativen, ausziehbaren Stativen und Scannerbedienung über WLAN sind natürlich notwendig.

8 Praxisbeispiel Vogelschutzzaun

Im Bereich der Nordwest-Landebahn des Frankfurter Flughafens verhindert ein grüner, ca. 10 Meter hoher Vogelschutzzaun den Vogelschlag aus Richtung des



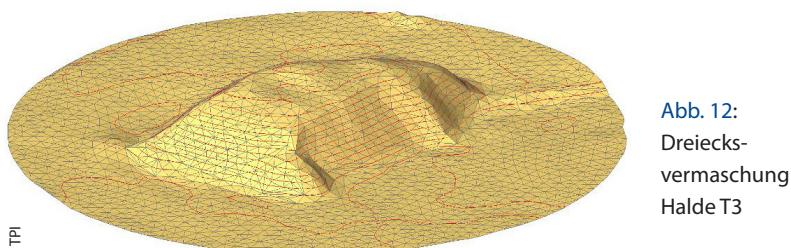
Abb. 11:
Punktwolke Vogel-
schutzzaun

angrenzenden Mönchwaldsees. Für den Austausch von defekten Elementen der genannten Zaunanlage wird ein exaktes Aufmaß zur Fertigung benötigt. Durch Einsatz der 3D-Laserscantechnologie ist eine effiziente Aufnahme zur Darstellung der Zaunansichten mit Vermaßung im DGN-Format möglich (Abb. 11).

Auch hier sind die Sicherheitsvorgaben bezüglich Arbeiten im Sicherheitsbereich und im Start- und Landebahnsystem zu berücksichtigen. Über Funk stehen die Ingenieure im ständigen Kontakt mit der Vorfeldaufsicht und die Vermessungsfahrzeuge sind durch einen Transponder jederzeit ortbar. Niemals darf der Flugbetrieb durch Vermessungsarbeiten beeinträchtigt oder gar gefährdet werden.

9 Praxisbeispiel Halden Terminal 3

Mit dem Abschluss des Trockenaushubs wurde das Gelände auf der Grundfläche des zukünftigen Terminals 3 auf 5,5 Metern Tiefe ausgehoben. Von den insgesamt 400.000 Kubikmetern Erde verbleibt ungefähr ein Drittel auf der Baustelle.



Ein Teil wird später für den Bau neuer Anbindungsstraßen und der Erweiterung der Anschlussstelle Zeppelinheim an die A5 verwendet. Den Rest des Aushubs nutzen die Bauexperten unter anderem um Beton herzustellen. Dieser kommt beim Bau des neuen Terminals zum Einsatz. Auch hier liefert die Scantechnologie in Kombination mit GNSS-Empfängern zur Georeferenzierung, besonders bei unprofilierten Halden, beste Grundlagen zur optimalen Volumenbestimmung (Abb. 12).

10 Praxisbeispiel Schachtaufnahme

Durch den Überkopfeinsatz der Laserscanner ist eine sichere und genaue Erfassung von Schächten und Bauwerken ohne Betretung möglich. Die qualifizierte



Abb. 13:
Punktwolke
Schachtsohle

Auswertung der relevanten Informationen ist aufgrund der fotorealistischen Punktwolken durch Bearbeitung im Büro realisierbar. Die Georeferenzierung der Schachtaufnahmen erfolgt im Lage- und Höhensystem des Frankfurter Flughafens (Abb. 13).

11 Zusammenfassung

Wie bei der Auswahl an Projektbeispielen ersichtlich, stellt der Einsatz von terrestrischen Laserscannern mit der entsprechenden Auswertesoftware und -strategien einen großen Mehrwert für das Facility Management am Frankfurter Flughafen dar. Speziell die Systemeffizienz der Scantechologie in kurzer Zeit durch berührungslose Messung ist im Sicherheitsbereich besonders wertvoll. Auch im Hinblick auf die weitere Integration der BIM-Methode bei der Fraport AG ist der Einsatz von Laserscannern unverzichtbar.

Die aktuelle Gerätetechnologie erlaubt eine Vielzahl von verschiedensten Anwendungsfällen für die Scanner. Sicherlich sind gut ausgebildete und erfahrene Mitarbeiter zur Datenprozessierung und Produkterstellung unabdingbar. Wie bekannt müssen im Softwarebereich speziell in der Modellierungsunterstützung, für die zukünftigen Aufgaben und zu erwartenden Datenmengen, noch umfangreiche Entwicklungen erfolgen.

12 Ausblick

Neben den terrestrischen Laserscannern werden auch mobile Erfassungssysteme (z. B. NavVis) für den Flughafenbetreiber zum Bau und Betrieb der umfangreichen Einrichtungen an Bedeutung gewinnen. Bei BIM-Themen werden klei-

ne und hocheffiziente Scanner (z. B. BLK 360), auch mit minderer Genauigkeit im Vergleich zum hochgenauen Scannen, wichtig werden. Die für den Baufortschritt existenziellen Soll-Ist-Vergleiche können mit noch größerer Effizienz für die weiteren Entscheidungsprozesse der Projektleitung zur Verfügung gestellt werden. Weiterhin wird es in Kürze erstmalig einen Drohnenregelbetrieb am Flughafen Frankfurt durch die Kooperation zwischen Fraport/DFS/AIBOTIX und TPI geben. Zu den bodengebundenen Systemen kommen somit auch Bilder und Punktwolken aus der Vogelperspektive hinzu.

Kontakt

Stephan Och

TPI Vermessungsgesellschaft mbH

Otto-Hahn-Straße 46, 63303 Dreieich

stephan.och@tpi-vermessung.de

3D-Punktwolken-basiertes Monitoring von Infrastrukturbauwerken am Beispiel einer historischen Gewölbebrücke

Jens-André Paffenholz | Ulrich Stenz | Daniel Wujanz |
Frank Neitzel | Ingo Neumann

1 Motivation und Zielsetzung

Dieser Beitrag thematisiert die Nutzung von 3D-Punktwolken zum Monitoring von Infrastrukturbauwerken am Beispiel einer historischen Gewölbebrücke bei Verden (Aller). Zur Erfassung von 3D-Punktwolken kommen in diesem Projekt terrestrische Laserscanner zum Einsatz, die sich seit mehr als einer Dekade als effizientes Messsystem zur schnellen Erfassung der Geometrie von Objektoberflächen etabliert haben. Der Laserscanner arbeitet unmittelbar dreidimensional und mit hoher räumlicher Auflösung im Bereich weniger Millimeter. Durch seine reflektorlose Entfernungsmessung erfolgt eine direkt zentrische Messung unmittelbar am spezifischen Ort des Objektes ohne die Notwendigkeit einer künstlichen Signalisierung. Zusätzlich werden Oberflächenremissionswerte (Intensitätswerte) aufgezeichnet. Als wesentliche Charakteristika der Laserscanner sind zu nennen: die prinzipiell flächenorientierte Objekterfassung, die Möglichkeit der Aufnahme unzugänglicher Objekte, die Aufnahme von nicht oder schwach texturierten Objekten aufgrund der reflektorlosen Entfernungsmessung und die Objekterfassung in vergleichsweise kurzer Zeit.

Somit steht dem Geodäten eine effiziente, flächenhafte Erfassungstechnologie neben den konventionellen punktbasierten Messmethoden, wie z. B. der Tachymetrie und dem Nivellement für das geodätische Monitoring von künstlichen und natürlichen Objekten zur Verfügung. Insbesondere bei komplexen Objektoberflächen weist das terrestrische Laserscanning (TLS) aufgrund der flächenhaften Erfassung sowie seiner hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung gegenüber punktuellen Messtechnologien entscheidende Vorteile auf. Infolge der flächenhaften Abtastung und entsprechender Datenanalyse können Aussagen über die vollständige Deformation eines Objektes getroffen werden, sodass auch kleinere strukturelle Veränderungen detektiert werden, die mit reinen punktuellen Messmethoden nicht aufdeckbar sind. Dadurch entsteht ein klarer Mehrwert bei der Beurteilung des Deformationsverhaltens eines Messobjektes gegenüber den konventionellen Messverfahren. Eine kurze allgemeine

Einführung sowie einen Überblick über die drei verschiedenen Messmodi (1D, 2D und 3D) des Laserscanners geben u. a. Kutterer et al. (2009).

Einen Überblick zur Thematik des 3D-Punktwolken-basierten Monitorings/Deformationsanalyse geben u. a. Holst und Kuhlmann (2016), die fünf Herausforderungen der TLS-basierten Deformationsanalyse herausarbeiten. Wunderlich et al. (2016) geben einen allgemeinen Überblick über die Herausforderungen, die mit der flächenhaften Deformationsanalyse aus 3D-Punktwolken verbunden sind. Sie zeigen Strategien für den Weg zu einer strengen Deformationsanalyse und Signifikanztests auf. In der Literatur finden sich Beispiele für das TLS-basiertes Monitoring von Infrastrukturbauwerken, wie Brücken (Liebig et al. 2011), Staudämme (Eling 2009), Stützwände (Haupt und Paffenholz 2016), Tunnel (Ohlmann-Bartusel 2009) und Bauwerke wie ein Radioteleskop (Holst et al. 2015).

Im Folgenden fokussiert dieser Beitrag auf die Ergebnisse des 3D-Punktwolken-basierten Monitorings einer historischen Gewölbebrücke über die Aller bei Verden im Rahmen eines interdisziplinären Belastungsversuchs im Juni 2016.

2 Das Tragwerk

Die historische Allerbrücke bei Verden (Niedersachsen) war eine Gewölbebrücke für den Eisenbahnverkehr, die nach über 150 Jahren der Nutzung im Jahr 2015 außer Betrieb gegangen ist und durch eine neue Stahlbrücke ersetzt wurde. Vor dem endgültigen Abbruch der Gewölbebrücke Mitte des Jahres 2016 ergab sich die einmalige Chance der experimentellen Untersuchung des Bauwerkes. Das Ziel des aufwändigen Versuchs war die Überprüfung und Verbesserung der Vorhersagequalität der üblichen Rechenverfahren für Gewölbebrücken. Hierzu galt es die lastinduzierte Deformation in einem Bereich von wenigen Millimetern präzise zu bestimmen. Im Rahmen eines interdisziplinären Kooperationsprojektes von Partnern aus Forschung und Wirtschaft ist der Belastungsversuch in Form von zwei getrennten Versuchen (V1 im März 2016 und V2 im Juni 2016) durchgeführt worden.

Die charakteristischen Merkmale der historischen Allerbrücke waren ihre kreisförmigen Bögen aus Ziegelmauerwerk mit einer lichten Weite von ca. 14 m, einer Bogenbreite von ca. 8 m und einem Stich von ca. 2 m. Eine mittige Pressfuge trennte die Bögen längs der Bauwerksachse. **Abb. 1** zeigt den Blick von Westen auf den zur experimentellen Untersuchung ausgewählten Bogen 4 südlich der Aller im Zuge des Belastungsversuchs V2.

Im Zuge des Belastungsversuchs sollte die Gebrauchslast von 1,0 MN (100 t) deutlich überschritten werden, sodass erste nichtlineare Verformungen detek-



Abb. 1: Blick von Westen auf den Bogen 4 der historischen Gewölbebrücke über die Aller bei Verden im Rahmen von V2 im Juni 2016. Der geweißte Bereich an der Gewölbeunterseite kennzeichnet den Bereich im unmittelbaren Einfluss der Lasteinleitung. Im Vordergrund: Messbasis für die Bestimmung der Vertikalverformungen an drei diskreten Stellen. Auf der Brücke: vier Hydraulikzylinder zur Lastaufbringung.

tiert werden können. Nach Schacht et al. (2016) und den dort zitierten Quellen ergab sich aus numerischen Simulationen die Notwendigkeit einer Belastung mit etwa dem Fünffachen der Gebrauchslast. Es wurde eine maximale Last von ca. 6 MN festgelegt, die mit Hilfe von vier Hydraulikzylindern erzeugt wurde. Die auf dem Brückengewölbe installierten Hydraulikzylinder zur halbseitigen Belastung des Tragwerkes zeigt Abb. 1. Zur Erzeugung der Gegenkraft wurden unterhalb der Brücke Verpresspfähle bis zu 18 m tief in den Boden getrieben. Die Verbindung zwischen Hydraulikzylinder und Verpresspfählen bildeten Ge- gewindestangen. Eine detaillierte Beschreibung des Tragwerkes sowie der Ver- suchsplanung findet sich ebenfalls in Schacht et al. (2016).

3 Datenerfassung im Zuge des Belastungsversuches V2

Die Federführung des interdisziplinären Belastungsversuchs hatte das Institut für Massivbau, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover (LUH) inne. Weitere Beteiligte waren das Institut für experimentelle Mechanik Leipzig, das Institut für Materialprüfung der Jade Hochschule Oldenburg, das Ingenieurbüro für Bauwerkserhaltung Weimar GmbH und die Marx Krontal GmbH. Aus dem Bereich der Geodäsie waren folgenden Institute beteiligt:

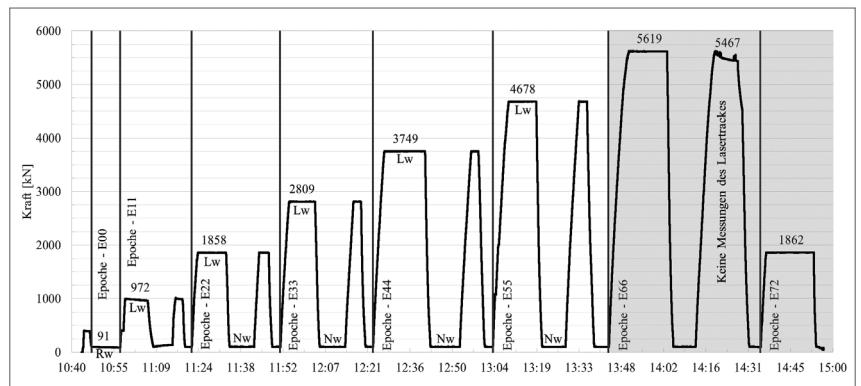
- Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der Technischen Universität (TU) Berlin mit einem Laserscanner und einem kamerabasierten digitalen

Bildkorrelationssystem (DIC-System) (Burger et al. 2017, Burger et al. 2018, Wujanz et al. 2018).

- Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Technischen Universität Braunschweig mit einem terrestrischen Radarsensor (nur Belastungsversuch V2) (Paffenholz et al. 2018b).
- Geodätisches Institut, Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik der Technischen Universität Darmstadt mit einem Profillaserscanner (nur Belastungsversuch V2) (Wujanz et al. 2018).
- Geodätisches Institut Hannover (GIH) der LUH mit einem Laserscanner und einem Lasertracker (Paffenholz und Stenz 2017, Paffenholz et al. 2018a, Paffenholz et al. 2018b, Wujanz et al. 2018).
- Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformation der Jade Hochschule Oldenburg mit einem Kamerasystem.

Der vorliegende Beitrag diskutiert die Ergebnisse des 3D-Punktwolken-basierten Monitorings des Belastungsversuchs V2 im Juni 2016, die mit terrestrischen Laserscannern im 3D-Modus erfasst wurden. Die weiteren eingesetzten Sensoren aus dem Bereich der Geodäsie und die damit erzielten Ergebnisse werden in den oben genannten Publikationen vorgestellt.

Abb. 2 zeigt das realisierte Belastungsregime im Rahmen von V2 im Juni 2016. Jede Laststufe ergab sich aus einer sukzessiven Steigerung der Last um ca. 1 MN zur vorherigen Laststufe, gefolgt von einer Entlastung auf ein Grundlastniveau



Paffenholz et al. 2018a

Abb. 2: Belastungsregime von V2 im Juni 2016 mit Angabe der Last pro Stufe in kN über die Zeit. Die vertikalen Markierungen begrenzen die Epochen der geodätischen Sensoren Laserscanner und Lasertracker. Eine Epoche (E) definiert sich durch eine Laststufe (Lw) und das darauffolgende Grundlastniveau (Nw) unter Hinzunahme einer laufenden Nummer [0,7] sowie der ganzzahligen Last in MN [0,6]. Die Referenz- bzw. Nullepoche ist definiert als E00Rw.

von ca. 100 kN. Dieses Grundlastniveau ist als eine von außen aufgebrachte Last zu sehen und entspricht nicht dem Eigengewicht. Grundsätzlich wurde jede Laststufe zweimal angefahren und für einen zuvor definierten Zeitraum konstant gehalten (Schacht et al. 2016). Unter Berücksichtigung der Gesamtversuchsdauer war die Haltezeit des jeweils ersten Anfahrens auf die zeitintensive Erfassung einer 3D-Punktwolke mit dem Laserscanner abgestimmt.

Die im Folgenden diskutierten Ergebnisse des 3D-Punktwolken-basierten Monitorings des Belastungsversuchs V2 sind mit einem terrestrischen Laserscanner Zoller & Fröhlich (Z+F) Imager 5006h des Institutes für Geodäsie und Geoinformationstechnik der TU Berlin sowie einem Z+F Imager 5006 des GIH der LUH im 3D-Modus erfasst worden. Für die technischen Details sowie Sensorparameter wird auf das Datenblatt des Herstellers (Zoller & Fröhlich 2017) verwiesen.

Die Erfassung der 3D-Punktwolken erfolgte für beide Laserscanner Z+F Imager 5006/5006h von je einem dicht benachbarten stationären Standpunkt für den gesamten Belastungsversuch mit Blick von Osten in das Gewölbe. Eine allgemeine Übersicht der epochenweisen Erfassung während des Belastungsversuchs V2 findet sich in Abb. 2. Die Erfassung der 3D-Punktwolken erfolgte für beide Laserscanner zu Zeitpunkten, in denen eine konstante Last für wenige Minuten gehalten wurde. Mit den gewählten Scanparametern „*high, low noise*“ ergab sich eine Dauer von 7 Minuten für die 3D-Punktwolkenerfassung. E00Rw bezeichnet die Referenzepochen mit einem Grundlastniveau von ca. 100 kN vor Versuchsbeginn. Für die erste Epoche wurde ausschließlich die Laststufe mit 1 MN erfasst. Ab der zweiten Epoche wurde das unmittelbar auf die Laststufe folgende Grundlastniveau ebenfalls erfasst.

4 Überprüfung der Stabilität der Sensoren

Eine der elementaren Vorbereitungen der eigentlichen Messungen im Zuge des Belastungsversuchs war die Standpunktwahl der Laserscanner in Bezug auf das Gewölbe der Brücke. Hierbei galt es insbesondere die Sicherheit der Sensoren im Falle eines Versagens der Brücke in Folge der Belastung angemessen zu berücksichtigen. Ein aus erfassungstechnischer Sicht optimaler Standpunkt ist gegeben, wenn die Objektoberfläche unter einem möglichst kleinen Winkel im Bezug zur Flächennormalen erfasst wird (Soudarissanane et al. 2011). Hieraus ergibt sich der optimale Standpunkt als Ort unmittelbar unter dem Scheitelpunkt der Brücke, was aus ersichtlichen Gründen nicht möglich ist. Schlussendlich war die Standpunktwahl ein Kompromiss aus dem eingangs angeführten Sicherheitsaspekt und einem möglichst optimalen Auftreffwinkel im zuvor beschriebenen Sinne. Als Standpunkt wurde daher – für die überwiegenden am

Belastungsversuch beteiligten Sensoren – der östliche Rand der Gewölbebrücke (nahe dem unbelasteten Abschnitt), in unmittelbarer Nähe zur neuen Stahlbrücke gewählt.

Der gewählte Standpunkt ist auch hinsichtlich auftretender geometrischer Veränderungen des Bodens auf Grund der Lasteinbringung zu betrachten. Da dieser Umstand durch die Verpresspfähle nicht ausgeschlossen werden kann und es sich zudem um einen schwer kalkulierbaren Effekt handelt, ist diesem durch geeignete Maßnahmen Rechnung zu tragen. Mögliche unberücksichtigte Auswirkungen führen zu Abweichungen der Standpunktkoordinaten und -orientierungen, die wiederum bei Vernachlässigung zu Scheindeformationen oder allgemein einer Verfälschung der Ergebnisse führen. Für die beiden Standpunkte wurden unterschiedliche Strategien zur Überprüfung der Standsicherheit des jeweiligen Laserscanners eingesetzt.

Der Imager 5006 (LUH) hat während des Versuchs fünf über den Horizont verteilte Zielzeichen (Stabilpunkte) angemessen. Diese Zielzeichen wurden in ausreichender Entfernung zum Gewölbe (6 m bis 16 m) installiert, sodass diese durch die aufgebrachte Last keine signifikante Positionsveränderung erfuhren. Die 3D-Koordinaten der Stabilpunkte wurden vor Versuchsbeginn mit einem Präzisionstachymeter bestimmt. Die punktbasierte Referenzierung der epochenweise erfassten 3D-Punktwolken wurde mit Z+F LaserControl 8.9.0 und dem Modul Scantra 2.0.1.20 (Technet 2017) durchgeführt. Die Länge der 3D-Abweichungsvektoren nach der Referenzierung liegt im Mittel über alle Epochen bei 0,4 mm. Die mittlere Standardabweichung der 3D-Punkte nach der Blockausgleichung (Angabe Scantra 2.0.1.20) lag im Mittel bei 0,2 mm und maximal bei 0,4 mm. Dies zeigt einerseits die Güte der Referenzierung und lässt andererseits den Schluss auf einen stabilen Laserscannerstandpunkt während des Belastungsversuchs V2 zu.

Für den Imager 5006h (TUB) erfolgte eine Referenzierung basierend auf stabilen Arealen unter Nutzung eines ebenen-basierten Ansatzes mit der Software Scantra (Technet 2017). Der Vorteil dieser Methode liegt im Verzicht auf künstliche Zielzeichen in der Szene. [Abb. 3](#) zeigt ein Intensitätsbild der Referenzepoche. Dieses entspricht einer zylindrischen Abwicklung der 3D-Punktwolke um die Stehachse des Laserscanners. Stabile Areale im Bereich der neuen Stahlbrücke wurden manuell für die Registrierung selektiert. Für die Referenzierung von Epoche E66 in das Koordinatensystem der Referenzepoche dienten 870 identische Ebenen (siehe weiße Rechtecke in [Abb. 3](#)). Die Standardabweichung der translatorischen Komponenten betrug ca. 0,1 mm, die der Rotationen ca. 0,34 Milligrad. Dabei zeigten sich Verschiebungen des Laserscanners gegenüber seiner ursprünglichen Position von 3,6 mm in Richtung Gleisachse, 0,9 mm in Richtung des Brückenbogens (quer zur Gleisachse) sowie -0,3 mm in vertikaler Richtung. Räumlich gesehen resultiert hieraus eine

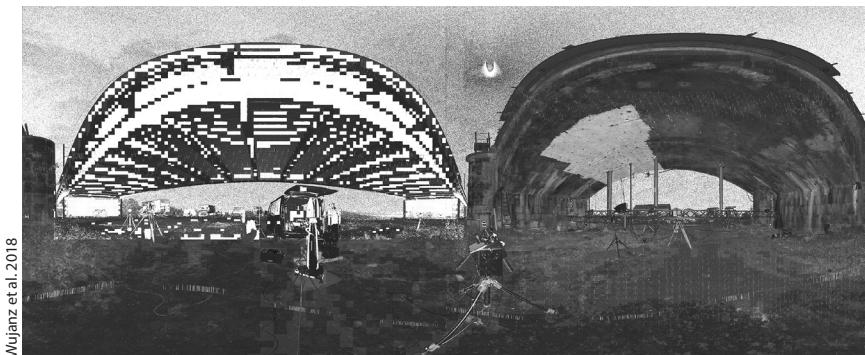


Abb. 3: Intensitätsbild mit den für die Registrierung verwendeten Ebenen

Veränderung von 3,7 mm, die auf Bewegungen der Verpressfähle und des umliegenden Areals zurückzuführen sind.

5 3D-Punktwolke mit stochastischem Modell zur Bewertung aufdeckbarer Deformationen

Neben der Qualität der Referenzierung hat die Präzision der Messwerte einen maßgeblichen Einfluss darauf, ab welcher Größenordnung Deformationen aufgedeckt werden können. Mit Hilfe eines intensitätsbasierten stochastischen Modells nach Wujanz et al. (2017) wurde für jeden Punkt der 3D-Punktwolke die räumliche Präzision σ_{xyz} (Standardabweichung einer 3D-Koordinate, Helmert-scher Punktfehler) berechnet. Abb. 4 zeigt eine Visualisierung der 3D-Punktwolke mit ihren stochastischen Eigenschaften in Genauigkeitsklassen nach Timmen (2016). Auf Grund einer sehr heterogenen Verteilung der radiometrischen Eigenschaften an der Unterseite der Brücke – von geweißen Flächen bis zu dunkeln, nassen oder bemoosten Steinen – resultiert eine ebenso stark variierende Verteilung der 3D-Präzision, die auf die jeweilige empfangene Signalstärke zurückzuführen ist. Kurzum: je schwächer das Signal, desto höher das Messrauschen.

Die Spanne der Standardabweichungen reicht von etwa 0,5 mm bis zu 3,0 mm. Im dunkelgrün eingefärbten, eckig abgegrenzten Bereich wurde zur Vorbereitung einer photogrammetrischen Messung das Mauerwerk weiß eingefärbt. Als Konsequenz daraus hebt sich die Präzision dieser Punkte gegenüber den etwas stärker verrauschten Punkten in der Nachbarschaft ab. Insgesamt ist ein Abfall der Präzision von den oberen zu den unteren Bereichen zu erkennen. Dieser lässt sich durch abflachende Auftreffwinkel begründen, die eine stärkere Verringerung der Intensität zur Folge haben. Alle für den Belastungsversuch

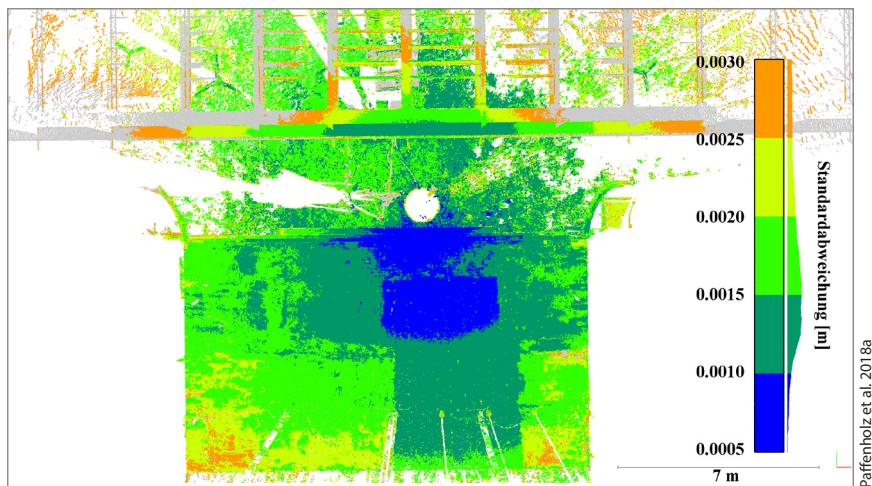


Abb. 4: Blick von oben auf die 3D-Punktwolke eingefärbt nach Standardabweichungen. Der obere Teil zeigt die Stahlkonstruktion der neuen Allerbrücke und der untere Teil zeigt die alte Gewölbebrücke.

wesentlichen Bereiche des Gewölbes fallen in den blauen bis hellgrünen Bereich und repräsentieren somit ein $\sigma_{xyz} \leq 2,4$ mm. Da die Deformationen der Brücke in Folge der Belastungen im oberen Zehnermillimeterbereich zu erwarten sind, kann gefolgert werden, dass sowohl die erreichte Präzision der Registrierung als auch die Präzision der einzelnen Messwerte dazu geeignet ist, die jeweiligen Deformationen statistisch signifikant nachweisen zu können.

