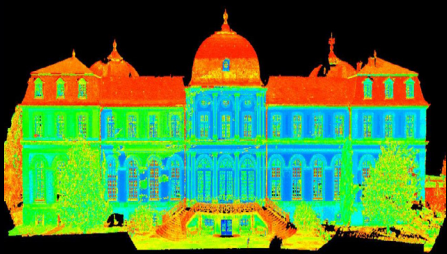


Arbeitskreis 4 „Ingenieurgeodäsie“
Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016)

Beiträge zum 154. DVW-Seminar am
28. und 29. November 2016 in Fulda



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

Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016)

Beiträge zum 154. DVW-Seminar am
28. und 29. November 2016 in Fulda

Redaktion:
Christoph Holst

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



Schriftenreihe des DVW
Band 85
Wißner-Verlag

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

www.dvw.de
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW
Band 85

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.
Webadressen und E-Mail-Adressen sind ebenfalls mit Hyperlinks hinterlegt.
Kostenfreier PDF-Download unter www.geodaesie.info.

Zitierhinweis:

[Vorname Nachname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016). DVW-Schriftenreihe, Band 85/2016, Wißner-Verlag, Augsburg, 2016, 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: 978-3-95786-106-1
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2016
www.geodaesie.info

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg
Bildnachweis Cover: Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn

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 Grundlagen

Daniel Wujanz Christoph Holst Heiner Kuhlmann Frank Neitzel Standpunktplanung beim terrestrischen Laserscanning	9
--	---

Sören Loges Jörg Blankenbach Von der texturierten Punktwolke zum as-built BIM	23
--	----

Session 2: Flächenhafte Deformationsanalysen

Christoph Holst Berit Schmitz Heiner Kuhlmann TLS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von Standardsoftware ..	39
---	----

Robert Wenighofer Klaus Chmelina Robert Galler Erfassung von Tübbingverformungen bei TVM-Vortrieben	59
--	----

Mario Haupt Jens-André Paffenholz 3D-Punktwolkenbasiertes Monitoring aus Sicht eines Ingenieurbüros – Chancen und Herausforderungen	75
---	----

Eugenio Serantoni Andreas Wieser TLS-based Deformation Monitoring of Snow Structures	89
---	----

Session 3: Umgang mit großen Datenmengen und Praxisberichte

Andreas Nüchter Effiziente Speicherung großer Punktwolken – Datenstrukturen für Algorithmen für mobile und terrestrische Laserscansysteme	105
---	-----

Christof Kremer Organisation und Verwaltung von 3D-Laserscanning Projekten mit mehr als 1.000 Standpunkten	121
--	-----

Christian Hesse Kay Weltzien Andreas Stromhardt	
Hochpräzises Mobile Mapping im Ingenieur- und Verkehrswegebau	131

Session 4: Anwendungen und Zukunftsfelder

Benjamin Kleppe	
Vermessung und Visualisierung von Tatorten zur Verifizierung von Zeugenaussagen	147

Stefan Paulus Tino Dornbusch	
Einsatz von Laserscannern in der Hochdurchsatzphänotypisierung	157

Markus Schäfer	
„3D marine surveying“ – Laserscanning beim Bau und Refit von Superyachten	165

Giulia Buffi Silvia Grassi Piergiorgio Manciola Wolfgang Niemeier	
Comparison of 3D Model derived from UAV and TLS – The Experience at Ridracoli Dam, Italy	173

Vorwort

Alle Facetten des terrestrischen Laserscannings (TLS) in ein zweitägiges DVW-Seminar mit vier Sessionen aufzunehmen, gestaltet sich zunehmend schwieriger: Einerseits werden von Seiten der Hardware und Software immer genauere, effizientere und damit einhergehend komplexere Messtechniken und Algorithmen entwickelt, um das Scanning komfortabler zu gestalten. Hierbei gilt es, Schritt zu halten, diese zu erklären und kritisch zu prüfen. Andererseits führt dieser technische Fortschritt auch umgehend dazu, dass terrestrische Laserscanner in einer kaum zu überblickenden Vielfalt verschiedener Anwendungen eingesetzt werden. Beide Aspekte lassen sich nicht in gebührender Tiefe in nur einem TLS-Seminar behandeln.