6 Ableitung von Deformationen

Die Ableitung der Deformationen erfolgt an dieser Stelle auf Basis der referenzierten 3D-Punktwolken. Es wird der Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2) Algorithmus (Lague et al. 2013) unter Nutzung der Open Source Freeware Cloud Compare (www.danielgm.net/cc) verwendet. Holst et al. (2016) berichten über weitere Möglichkeiten von Punktwolkenvergleichen mit Hilfe von Standardsoftware. Im Folgenden sind die aus den 3D-Punktwolken abgeleiteten Deformationen als 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke Differenzen, kurz M3C2 Differenzen oder auch Inspection Maps bezeichnet. Es ist noch anzumerken, dass für aussagekräftige M3C2 Differenzen eine Bereinigung der 3D-Punktwolken erfolgen sollte. Untersuchungen haben gezeigt, dass in den Brückenbögen eingebaute Objekte, wie u. a. die Installationen der Baumesstechnik in verschiedenen Laststufen ein unterschiedliches Erscheinungsbild zeigen und das

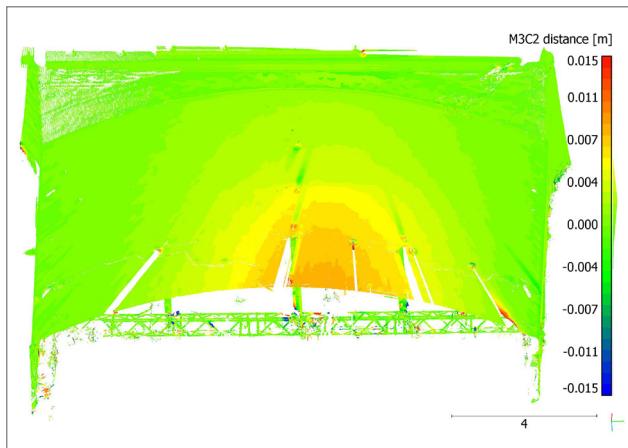


Abb. 5:
3D-Punktwolke-
zu-3D-Punktwolke
Differenzen (M3C2)
zwischen der Refe-
renzepoch E00Rw
und der Epoche
E33Lw in [m]
mit einer aufge-
brachten Last von
ca. 3 MN.

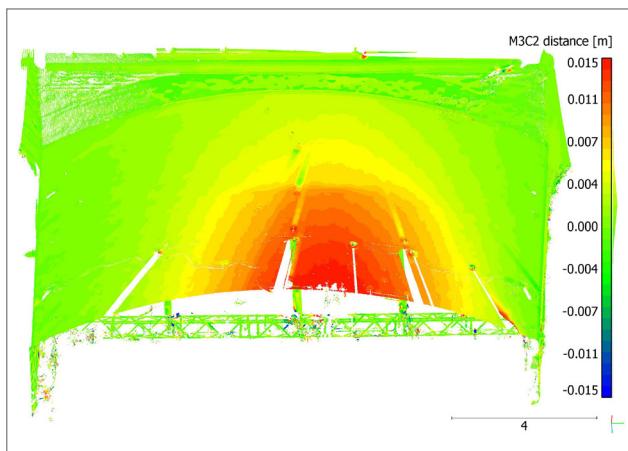


Abb. 6:
3D-Punktwolke-
zu-3D-Punktwolke
Differenzen (M3C2)
zwischen der Refe-
renzepoch E00Rw
und der Epoche
E55Lw in [m]
mit einer aufge-
brachten Last von
ca. 5 MN.

Ergebnis der Differenzbildung verfälschen; für Details wird auf Paffenholz et al. (2018a) verwiesen.

Abb. 5 und Abb. 6 zeigen die M3C2 Differenzen für die Epochen E33Lw und E55Lw mit einer aufgebrachten Last von ca. 3 MN und 5 MN in einer 32-fach abgestuften Farbskala von ± 15 mm. Diese Daten wurden mit dem Imager 5006 (LUH) erfasst. Als maximale Deformation tritt in E33Lw ein Wert von 9 mm und in E55Lw von 14 mm in unmittelbarer Umgebung der Gewindestangen der Lasteinleitung im Bereich des Scheitels des Gewölbes auf. Deutlich sichtbar ist die Abnahme der jeweiligen Deformation in Richtung der Brückenpfeiler sowie in Richtung Osten (Osten = oben in Abb. 5 bis Abb. 7) zum unbelasteten Teil des Tragwerks.

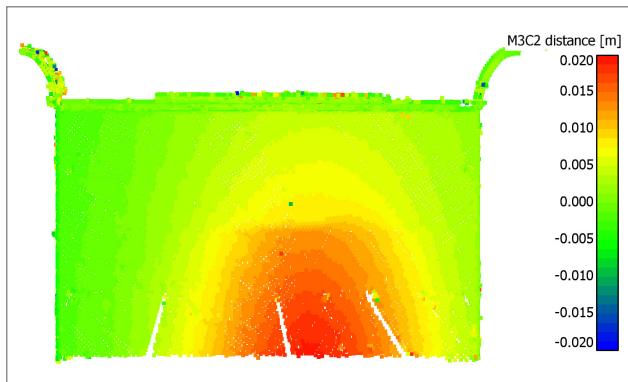


Abb. 7:
3D-Punktwolke-
zu-3D-Punktwolke
Differenzen (M3C2)
zwischen der Refe-
renzepoch E00Rw
und der Epoche
E66Lw in [m]
mit einer aufge-
brachten Last von
ca. 6 MN.

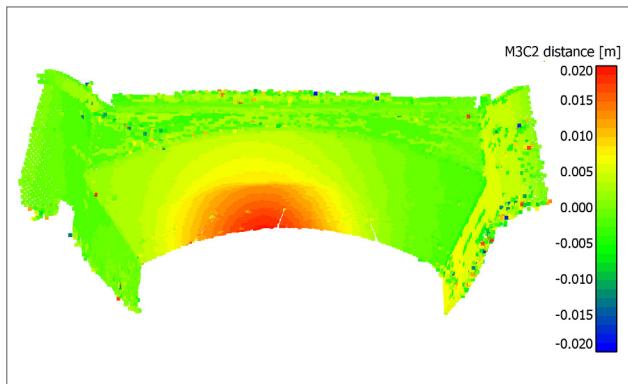


Abb. 8:
3D-Punktwolke-
zu-3D-Punktwolke
Differenzen (M3C2)
zwischen der Refe-
renzepoch E00Rw
und der Epoche
E66Lw in [m].
Perspektivische
Ansicht vom Laser-
scannerstandpunkt.

Abb. 7 und **Abb. 8** zeigen für Epoche E66Lw die M3C2 Differenzen in einer 32-fach abgestuften Farbskala in 0,5 mm Schritten in einem Bereich von ± 20 mm. Die 3D-Punktwolke wurde mit dem Imager 5006h (TUB) erfasst. Die Ergebnisse sind durch die gleiche asymmetrische Verteilung der Deformationen auf Grund der einseitigen Lasteinleitung charakterisiert, wie die zuvor gezeigten Ergebnisse des Imager 5006 (LUH). Für die maximale Belastung von ca. 6 MN resultiert eine maximale Deformation von 19 mm in unmittelbarer Umgebung der Gewindestangen der Lasteinleitung im Bereich des Scheitels des Gewölbes. In **Abb. 8** sind die M3C2 Differenzen respektive Inspection Maps in perspektivischer Ansicht aus dem Blickwinkel des Laserscannerstandpunktes gezeigt. Es wird deutlich, dass nicht nur geometrische Veränderungen im Brückenbogen aufgetreten sind, sondern auch an den Brückenpfeilern und zwar in Richtung der Gleisachse. Interessanterweise ist hier ebenfalls eine asymmetrische Verteilung der Deformationen zu erkennen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag themisierte die Nutzung von 3D-Punktwolken zum Monitoring von Infrastrukturbauwerken am Beispiel einer historischen Gewölbebrücke bei Verden (Aller). Das stufenweise Belastungsregime reichte von 1 MN bis 6 MN, wobei die höchste Laststufe der sechsfachen maximalen Verkehrslast des Bauwerks entspricht. Zur Erfassung der statischen Haltephasen wurden 3D-Laserscanner zum Monitoring der Deformation der Brücke in Folge des Lasteintrags eingesetzt. Um Verfälschungen der zu berechnenden Deformationen ausschließen zu können, wurde zum einen eine Referenzierung über diskrete, signalisierte Stabilpunkte und zum anderen eine ebenen-basierte Referenzierung basierend auf stabilen Objektbereichen durchgeführt.

Die aus 3D-Punktwolken-zu-3D-Punktwolken Differenzen (M3C2) abgeleiteten Deformationen zweier Laserscanner zeigen für aufeinander folgende Laststufen vergleichbare, räumliche Verteilungen der Deformationen mit maximalen Werten von bis zu 19 mm bei einer Belastung von 6 MN. Paffenholz et al. (2018a) zeigen Vergleiche mit 1D-Vertikalverformungen der Baumesstechnik, bei denen maximale Abweichungen von 1 mm zwischen der 3D-Punktwolken-basierten Deformation und der taktilen Messungen auftreten. Weiterhin zeigen Paffenholz et al. (2018a) und Wujanz et al. (2018) Vergleiche mit den weiteren aus der Geodäsie eingesetzten Sensoren (Lasertracker und Profillaserscanner). Diese Vergleiche zeigen eine Übereinstimmung der Deformationen für den Bogen der Gewölbebrücke im Bereich weniger Zehntelmillimeter.

Abschließend lässt sich festhalten, dass der Belastungsversuch das große Potenzial des 3D-Punktwolken-basierten Monitorings von Infrastrukturbauwerken mittels berührungslosem Laserscanning aufgezeigt hat.

Zukünftige Aufgaben in dem jungen Forschungsfeld der 3D-Punktwolken-basierten Deformationsanalyse sind u. a. die automatische Detektion von stabilen Ebenen als Grundlage für eine Referenzierung von 3D-Punktwolken sowie methodische Entwicklungen zur statistisch begründeten Bewertung von vorliegenden Deformationen unter Einbezug der stochastischen Eigenschaften der zugrundliegenden Messdaten.

Literatur

Burger, M.; Neitzel, F.; Lichtenberger, R. (2017): Einsatzpotential der digitalen Bildkorrelation zur Bauwerksüberwachung. In: Lienhart, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung '17. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, S. 185–200.

Burger, M.; Wujanz, D.; Lichtenberger, R.; Neitzel, F. (2018): Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Optische korrelationsbasierte Messtechnik zur Verformungsmessung. In: Jäger, W., Ed.: Mauerwerk-Kalender 2018. Ernst & Sohn, Berlin (in Vorbereitung).

Eling, D. (2009): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung. Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, Nr. 641, München.

Haupt, M.; Paffenholz, J.-A. (2016): 3D-Punktwolkenbasiertes Monitoring aus Sicht eines Ingenieurbüros – Chancen und Herausforderungen. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016). DVW-Schriftenreihe, Band 85, Augsburg, S. 75–87.

Holst, C.; Kuhlmann, H. (2016): Challenges and Present Fields of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses. In: *Journal of Applied Geodesy* 10 (1), S. 17–25. DOI: [10.1515/jag-2015-0025](https://doi.org/10.1515/jag-2015-0025).

Holst, C.; Nothnagel, A.; Blome, M.; Becker, P.; Eichborn, M.; Kuhlmann, H. (2015): Improved area-based deformation analysis of a radio telescope's main reflector based on terrestrial laser scanning. In: *Journal of Applied Geodesy* 9 (1), S. 1–14. DOI: [10.1515/jag-2014-0018](https://doi.org/10.1515/jag-2014-0018).

Holst, C.; Schmitz, B.; Kuhlmann, H. (2016): TLS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von Standardsoftware. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016). DVW-Schriftenreihe, Band 85, Augsburg, S. 39–58.

Kutterer, H.; Paffenholz, J.-A.; Vennegeerts, H. (2009): Kinematisches terrestrisches Laserscanning. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 2/2009, 134. Jg., S. 79–87.

Lague, D.; Brodu, N.; Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner. Application to the Rangitikei canyon (N-Z). In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82, S. 10–26. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009).

Liebig, J. P.; Grünberg, J.; Paffenholz, J.-A.; Vennegeerts, H. (2011): Taktile und laserbasierte Messverfahren für die messtechnische Überwachung einer Autobahnbrücke. In: *Bautechnik* 88 (11), S. 749–756. DOI: [10.1002/bate.201101514](https://doi.org/10.1002/bate.201101514).

Ohlmann-Bartusel, J. (2009): Bestimmung flächenhafter Deformationen einer ausgebrochenen Tunnellaibung mit multitemporalen Laserscanning-Daten. In: Luhmann, T.; Müller, Ch. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009*. Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 110–117.

Paffenholz, J.-A.; Huge, J.; Stenz, U. (2018a): Integration von Lasertracking und Laserscanning zur optimalen Bestimmung von lastinduzierten Gewölbeverformungen. In: *allgemeine vermessungs-nachrichten (avn)*, (akzeptiert zur Veröffentlichung).

Paffenholz, J.-A.; Stenz, U. (2017): Integration von Lasertracking und Laserscanning zur optimalen Bestimmung von last-induzierten Gewölbeverformungen. In: Lienhart, W. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung '17. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, S. 373–388.

Paffenholz, J.-A.; Stenz, U.; Neumann, I.; Dikhoff, I.; Riedel, B. (2018): Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Lasertracking und GBSAR zur Verformungsmessung. In: Jäger, W., Ed.: *Mauerwerk-Kalender 2018*. Ernst & Sohn, Berlin (in Vorbereitung).

Schacht, G.; Piehler, J.; Marx, S.; Müller, J. Z. (2016): Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke. In: *Bautechnik* 94 (2), S. 125–130. DOI: [10.1002/bate.201600084](https://doi.org/10.1002/bate.201600084).

Soudarissanane, S.; Lindenbergh, R.; Menenti, M.; Teunissen, P.J.G. (2011): Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66 (4), S. 389–399. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005).

Technet (2017): Scantra – Hochgenaue Scanregistrierung ohne Targets. <http://technet-gmbh.de/index.php?id=1051>, letzter Zugriff 11/2017.

Timmen, A. (2016): Definition und Ableitung eines Qualitätsindexes zur Visualisierung der Qualitätsparameter von 3D-Punktwolken in einer virtuellen Umgebung. Masterarbeit (unveröffentlicht). Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut.

Wujanz, D.; Burger, M.; Mettenleiter, M.; Neitzel, F. (2017): An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 125, S. 146–155. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2016.12.006](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.12.006).

Wujanz, D.; Burger, M.; Neitzel, F.; Lichtenberger, R.; Schill, F.; Eichhorn, A.; Stenz, U.; Neumann, I.; Paffenholz, J.-A. (2018): Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Terrestrisches Laserscanning zur Verformungsmessung. In: Jäger, W., Ed.: Mauerwerk-Kalender 2018. Ernst & Sohn, Berlin (in Vorbereitung).

Wunderlich, T. A.; Niemeier, W.; Wujanz, D.; Holst, C.; Neitzel, F.; Kuhlmann, H. (2016): Areal deformation analysis from TLS point clouds – the challenge. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 123 (11-12), S. 340–351.

Zoller & Fröhlich (2017): Datenblatt Z+F IMAGER 5006h, letzter Zugriff 05/2017.

Kontakt

Jens-André Paffenholz | Ulrich Stenz | Ingo Neumann
Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut
Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
paffenholz@gih.uni-hannover.de

Daniel Wujanz | Frank Neitzel
TU Berlin, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik
Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin
daniel.wujanz@tu-berlin.de

Session 4: Projekte und Zukunftsfelder

New Workflows for the TLS Documentation of Cultural Heritage Sites on the Example of Worldwide Projects

Christoph Held | Christoph Fröhlich | Markus Mettenleiter | Douglas Pritchard |
Heinz Rüther | Christopher Wickenden

1 Introduction

Over past two decades, terrestrial laser scanning (TLS) has matured to a fundamental tool for the 3D documentation of cultural heritage. World-wide, this technology is used for a rapid assessment and precise, objective record of the current physical state of an object. Especially the catastrophic consequences of political and religious conflicts and wars, as for example in Syria, cultural terrorism, vandalism, art theft, natural disasters, as well as the threads of global warming, show the danger for the heritage of mankind and thus the need for holistic documentation.

As a manufacturer of laser scanning hardware and software, Zoller+Fröhlich GmbH (Z+F) has always looked at new methods to improve and speed-up the on-site workflow and to test the current hardware in harsh environments, to learn from the challenges the users are experiencing.

In the following paper, the authors report on the main challenges observed and discuss advancements in TLS software and hardware on the example of two exceptional projects, the documentation of the Sula-Mani temple in Bagan, Myanmar by the Zamani Project of the University of Cape Town, and the documentation of the cathedral of Cologne by the Herriot Watt University, Edinburgh and the Fresenius Hochschule, Cologne. Z+F joined and supported these projects on their field trips and gained useful insights on the current needs on site. The experience helped the further development of new workflows and tools for the documentation in the field.

2 Challenges

2.1 Registration

Typically survey targets are seen as reliable and highly accurate registration methods. Regarding documenting cultural heritage, the use of targets can be problematic for several reasons.

Cultural heritage sites are typically delicate and mounted targets, specifically the glue or tape, can cause permanent damage. Metal targets or spheres are an alternative, but they are bulky and can add extra weight to the overall equipment. The moving and repositioning of the targets can add extra time to the project. And if targets are used for geo-referencing or scaling, then the survey required for their positioning can be complex and time consuming.

Targets also cannot be used in a flexible way. As each scan needs to share at least three, ideally four to five visually connected targets, a detailed scan position and target planning step at the beginning of the project is mandatory. One cannot simply add further unplanned scan setups, unless enough targets can be seen from that position point. Hence the scan positions have to be chosen for easy registration, but not for optimal surface coverage. One could simply layout as many targets as possible, but the more targets are placed the more need to be “cleaned out” during the data processing stage.

To provide the highest dimensional accuracies in a documentation project, targets should be ideally placed at far distances. This requires scanning either at an adequate, much higher resolution, or adding multiple subscans, one per target. Both techniques will add extra time to each setup position and therefore to the entire field exercise.

In addition, targets are not fail-proof. Targets may be scanned at an insufficient resolution, or at an oblique angle. At sites with numerous tourists, targets may be obscured or slightly moved without anyone noticing. If there are no redundant targets, it will be difficult to register scans. This may only be realised back at the office, which can be fatal to the project as another field exercise might not be possible.

An alternative is to use cloud only based alignment. The Iterative Closest Point algorithm (Besl and McKay 1992, Chen and Medioni 1992), also referred to as cloud-to-cloud algorithm, searches for nearest point positions between scans and minimizes the distances in an iterative process. The algorithm usually finds a local minimum, but it is not bound to find the global one, i. e. it will often present a solution but it is not necessarily the correct one. The reliability of the result largely depends on the initial alignment of the scans before the algorithm is started. If the scans are already closely positioned and oriented to each other, the algorithm usually establishes a dimensionally reliable result.

The difficulty in this method is to establish the initial alignment. Several algorithms were proposed over the years (e.g. Aiger et al. 2008, Allen et al. 2003, Gelfand et al. 2005, Johnson and Hebert 1997), however, they can be computationally intensive or can be only effective in special environments or with small datasets. Technet GmbH developed an algorithm which can detect planes which can then be used to establish the initial alignment as well as an accurate and reliable registration. As an example, during the documentation of Petra, Jordan, by the Zamani Project it was shown that this method was effective even in cases, where no highly planar surfaces were present.

Most critical with the target-less method is the overlap which the scans need to share for accurate alignment. As a rule, the overlap should at least be 30 to 50 % between scans. In addition, the more complex a site is, the easier it is, even for an experienced operator to lose track of the amount of overlap required. Hence, out of fear of registration issues back home, users tend to scan more than is actually necessary.

To address this issue, Z+F designed and developed the “Blue Workflow” operation method (Held et al. 2016), allowing target-less registration directly on site. It is a two-step solution with further hardware sensors and additional software, running in parallel on a tablet.

The combination of the hardware sensors, consisting of a GNSS sensor, compass, barometer and an IMU, results in a Scan Positioning system, which tracks

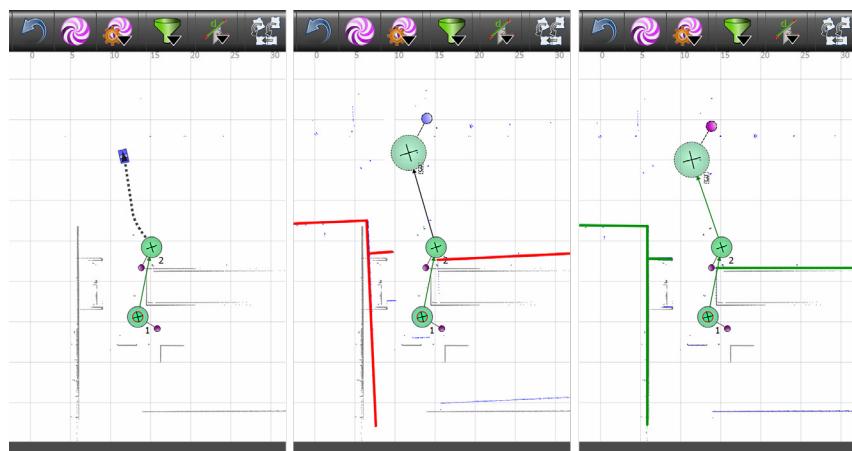


Fig. 1: Registration with the Blue Workflow. Left: The movements of the scanner are tracked while carrying it to the next position via the additional internal sensors. Centre: After the scan is completed, it is inserted into the project at the estimated location and visualized with an outline of the recorded scene. Right: The software Scout registers the scan to the previous data automatically.

the movements of the instrument (with respect to the previous setup location) while carrying or pushing the scanner to the next scan position. This process allows the system to estimate its current position and orientation. Due to the IMU, it will work outdoors and indoors, where no GNSS information is available.

This information serves as the initial alignment for a cloud-to-cloud based algorithm inside the software “Z+F LaserControl Scout Premium”, running parallel to the scanning on a tablet. Once a scan is finished, it is automatically downloaded from the scanner via Wi-Fi and registered on the fly. The operator then receives feedback if the overlap is adequate and if the overall registration was successful (Fig. 1). Hence the user can work on a minimum number of scans without risking inadequate coverage or potential registration problems. If necessary, targets can also be integrated. The tablet solution allows parallel processing, so the user can efficiently use the waiting time until the completion of the next scan. The algorithm may not automatically register every scan due to limited overlap, symmetry or bad sensor readings, but the solution is equipped with a set of tools to quickly adjust for these and other typical issues, which can arise in the field. By the end of the site documentation process, the software allows the user to inspect and confirm that the registration is effective and complete.

2.2 Increases of dataset sizes

When documenting a cultural heritage site, every data point can be important. As opposed to industrial applications, where scanned clouds are typically replaced by best-fit primitives, such as cylinders, cubes and planes, cultural heritage sites can have irregular surfaces and non planar walls. Rock art caves, ruins of old buildings, highly decorated temples, churches or mosques are not simplistic enough to be represented with geometric primitives. With cultural heritage, it is important to scan as much surface area as possible to avoid sections with no data. In certain situations, it may be better to scan at a lower resolution but from more positions, especially as the point density will anyways increase if there is considerable overlap. This approach will increase the complexity for the registration, especially if scanning in a sequence is not always possible. In this case, consequent field notes are mandatory. Every site will have its own unique challenges, but typical documentation problems include restricted connections between interior spaces or difficulties connecting floor levels. This kind of issues can confuse any automatic algorithm and to manually adjust the registration at the office can be really time consuming, especially when looking at a collection of several hundreds of scans.

As demonstrated during the Cologne Cathedral Project, it was advantageous to access the data immediately after the scan was completed, confirming sufficient coverage. This was particularly helpful when the scanner was placed in

difficult positions, where it was necessary to validate quality before moving to the next location. Viewing the acquired data on the scanner's display screen can be helpful, but in many cases, a closer interrogation of the actual 3D data is more informative.

The Z+F LaserControl software is designed to work on a scan-by-scan basis where the individual scans are only read if necessary for processing or analysis. The software solution is very scalable, with a marginal increase of memory. This allows large projects with hundreds of scans or more to be loaded and processed on a tablet computer.

If necessary, the operator can access any scan on the tablet in a 2D panoramic mode or examine it in 3D. As it is a wireless solution, if necessary, the user can check the data remotely from a safe location to confirm quality.

2.3 Data fusion of different sensors

Even though a spherical, full-dome scanner can acquire large sceneries with a single shot, it might be helpful to fill in small gaps and niches with a handheld scanning device, such as products from DotProduct, Mantis or Artec. When working with these devices in the field it is critical to know that there is enough data to overlap with the panoramic scans and that all missing areas got covered.

“Z+F LaserControl Scout” has the ability to import and process data from other sensor systems. For the DotProduct devices, a special workflow has been implemented, where the handheld scanner can communicate with the Z+F



Fig. 2: The Z+F scanner can communicate directly with handheld devices, here DotProduct. The Z+F device serves as a data hub and syncs the data to the tablet running Z+F LaserControl Scout, where the scan gets registered.

devices directly, to upload its scan – once completed – to the IMAGER system. The IMAGER automatically synchronizes the data with Scout on the tablet, where it is merged with existing panoramic scans. This wireless workflow allows the direct fill-in of missing areas with handheld devices while waiting on the next panoramic scan to finish (Fig. 2).

2.4 Camera

Accurate geometry is fundamental, but with many cultural heritage sites, having associated imagery is also advantageous. The combined dimensional and image data can be used for surface analysis of a material and provide a better assessment of its current state. Also, as virtual reality or mixed reality is becoming more popular, full colour is required for a realistic immersion.



Fig. 3: Panoramic image taken with a Z+F IMAGER 5010C (left) and the according 3D scan (right), taken without HDR (above), with HDR (below) at Elmina Castle, Ghana, Zamani Project

High Dynamic Range (HDR) photography, the ratio of light to dark in an image, is a standard technique for panoramic photography. Especially outside, in areas with direct sunlight, it is not possible with standard photography to find a single exposure which suits all areas in an image. There will often be parts left overexposed or underexposed. Instead of just one image at one exposure, HDR merges a set of different images at different exposures into a single image (Fig. 3).

Colour scanning in dark environments is a particular challenge. With many cultural heritage documentation projects, closure of a site may be impractical and the site may be crowded by tourists during the day and scanning during late afternoons or night time may be the only option. Even if portable light sources

are available, they may be captured in the scan data and removing them and their cabling from the data later is a time-intensive task. In addition, spotlights can cast shadows onto objects and the light configuration may change drastically from one position to another.

In 2012, Z+F implemented an HDR camera system into their IMAGER 5010C series and onwards (Fröhlich et al. 2015). The camera is able to take up to eleven exposures to cope even with scenes of very high contrast. In addition, an LED spotlight system, the Z+F SmartLight was designed as an optional accessory to be mounted on the scanner to illuminate dark sceneries up to 10 m distance. As the light is cast directly off the scanner, there are no additional shadows visible on the images. Recently, the SmartLight has been integrated into the latest model, the Z+F IMAGER 5016.

2.5 Thermal

Often thermal cameras are being employed to gain an additional layer of information for the analysis of the object for conservation purposes. According to Young (2015), thermal imagery can be used to identify cracks, thermal bridges, problems with insulations, damp areas, electrical faults or to locate voids. Sometimes the system helps to detect hidden elements and their location inside a wall. Despite the advantages of this technique, combining 2D thermal images and 3D point cloud data is not a simple task. To map colour images onto point cloud data, a number of common feature points need to be identified. Registration can be a challenge, as the resolution of infrared cameras is usually lower compared to scan data. In addition, while little features, such as posters or decorations on the wall might be good features in RGB images, they might have the same temperatures and thus are not distinguishable in thermal images.

To take this work off the user, Z+F designed an optional thermal camera to be mounted on top of the scanner. The calibrated, motorized system acquires multiple infrared images to cover the same view as the scanner. The thermal information is then accurately and automatically mapped to the 3D scan data (Fig. 4).

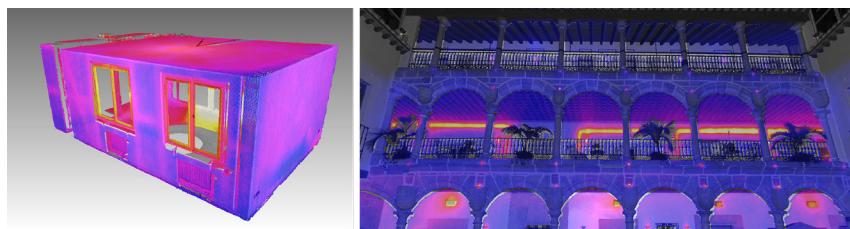


Fig. 4: A 3D Scan overlaid with data of the Z+F T-Cam visualizes hidden wooden beams inside a wall (left) and electrical installations inside a historic hotel building (right).

3 Examples

Those developments were employed successfully at various projects. The authors would like to highlight a few of them:

3.1 3DOM – 3D Documentation of Cologne Cathedral

The UNESCO World heritage site of Cologne Cathedral is one of the most remarkable and tallest religious buildings in the world. Built over several centuries, the facades of the 157 m tall High-Gothic cathedral are covered with detailed



Fig. 5: Point Cloud rendering of the main entrance to the cathedral of Cologne

sculptures and decorations from various periods. The amount of detail does not decrease at higher levels, which makes its complete documentation complex.

In 2015, Douglas Pritchard of Heriot Watt University (at the time), Edinburgh and Prof. Christopher Wickenden of Fresenius Hochschule Cologne initiated the project 3DOM to laserscan the cathedral. The project was executed in three phases in cooperation with the Metropolitankapitel der Hohen Domkirche Köln, Dombauhütte (Pritchard et al. 2017). Approximately 680 scans were collected during the project with two types of instruments, a Z+F IMAGER 5010C and 5010X. Due to the exceptional dimensions of the interior and exterior spaces, as well as the considerable building detail even at long distances, the cathedral was typically scanned at higher resolution, i.e. 3 mm at 10 m, resulting in 160 million points per scan (Fig. 5).

At the outset of the project, it was decided to not use targets. In this situation, cloud-to-cloud was preferable as it enabled a quicker site setup, avoided the issue

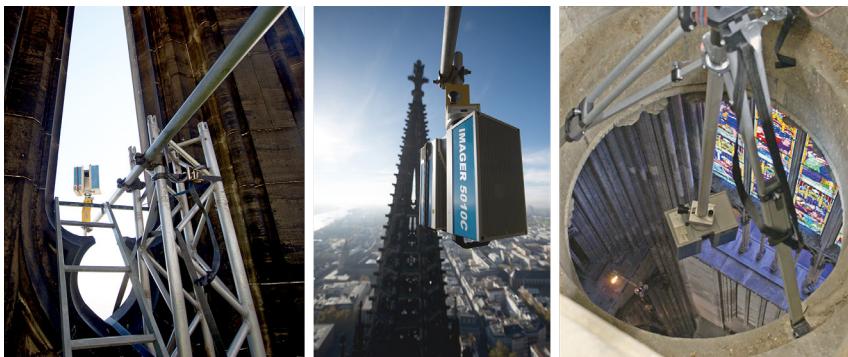


Fig. 6: Moveable extension rig at North tower, Cologne cathedral, to scan tower tips above (left) and below (centre). Inverted setup over keystone opening (right)

of fixing targets onto a large heritage structure, and having to address the problem of people obscuring or remove targets. The scans taken with the IMAGER 5010X were registered on-the-fly in parallel to the actual scanning.

Even though the internal HDR camera system of the used instruments could cope well with the low light conditions inside the cathedral, several spots were still too dark. For these cases the Z+F SmartLight was mounted onto the scanner to brighten up the scene (Fig. 10), which helped to illuminate dark corners.

Because of the large volumes within the cathedral and the fine decorations even at high elevations, the scanner was setup at very unusual vantage points as well. In one situation, the scanner was inverted on a special tripod and lowered from the loft-level workshop through one of the keystones into the main cathedral interior (Fig. 6). Secondly, Prof. Pritchard designed a special mechanical, rigid extension arm to allow the scanner to be pushed outward from the top platforms of the towers at 150 m height. The scanner was recording data upright and then upside-down from these remarkable vantage points to get all details even of the tip of the towers (Fig. 6). In all these situations, the scanner was operated safely and remotely via Wi-Fi with the data being checked in real-time.

3.2 Zamani Project

The Zamani Project of the University of Cape Town, South Africa aims at documenting cultural heritage in Africa, spatially and holistically. Since the foundation in 2004, the not-for-profit project under the lead of Prof. Heinz Rüther has documented more than 60 sites in 15 African countries and continues the work today even beyond the borders of the continent to record these sites for conservation and restoration interventions, general research and as a record for future generations.

Among these remarkable projects are several UNESCO World Heritage Sites, such as the rock-hewn churches of Lalibela, Ethiopia, the forts of the slave trade route along the African coastline and the ancient rock city of Petra, Jordan. To document a site holistically, terrestrial laser scanning, photogrammetry, remote sensing and other conventional survey technologies are employed and combined with 360° photography, videos and normal photos. For each site, the project creates accurate 3D models, which are used as well to derive accurate plans and maps. All collected information is combined and managed with a GIS (Rüther et al. 2012).

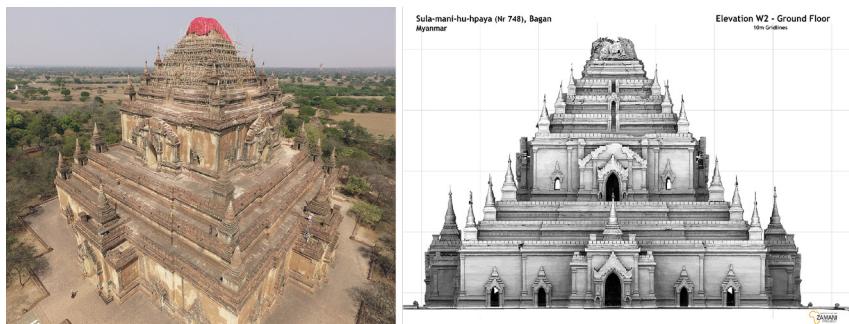


Fig. 7: The Sula-Mani temple at Bagan, Myanmar (left), and an elevation derived from the model resulting of the laserscan data (right)

In March 2017, the project documented the Sula-Mani temple in Bagan, Myanmar (Fig. 7). More than 800 years old, the 45 m high building is one of the largest of about 2,800 temples and pagodas in a 10 by 10 km area in Bagan. In 2016, the temple was seriously damaged during an earthquake, which caused the tip of the temple to collapse. Since then, the tip has been secured provisionally with a plastic cover against further erosion. For the documentation a Z+F IMAGER 5010X and a 5010C were used to scan the entire structure with 500 scans in one week. The Zamani project avoids the use of any targets on heritage sites and works with post-processing ICP based registration methods. For geo-referencing and control, several points were surveyed by the means of an RTK-GNSS.

For this project, the blue workflow of Z+F was employed. All scans taken with the 5010X were registered on the fly. During the evenings, the scans of the 5010C, which is not equipped with the sensors for the scan positioning system, were registered into the point cloud generated from the 5010X in a semi-automatic process. The goal for the scanning team was to leave the site confident that all visible surfaces of the monument had been scanned and that a complete point cloud and model could be generated from the acquired scan data.

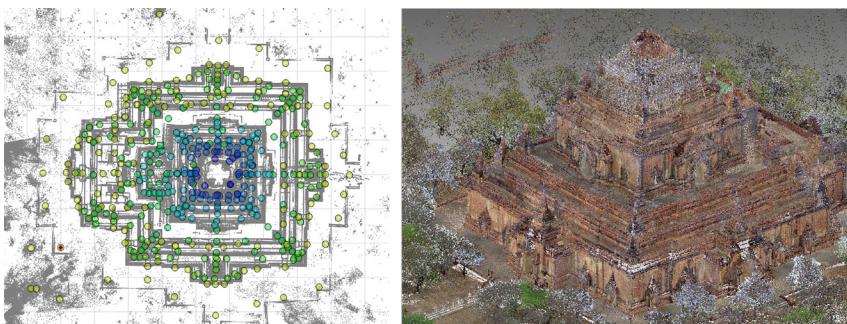


Fig. 8: Left: Scanned positions at Sula-Mani temple, Bagan. Right: view of the sampled point cloud data

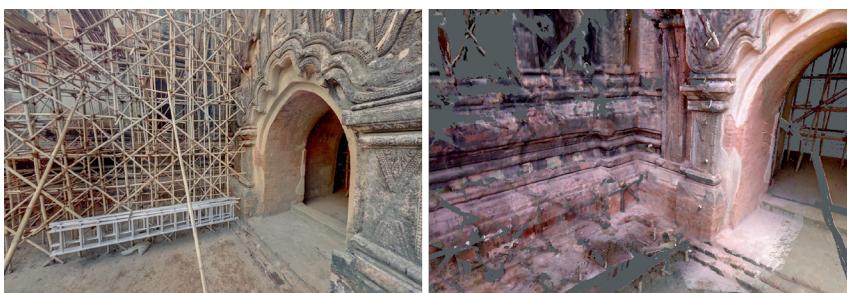


Fig. 9: Left: Colour image of the bamboo scaffolding taken with the Z+F scanner. Right: Filled-in data with the DPI-8-handheld scanner

The ability to check scanned data on site proved to be of significant advantage, as it was unusually difficult to keep track of the progress of the scanning operation, as the square building was constructed with seven levels of terraces, which are in near perfect symmetry in geometry and detail and thus difficult to distinguish. Having two teams scanning in parallel complicated the situation and especially scans linking the different levels were difficult to manage. In this situation, the registered view of the project on the tablet served also as an electronic field-book and the operators could check if all areas were documented sufficiently (Fig. 8).

A special challenge was the bamboo scaffolding around the damaged areas which was setup close to the wall and obscuring the view of the scanner. The Z+F instruments have a very short minimum distance of only 30 cm and also a large vertical field of view of 320 degrees and could thus be placed quite close to the wall or on elevated spots. However, in some cases, a DotProduct DPI-8 handheld scanner had to be used to scan behind scaffolding or in other, difficult to access areas. Due to the direct communication capabilities of the device with

the Z+F instruments, the data of the two sensors could be merged directly on site (Fig. 9).

4 Conclusions

The advantages of the developed system for cultural heritage sites are evident, however, these advancements did not come overnight. Several years of research, development and field use, refined the hardware and software, enabling the

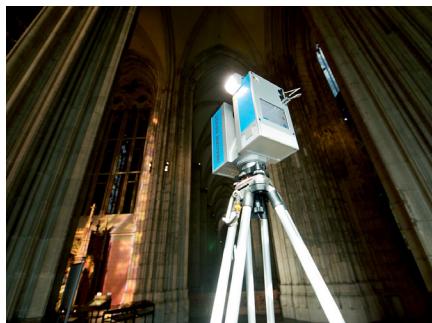


Fig. 10: Left: The Z+F IMAGER® 5010C with the Z+F SmartLight mounted on top.
Right: The Z+F IMAGER® 5016 with integrated LED spotlights around the camera

system to be highly versatile and as effective. This technical evolution has been incorporated into the development of the latest instrument, the Z+F IMAGER 5016: in addition to an extended range of 365 m, the 5016 comes with the scan positioning system and real-time registration capabilities of the Blue Workflow, an integrated HDR camera with built-in LED spotlights (Fig. 10). For easier transport and handling, the scanner was reduced by 30 % in weight and size and received a second handle at the bottom of the instrument.

References

Aiger, D.; Mitra, N.; Cohen-Or, D. (2008): 4-points congruent sets for robust surface registration. *ACM Transactions on Graphics*.

Allen, P. K.; Troccoli, A.; Smith, B.; Murray, S.; Stamos, I.; Leordeanu, M. (2003): *IEEE Computer Graphics and Applications*, 23(6):32.

Besl, P. J.; McKay, N. D. (1992): A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 14:239.

Chen, Y.; Medioni, G. (1992): Object modelling by registration of multiple range images. *Image Vision Comput.*, 10(3):145.

Fröhlich, C.; Mettenleiter, M.; Held, C.; Blersch, D.; Kurz, S. (2015): Umgebungsvermessung anhand von 3D Geometrie mit HDR Farbe und Wärmebilddaten. *at – Automatisierungstechnik*, 2015, Vol. 63(4), De Gruyter Oldenburg, pp. 279–285.

Gelfand, N.; Mitra, N.; Guibas, L.; Pottmann, H. (2005): Robust global registration. In: *SGP '05: Proceedings of the third Eurographics symposium on Geometry processing*, Aire-la-Ville, Switzerland, p. 197.

Held, C.; Blersch, D.; Mettenleiter, M.; Fröhlich, C. (2016): Der neue „Blue Workflow“ von Zoller+Fröhlich – Z+F IMAGER® 5010X und Z+F LaserControl Scout. In: *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik 2016*, ISBN 978-3-87907-604-8, pp. 84–94.

Johnson, A. E.; Hebert, M. (1997): Surface registration by matching oriented points. In: *NRC '97: Proceedings of the International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, Washington, DC, USA, IEEEComputer Society, S. 121.

Pritchard, D.; Sperner, J.; Hoepner, S.; Tenschert, R.; Wickenden, C. (2017): Terrestrial laser scanning for heritage conservation: the Cologne Cathedral documentation project. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume IV-2/W2, 2017 26th International CIPA Symposium 2017, 28 August – 01 September 2017, Ottawa, Canada.

Rüther, H.; Held, C.; Schröder R.; Bhurtha, R.; Wessels, S. (2012): From Point Cloud to Textured Model, the Zamani Laser Scanning Pipeline in Heritage Documentation. In: *South African Journal of Geomatics*, Vol. 1, No. 1, 2012.

Young, M. (2015): Thermal imaging in the historic environment. First edition, Historic Environment Scotland, p. 19.

Kontakt

Christoph Held | Markus Mettenleiter | Christoph Fröhlich
Zoller + Fröhlich GmbH
Simoniustraße 22, 88239 Wangen im Allgäu
c.held@zofre.de | m.mettenleiter@zofre.de | cf@zofre.de

Douglas Pritchard
Honorary Research Fellow, Humanities Advanced Technology and Information Institute (HATII), School of Humanities, University of Glasgow
Glasgow, G12 8QJ, Scotland
dpritch5@jhu.edu

Heinz Rüther
Zamani Project
University of Cape Town, Division of Geomatics
Private Bag, Rondebosch 7701, South Africa
heinz.ruther@zamaniproject.org

Christopher Wickenden
Media School – Hochschule Fresenius in Köln, 3D-Design & Management
Im MediaPark 4c, 50670 Köln
christopher.wickenden@hs-fresenius.de

Vollautomatischer Ansatz für die Onboard-Datenregistrierung im terrestrischen Laserscanning

Andreas Ullrich | Christoph Fürst

1 Einleitung

Der Umfang von Projekten, die mit terrestrischen Laserscannern durchgeführt werden, wächst mit der fortschreitenden Steigerung der Messgeschwindigkeit der Laserscanner kontinuierlich, sowohl im Hinblick auf die Größe der einzelnen Punktwolken als auch im Hinblick auf die Anzahl der Scanpositionen in diesen Projekten. Gerade die große Anzahl von Scanpositionen erhöht die Bedeutung effizienter Registrierungsmethoden. In der Vergangenheit standen Registrierungsmethoden mit signalisierten Punkten im Vordergrund. Das Anbringen der Signalpunkte im Bereich der Datenaufnahme verursacht jedoch zusätzlichen Zeitaufwand und verändert zudem die zu erfassenden Objekte selbst.

Während die Verwendung von signalisierten Punkten nach wie vor eine entscheidende Rolle bei der Sicherstellung einer hohen absoluten Genauigkeit bei der Georeferenzierung des Gesamtdatensatzes spielt, gibt es für die relative Registrierung mehrerer Scanpositionen zueinander nunmehr automatisierte und damit effizientere Methoden. Einige dieser automatisierten Methoden beruhen auf der Suche nach 3D-Features und wenden in der Folge eine der Photogrammetrie ähnliche Feature-Matching-Methode an. In manchen Umgebungen wie Wäldern oder Höhlen sind jedoch kaum ausgeprägte 3D-Features zu finden und die automatisierte Registrierung wird unzuverlässig.

Andere Methoden basieren auf ICP (Iterative Closest Point)-Algorithmen, die Punktabstände in Überlappungsbereichen der Datensätze minimieren. Die erfolgreiche Anwendung dieser Methode erfordert aber eine hinreichend genaue *a priori* Ausrichtung für eine zuverlässige Konvergenz.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Methode erfordert bloß eine hinreichende Redundanz der Datensätze durch hinreichende Überlappung der erfassten Teildatensätze, ohne spezielle Anforderungen an ausgeprägte Features und mit sehr stark entspannten Anforderungen bezüglich einer *a priori* Ausrichtung. Neben der reinen Geometrie der Datensätze nutzt die vorgestellte Methode auch ausgiebig die kalibrierten Messwerte des Reflexionsgrades der erfassten Objekte.

2 Punktwolkendaten der terrestrischen RIEGL Laserscanner

Alle RIEGL LiDAR Sensoren und Systeme beruhen auf einer Digitalisierung der Empfangssignale. Die Signalauswertung erfolgt entweder in einer separaten sogenannten Full Waveform Analyse, oder – wie bei den terrestrischen Laserscannern – in einer sogenannten Echtzeit-Wellenform-Prozessierung.



Abb. 1: Vergleich der Punktattribute Amplitude (links) und Reflektivität (rechts) anhand eines Datensatzes aus dem städtischen Bereich. Farbskala reicht von blau (gering) bis rot (hoch). Deutlich zu erkennen ist die Abnahme der Amplitude mit der Objektentfernung.

Neben der präzisen Zielentfernung aus der Laufzeitmessung wird auch eine kalibrierte Amplitude bestimmt, die als Verhältnis zur sogenannten Detektionsgrenze in Dezibel ausgegeben wird (vgl. auch Pfennigbauer et al. 2009). Über eine serienmäßige Kalibrierung der Geräte kann aus Zielentfernung und kalibrierter Amplitude eine Größe ermittelt werden, die als kalibrierter Reflexionsgrad oder Reflektivität bezeichnet wird. Diese wird für jeden Punkt der Punktwolke als einer der Attribute zu jedem Punkt ausgegeben und wird wieder als Verhältnis in Dezibel dargestellt. Für die Reflektivität ist die Bezugsgröße jener Amplitudenwert, den ein weißes, diffus reflektierendes Ziel in derselben Entfernung ergeben hätte. Da die Ziele nicht in allen Fällen größer als der Querschnitt des Laserstrahls sind, ist – streng genommen – die Bezeichnung „normierter Laser-Radarquerschnitt“ zutreffender. Im Gegensatz zur Amplitude ist die Reflektivität eine Objekteigenschaft und unabhängig von der Objektentfernung von der Scanposition und kann damit vorteilhaft für die automatisierte Registrierung verwendet werden. **Abb. 1** zeigt Amplitude des Empfangssignals und Reflektivität für einen typischen Datensatz.

Ein weiteres Punktattribut ist die sogenannte Pulsformabweichung (pulse shape deviation). Hierbei wird in der Echtzeit-Wellenform-Prozessierung die tatsächliche Pulsform des Empfangssignals mit jener Pulsform verglichen, die ein Ziel gleicher Reflektivität in derselben Entfernung hervorgerufen hätte, wenn das Ziel eine im Vergleich zum Durchmesser des Messstrahls ausgedehnte ebene Fläche und diese Ebene auf den Messstrahl normal ausgerichtet wäre. Niedrige Werte zeigen an, dass die Echopulsform nicht wesentlich von dieser speziellen

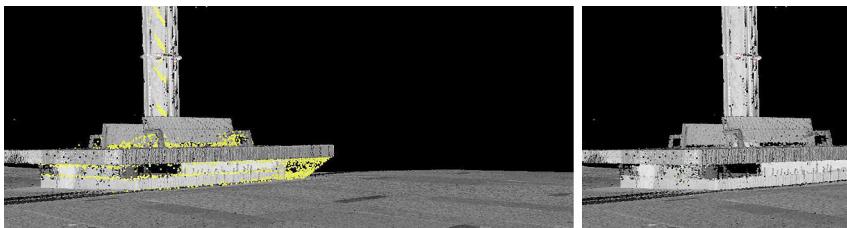


Abb. 2: Scandaten ungefiltert, Punkte mit hoher Pulsformabweichung in Gelb hervorgehoben (links), Scandaten mit hoher Pulsformabweichung entfernt (rechts)

Pulsform abweicht. Hohe Werte deuten auf Echosignale mit einer deutlich anderen Pulsform hin, die z. B. durch das Verschmelzen von Echopulsen entstehen kann, wenn ein Laserstrahl mehrere Ziele in nur geringfügig unterschiedlichen Entfernungen trifft. Dies macht die Pulsformabweichung zu einer effizienten Kenngröße zur Unterdrückung von sogenanntem Kantenrauschen, wie in Abb. 2 demonstriert.

3 Bestimmung der relativen Pose durch Analyse im Spektralbereich

Eine Teilaufgabe der automatisierten Registrierung von Scanprojekten ist es, eine neu erfasste Scanposition in Bezug auf die zuvor aufgenommenen und bereits registrierten Scanpositionen zu registrieren. Im speziellen bedeutet dies, jene sechs Freiheitsgrade einer starren Transformation zu bestimmen, die – angewandt auf die zu registrierende Scanposition – die Konsistenz der Gesamtpunktwolke sicherstellt und in Überlappungsbereichen die Klaffungen zwischen der neuen Punktwolke und den vorherigen minimiert.

Als Vorbereitung zur Registrierung einer neuen Scanposition werden die Scandaten über die Pulsformabweichung von sogenanntem Kantenrauschen bereinigt. Aus der Punktwolke dieser Scanposition wird über eine gleichmäßige räumliche Aufrasterung der Umgebung ein regulärer Datensatz abgeleitet, der nachfolgend als Voxeldatensatz bezeichnet wird. Hierbei repräsentiert ein Voxel im Allgemeinen eine Vielzahl von Punkten der Punktwolke. Jedes Voxel erhält über die Reflektivität der enthaltenen Punkte den „Funktionswert“ Reflektivität. Dieser Voxeldatensatz kann damit als „räumliches Signal“ aufgefasst werden und stellt die Basis für einen Übergang aus dem räumlichen Bereich in den Spektralbereich über die Fouriertransformation dar. Abb. 3 und Abb. 4 zeigen die Daten einer Scanposition als Punktwolke und als Voxeldatensatz.

Die entscheidende Eigenschaft der Fouriertransformation für den Anwendungsfall ist, dass sich eine Verschiebung und Drehung eines Datensatzes im

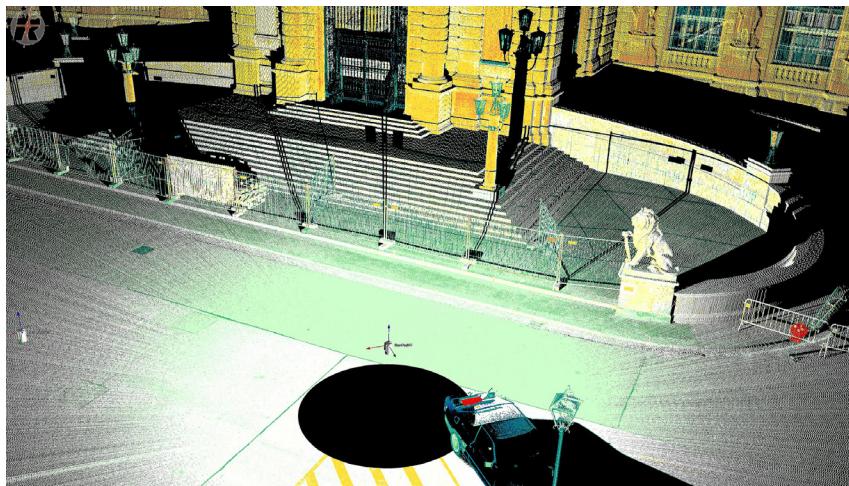


Abb. 3: Punktwolke einer Scanposition, Einfärbung nach der Reflektivität

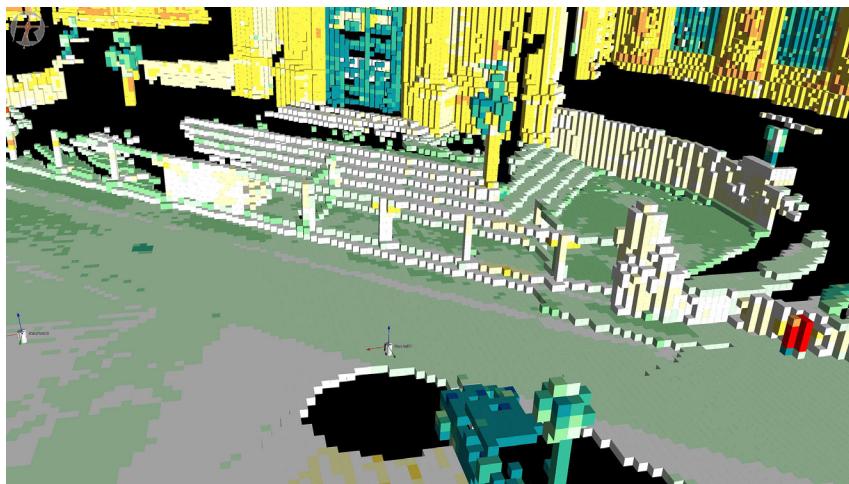


Abb. 4: Derselbe Datensatz repräsentiert als Voxeldatensatz

Spektralbereich so darstellt, dass sich die Drehung nur im Betrag der Fouriertransformierten des transformierten Datensatzes zeigt, wohingegen in der Phase der Fouriertransformierten Translation und Drehung wirksam werden. Diese Eigenschaft ermöglicht es, über die Analyse der Beträge des neu zu registrierenden Datensatzes und einem zuvor gebildeten Referenzdatensatz die Drehung zu bestimmen – unbeeinflusst von der Translation. Nach Bestimmung der Drehung kann diese auf den zu registrierenden Datensatz angewendet werden. Eine

neuerliche Fouriertransformation und eine Analyse der Phasenverschiebung erlaubt dann die zuverlässige Bestimmung der Translation (Bülow und Birk 2013).

Diese Verfahren erlaubt bei Vorliegen einer hinreichenden Überlappung des zu registrierenden Datensatzes mit dem Referenzdatensatz eine hinreichend genaue Bestimmung der sechs Freiheitsgrade der neuen Scanposition in Bezug auf die bereits zuvor registrierten Daten. Das Ergebnis dieser Registrierung ist in Folge die Basis für eine Verfeinerung der Registrierung über korrespondierende Ebenenstücke, die in beiden Datensätzen gefunden werden (vgl. Gruen und Akca 2005). Mit diesem zweistufigen Verfahren ist eine hoch präzise, automatische sequentielle Registrierung von Scandaten möglich.

Zur weiteren Erhöhung der Robustheit des Verfahrens werden unabhängige Sensordaten der *RIEGL* Laserscanner der Type VZ-400i und VZ-2000i mit herangezogen: von einem integrierten GNSS-Empfänger, einer integrierten IMU-Einheit, sowie einem 3-Achsen Magnetfeldkompass. Diese Sensordaten werden zur optimalen Auswahl der Referenzdaten herangezogen und ermöglichen damit die automatisierte Registrierung auch unter schwierigen Umgebungsbedingungen.

4 Ergebnisse

Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens wurde in unterschiedlichen Umgebungen demonstriert. Das Verfahren ist sowohl auf den Laserscannern *RIEGL* VZ-400i und *RIEGL* VZ-2000i selbst verfügbar, als auch in der Auswertesoftware *RIEGL RiSCAN PRO*.

Die unten angeführten Zeitmessungen wurden auf einem Fujitsu CELSIUS R940power mit Intel Xeon E5-2690 Prozessor mit 64 GB RAM durchgeführt. Die Projektdaten waren auf einer über SATA angebundenen SSD gespeichert. Die Registrierung auf den Scannern selbst nimmt etwa um 50 % mehr Zeit in Anspruch.

4.1 Innenstadt Wien, Österreich

Es wurden Scandaten an 514 Scanpositionen in der Wiener Innenstadt in einer Zeitspanne von 8 Stunden erfasst. Der Abstand der Scanpositionen betrug im Schnitt 10 Meter und es wurden dabei in Summe 7 Milliarden Punkte aufgezeichnet, im Schnitt 14 Millionen Punkte pro Scanposition. Die automatische Registrierung auf dem obengenannten PC mit RiSCAN PRO erforderte 3 Stunden und 50 Minuten, im Schnitt 27 Sekunden je Scanposition. Da an jeder Scanposition auch die Position über den GNSS-Empfänger bestimmt wurde, ist das Gesamtprojekt damit automatisch auch georeferenziert.



Abb. 5: Registrierte Scandaten der 514 Scanpositionen entlang des Aufnahmepfades

Mit der sequentiellen automatischen Registrierung entsteht auch ein Voxel-datensatz für das Gesamtprojekt. Dieser Datensatz ist vergleichsweise kompakt und kann daher auch vorteilhaft für eine rasche Datenverifikation oder Visualisierung herangezogen werden. Abb. 5 zeigt die registrierte Punktwolke.

4.2 Waldstück in Horn, Österreich

Die Erfassung von Laserscandaten im Forstbereich für eine kostengünstige Bestandsaufnahme ist ein zurzeit viel beachtetes Thema im Bereich der terrestrischen LIDAR-Anwendung (Liang et al. 2016). Die automatische Registrierung von Daten in Waldgebieten stellt eine besondere Herausforderung dar, da das GNSS-Signal dort in der Regel von minderer Qualität ist und es auch kaum klar definierte Ebenen gibt. Dies erforderte in der Vergangenheit das Ausbringen von markierten Zielen, wie zum Beispiel retroreflektierende Marken, die dann zur Registrierung herangezogen werden konnten.

In dem hier gezeigten Beispiel wurden 14 Scanpositionen mit in Summe 219 Millionen Punkten erfasst. Die automatisierte Registrierung erfolgte problemlos in durchschnittlich 24 Sekunden je Scanposition. Abb. 6 zeigt die resultierende registrierte Gesamtpunktwolke.

4.3 Burgruine Hainburg, Österreich

Dieser Datensatz umfasst 180 Scanpositionen, wobei die Mehrzahl der Scanpositionen im Freien aufgenommen wurde und damit über die GNSS-Messungen



Abb. 6: Registrierte Punktfolke aus 14 Scanpositionen. Die Scanpositionen selbst sind durch CAD-Modelle des Scanners repräsentiert.



Abb. 7: Registrierte Punktfolke aus 180 Scanpositionen. In der Mitte des Bildes ist ein unterirdischer Gang zu erkennen.

eine direkte Georeferenzierung möglich war. Auch die Daten aus einem unterirdischen Gang (vgl. Abb. 7, Mitte) wurden problemlos registriert. Die Registrierung aller Scanpositionen benötigte 39 Minuten.

4.4 Industriemgebung

Zur Demonstration der automatischen Registrierung in einem Bereich gänzlich ohne GNSS-Empfang zeigt die Abb. 8 Scandaten aus 20 Scanpositionen in einer Industrieanlage.

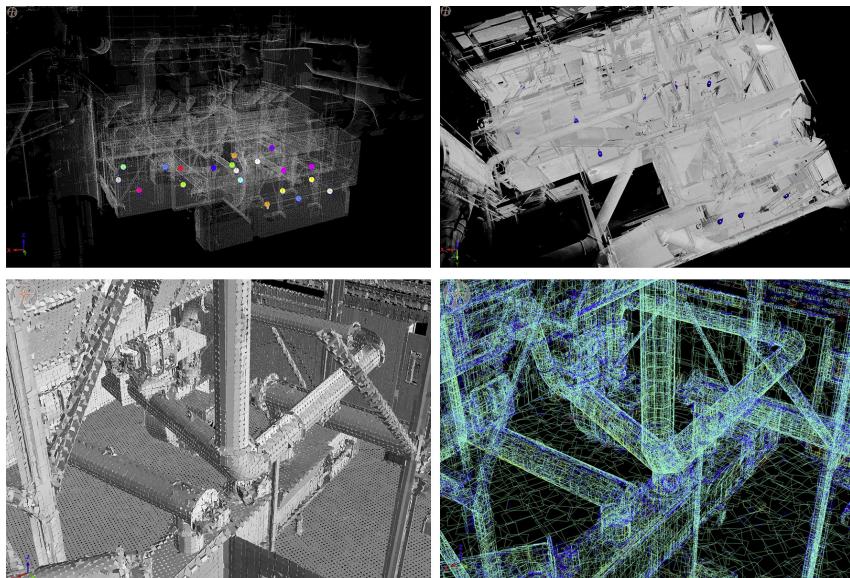


Abb. 8: Datensatz aus dem Industriebereich. Links oben: Überblick anhand einer ausgedünnten Punktewolke. In Farbe sind die Scanpositionen angedeutet. Rechts oben: Aufsicht auf einen Teil der Gesamtpunktewolke. Links unten: Ausschnitt dargestellt als Teil des projektbezogenen Voxeldatensatzes. Rechts unten: Ausschnitt dargestellt als Teil des projektbezogenen Datensatzes aus Ebenenstücken.

Die gesamte Punkteanzahl beträgt 433 Millionen, die tatsächliche Aufnahmezeit betrug bloß 23 Minuten inklusive der Standortwechsel. Die Registrierung erfolgte am PC in 6 Minuten.

5 Schlussbemerkungen

Die automatisierte Registrierung in Echtzeit am Gerät hat sich in der Praxis als wertvolles Werkzeug erwiesen um bereits im Feld überprüfen zu können, ob sich das Projekt auf einfache Weise registrieren lässt und auch ob die Objekte mit hinreichend wenig Scanschatten erfasst wurden. Die bei der Registrierung

anfallenden Voxeldaten des Gesamtprojektes beinhalten in vielen Anwendungen bereits hinreichende Aussagekraft und Genauigkeit zur Beantwortung zeitkritischer Fragen. Diese kompakten Daten können problemlos über Mobilfunk-Datennetz direkt vom Einsatzort übertragen werden.

Für eine hohe Zuverlässigkeit der Registrierung ist empfohlen bei der Datenaufnahme diszipliniert auf die Überlappung von Scandaten sowie die Einhaltung von für die Messsituation angepassten Abständen zu achten. In diesem Fall läuft nicht nur die Registrierung automatisch, es entstehen auch Gesamtpunktwolken mit geringer Abschattung und hoher innerer Genauigkeit in kurzer Zeit.

Literatur

Bülow, H.; Birk, A. (2013): Spectral 6DOF Registration of Noisy 3D Range Data with Partial Overlap. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, VOL. 35, NO. 4, 2013.

Gruen, A.; Akca, D. (2005): Least squares 3D surface matching. *ASPRS 2005 Annual Conference*, March 2005.

Liang, X.; Kankare, V.; Hyypä, J.; Wang, Y.; Kukko, A.; Haggrén, H.; Yu, X.; Kaartinen, H.; Jaakkola, A.; Guan, F.; Holopainen, M.; Vastaranta, M. (2016): Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 115, 2016.

Pfennigbauer, M.; Rieger, P.; Studnicka N.; Ullrich A. (2009): Detection of concealed objects with a mobile laser scanning system. *Proc. SPIE 7323, Laser Radar Technology and Applications XIV*, 732308, May 2009.

Kontakt

Andreas Ullrich

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH

Riedenburgstraße 48, 3580 Horn, Österreich

aullrich@riegl.com

3D-Scanning – Vom 3D-Aufmaß über die Projektierung bis zur 3D-Erstellung im Fernwärmeleitungsbau unter schwierigsten Bedingungen

Kai Steuernagel | Holger Hustedt

1 Einstieg und Ausgangsfragestellung

Der Mainova-Konzern baut in Frankfurt am Main sein Fernwärme-System aus. Ziel des Ausbaus ist es, bestehende Kraftwerkstandorte mit einander zu verbinden. Ende 2013 kam im Zuge des Ausbaus des Fernwärmeverbundes auf der Strecke vom Heizkraftwerk West zum Heizkraftwerke Niederrad die Frage auf, ob es möglich wäre, auf dem Kraftwerksgelände der Mainova AG einen alten Kühlwasserkanal zu nutzen. Die Gesamtlänge des Tunnels betrug rund 110 Meter in zwei Abschnitten.

Die Vorteile der Nutzung des Kühlwasserkanals:

- Umgehung augenscheinlicher Hindernisse auf dem Kraftwerksgelände,
- Vermeidung von Kollisionen mit vorhandenen verlegten Trassen,
- deutliche Kosteneinsparung.

Die Ausgangssituation stellte sich wie folgt dar: Eine Tunnelbegehung mit vereinfachtem Aufmaß konnte die Frage einer Nutzung nicht klären (Abb. 1).



Abb. 1:
Erste Tunnelbegehung

Deutlich verschärft wurde die Klärung durch die sehr hohen Genauigkeitsanforderungen. Es sollten zwei Rohre mit einem Durchmesser von 70 Zentimeter in dem Kühlwasserkanal mit einem Durchmesser von 150 Zentimeter eingebracht werden (Abb. 2).

Hinzu kamen sehr schwierige Rahmenbedingungen:

- nur begrenzter Zugang an zwei Stellen,
- starke Verschmutzung des Kanals,
- Begehung durch die nahe Lage zum Main nur bei Niedrigwasser möglich.

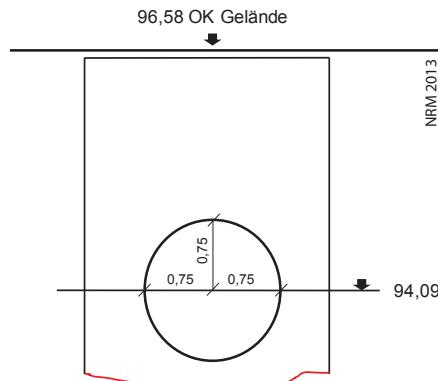


Abb. 2: Schematische Darstellung des Kühlwasserkanals mit Fernwärme (FW)-Leitungen

2 Gewählter Messaufbau und der Weg zur 3D-Planung/ 3D-Kollisionsbetrachtung

Um die Ausgangsfrage ganzheitlich beantworten zu können, ob der alte Kühlwasserkanal genutzt werden kann, blieb nur die komplette Erfassung im Dreidimensionalen. Eine Variante dabei ist das 3D-Scanning.

Daraus ergab sich folgender Messaufbau:

1. Schaffung eines Festpunktfeldes in Lage und Höhe im amtlichen Koordinatensystem.
2. Herunterlotung des Festpunktfeldes in Lage und Höhe in den Kühlwasserkanal an zwei Positionen.
3. Erfassung mittels 3D-Laserscanning ober- und unterirdisch im geschaffenen Festpunktfeld.

Im Ergebnis standen dreidimensionale Punktwolken aus dem 3D-Laserscanning zur Verfügung (Abb. 3 und Abb. 4).

Auf Basis der Punktwolken folgte als nächster konsequenter Schritt eine 3D-Planung. Die relevanten Planungsparameter und die Ergebnisse aus dem 3D-Laserscanning wurden in einem gemeinsamen Modell integriert. Ziel war eine 3D-Kollisionsbetrachtung auf Basis einer virtuellen Achse für den Kühlwasserkanal. Das Ergebnis der 3D-Kollisionsbetrachtung war, dass der bestehende Kühlwasserkanal genutzt werden kann (Abb. 5).

Steuernagel Ingenieure GmbH
im Auftrag der NRM, 13.2.2014



Abb. 3:
3D-Modell
Kühlwas-
serkanal
aus 3D-Re-
shaper

Steuernagel Ingenieure GmbH im Auftrag der NRM, 13.2.2014

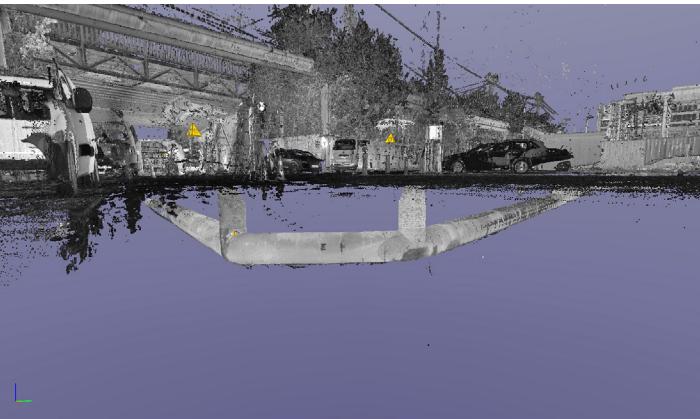


Abb. 4:
Punktwol-
ke Kühl-
was-
ser-
kanal und
Gelände-
oberfläche
aus Jet
Stream
Viewer

Steuernagel Ingenieure GmbH im Auftrag der NRM, 13.2.2014

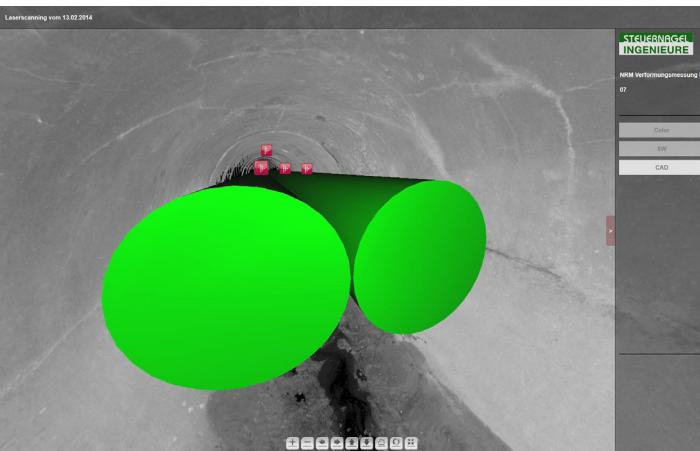


Abb. 5:
3D-Laser-
scanning
und
Leitungs-
planung
(3D)

Gleichzeitig wurde sehr klar, dass für die eigentliche Bauausführung sehr hohe Genauigkeitsvorgaben unverzichtbar waren. Diese wurde – ergänzt durch geforderte geodätische Bauüberwachung – in den entsprechenden Ausschreibungen formuliert. Die Genauigkeitsforderung für den Einbau der Stahlkonstruktion lag bei +/- zwei Millimeter in Lage und Höhe (relative Punktgenauigkeit). Entsprechend hoch war die Verantwortung für alle Projektbeteiligten.

3 Bauweise, Probleme und geodätische Bauüberwachung

Durch die erwähnte örtlich dichte Bebauung auf dem Kraftwerksgelände der Mainova AG stand in der Bauphase nur sehr begrenzt Raum für die Start- und Zielgruben am Anfang und am Ende der Abschnitte im Kühlwasserkanal zur Verfügung (Abb. 6). Die Rohre wurden deshalb abschnittsweise über ein Schienensystem in den Kühlwasserkanal eingebracht.



Abb. 6:
Oberirdische
Örtlichkeit beim
Leitungsbau im
Kühlwasserkanal

Das Schienensystem wurde entsprechend durch ein hochpräzises geodätisches Festpunktfeld eingerichtet und kontinuierlich überwacht (hochgenaue Tachymetrie) (Abb. 7). Trotz dieser Maßnahmen zeigte sich in der Bauphase, dass der Platz bei einer direkten 1:1-Übertragung der Planung nicht für die beiden Leitungsrohre reichen würde. Entsprechend waren zwei Korrekturen der virtuellen Tunnelachsen erforderlich:

- um 0,03 m in dem langen Tunnelabschnitt in der Höhe und
- um 0,06 m in dem kurzen Tunnelabschnitt in der Lage (nach rechts).



Abb. 7:
Freigelegter ehemaliger Kühlwasserkanal und Schienensystem



Abb. 8: Fertigstellung des Rohreinzugs
noch ohne Betonverfüllung

Um sicher zu gehen, wurden Rohr-Attrappen („Dummies“) gebaut und damit Einbau, Einschub und Durchgängigkeit des Kühlwasserkanals über die vollständige Länge getestet.

Der Rohreinzug selbst verlief sehr präzise und problemlos auf dem Schienensystem. Als weitere Maßnahme wurden die Rohre im Kühlwasserkanal mittels Beton fixiert, um ein nachträgliches Bewegen des Schutzrohres aufgrund thermischer Beanspruchung zu verhindern.

Der Abstand zwischen den beiden gebauten Fernwärmernohren beträgt am Ende drei Millimeter. Dieses Ziel konnte nur durch die sehr präzise Erfassung des Bestands mittels 3D-Laserscanning, die hochgenaue Bauweise und die geodätische Überwachung während der Bauphase erreicht werden (Abb. 8).

4 Zusammenstellung der ausgeführten Schritte

Abb. 9 fasst die wichtigsten Teilschritte zusammen.



NRM, 23.4.2014/9.6.2017

Abb. 9: Zusammenstellung Arbeitsschritte der 3D-Erfassung – Planung – Bauüberwachung

5 Vorteile des 3D-Laserscannings und Übertragbarkeit des Messkonzepts

Mittels 3D-Laserscanning können in sehr kurzer Zeit sehr viele Objekte sehr genau bestimmt werden. Komplexe Situationen und Sachverhalte wie Innenaufmaße in Umspannwerken, Regler- oder Druckerhöhungsanlagen stellen ideale Objekte für eine Erfassung mittels 3D-Scanning dar. Es setzt allerdings voraus, dass die entstehenden Punktwolken sowohl softwaretechnisch als auch von den Datenmengen weiterverarbeitet werden können.

3D-Laserscanning ist ein Sensoransatz, um – wie im vorliegenden Fall – eine komplettete 3D-Erfassung zu ermöglichen, um dann auf dieser Basis dreidimensional zu planen, Planungsvarianten zu testen bzw. Kollisionsbetrachtung im Vorfeld des Baus schon aufzulösen. Das vorgestellte Konzept für die Erfassung des Kühlwasserkanals ist daher sehr gut auf andere Problemfälle übertragbar.

Das Großprojekt Frankfurt Gateway Gardens mit einer Trassenumlegung für die S-Bahn führt dazu, dass diverse Medien umverlegt werden müssen. Dieses gilt auch für die NRM Netzdienste Rhein-Main GmbH. Unter anderem sollte



Abb. 10:
Mantelrohr unterhalb DB-Trasse,
3D-Scanning-Objekt

dabei ein bestehendes Mantelrohr unterhalb einer DB-Trasse genutzt werden (Abb. 10).

Folgende Parameter waren zu bestimmen:

- Verkantungen,
- Versprünge in Lage und Höhe,
- das Durchhängen von Schweißnähten,
- Schäden an der Oberfläche,
- Ausmaß des Gefälles.

Neben der weiteren Nutzung der Hochdruck-Leitung (HD-Leitung) sollten auch Stromleitungen (Rohr) durch das Mantelrohr verlegt werden. Auch diese Anfrage ließ sich am einfachsten und auch qualitativ am sichersten mittels 3D-Scanning lösen (Abb. 11 und Abb. 12).



Abb. 11:
Mantelrohr unterhalb DB-Trasse,
3D-Scanning-Objekt

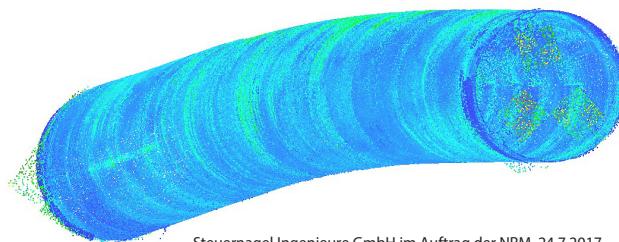


Abb. 12:
Punktwolke Mantelrohr. Unbereinigt aus 3D-Reshaper zur Darstellung der Krümmung

Steuernagel Ingenieure GmbH im Auftrag der NRM, 24.7.2017

Die Vorgehensweise war dann analog dem Verfahren beim Kühlwasserkanal

1. 3D-Scanning
2. 3D-Modellierung
3. 3D-Planung

Das Ergebnis lieferte am Ende die Freigabe zur Umsetzung des kompletten geplanten Leitungskonzeptes zur Nutzung des vorhandenen Mantelrohres.

6 Zusammenfassung

In dicht bebauten Gebieten spielen komplexe Fragestellungen eine größere Rolle. Das Thema 3D kann in diesen Fällen zunehmend nicht mehr vernachlässigt werden. Eine Variante auf der Suche nach Lösungen kann das Messverfahren des 3D-Scannings sein.

Für einen sehr komplizierten Fall, dem Bau einer Fernwärmeleitung unter Nutzung eines alten Kühlwasserkanals unter engsten räumlichen Bedingungen, wird eine entsprechende Lösung vorgestellt – von der 3D-Bestandsaufnahme über die 3D-Planung bis zur Realisierung in der 3D-Bauausführung auf.

Die gewählte Methodik ist auf andere Fragestellungen, Energiesparten etc. übertragbar, was mit einem zweiten aktuellen Beispiel belegt wird.

Kontakt

Kai Steuernagel

Steuernagel Ingenieure GmbH

Zeilweg 13–15, 60439 Frankfurt am Main

kai.steuernagel@steuernagel-ing.de

Holger Hustedt

NRM Netzdienste Rhein-Main GmbH

Solmsstraße 38, 60486 Frankfurt am Main

h.hustedt@nrm-netzdienste.de

Das terrestrische Laserscanning ist inzwischen ein voll etabliertes Messverfahren, das ein enormes Leistungsspektrum besitzt und vielfältige Anwendungsmöglichkeiten eröffnet. Die große Akzeptanz und die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Geodäsie und den Nachbardisziplinen gepaart mit den Forschungstätigkeiten an Universitäten und Hochschulen liefern ein großes Wissensspektrum.

Der Fokus in diesem Band liegt auf der Fusion von 3D- und bildgestützten Punktwolken, dem Laserscanning im interdisziplinären Umfeld sowie auf zukunftsorientierten Anwendungsfeldern. Ausführungen zur Entwicklung von Laserscannern und der Herausforderungen bei neuartigen Anwendungen sowie kollaborativen Methoden der Datenerfassung führen in die Thematik ein.



ISBN: 978-3-95786-145-0



9 783957 861450

Schriftenreihe des DVW

Band 88 / 2017

Printversion: 27,80 Euro

PDF: kostenfrei

www.geodaezie.info