Dieses Jahr haben wir uns dazu entschieden, den Fokus eher auf die Vielfalt verschiedener Anwendungen und das enorme Potential von Laserscannern zur geometrischen Erfassung und Analyse von Oberflächen zu legen. Hierbei haben wir drei Bereiche durch entsprechende Sessionen hervorgehoben, da sie uns von besonderer Aktualität erscheinen:

- Flächenhafte Deformationsanalysen
- Umgang mit großen Datenmengen und Praxisberichte
- Anwendungen und Zukunftsfelder

Diese Sessionen werden eingeleitet von einer Einführung und Grundlagen des TLS.

Die Zielgruppe des Seminars sind die Kolleginnen und Kollegen in der Praxis, Forschung oder 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 4 »Ingenieurgeodäsie« und 3 »Messmethoden und Systeme« freuen sich darauf, mit Ihnen in Fulda Anregungen und Gedanken zu diesem weiterhin zukunftsorientierten, innovativen Thema auszutauschen. Schließlich danken wir hiermit allen, die an der Entstehung dieses Tagungsbandes durch ihre sorgfältig ausgearbeiteten schriftlichen Beiträge mitgewirkt haben.

Christoph Holst und Heiner Kuhlmann
Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation

Session 1 – Einführung und Grundlagen

Standpunktplanung beim terrestrischen Laserscanning

Daniel Wujanz | Christoph Holst | Heiner Kuhlmann | Frank Neitzel

1 Einleitung

Trotz der enormen Popularität von terrestrischen Laserscannern in den meisten Anwendungsgebieten der Geodäsie finden ökonomische oder ingenieurgeodätische Belange bei der Standpunktwahl eines terrestrischen Laserscanners (TLS) lediglich durch rein intuitive Überlegungen Berücksichtigung. Ein Blick in die geodätische Fachliteratur zum Thema Planung und Optimierung der Aufnahmekonfiguration weist Parallelen zwischen verschiedenen Erfassungsmethoden, zum Beispiel der Tachymetrie (Niemeier 2008, S. 331 ff.) und der Photogrammetrie (Luhmann 2003, S. 498 ff.), auf. Die Schnittmenge beider Verfahren beinhaltet die Erfüllung definierter Kriterien der Genauigkeit und Zuverlässigkeit, wobei dies in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen erfolgen muss (Rehr et al. 2011). Eine direkte Übertragung der in den Fachbüchern diskutierten Methoden ist jedoch nicht möglich, da in beiden Fällen diskrete, wiederholt messbare Punkte im Objektraum angenommen werden und lediglich die Aufnahmekonfiguration relativ dazu verändert wird. Dieser Fall ist beim terrestrischen Laserscanning nicht gegeben, da die Punktverteilung auf der Objektoberfläche in Abhängigkeit vom gewählten Aufnahmestandpunkt variiert. Folglich müssen für jeden potentiellen Aufnahmepunkt zunächst Beobachtungen unter Vorgabe verschiedener Parameter simuliert werden, wozu das sogenannte Ray-Casting oder Ray-Tracing (Appel 1968) verwendet wird. Als Grundlage dafür müssen entweder geometrische Modelle eines Objekts, die zum Beispiel aus Bauplänen abgeleitet werden können, oder bereits erfasste Punktwolken aus zuvor ausgeführten Messkampagnen vorliegen. Es ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass die Aufnahmekonfiguration, also die räumliche Relation zwischen einem interessierendem Objekt und einem TLS, das Ergebnis bei der Datenerfassung in vielfältiger Weise beeinflusst und somit den Rahmen dieses Artikels überschreiten. Folglich zielt dieser Beitrag auf drei Kernaspekte, die von besonderer Relevanz für die Geodäsie und verwandte Wissenschaften sind:

- die Identifikation von möglichst kleinen Standpunktmengen, siehe [Kap. 3](#),
- die erreichbare Präzision im Feld, die in [Kap. 4.1](#) diskutiert wird,
- die Bestimmung von unbekannten Parametern, die in [Kap. 4.2](#) im Fokus steht.

Ein Blick in die zuvor aufgeführte List zeigt, dass eine eindeutige Entscheidung, was eine optimale Aufnahmekonfiguration ist, nicht getroffen werden kann. Dieses Argument kann dadurch begründet werden, dass Optimalität durch ein einzelnes Kriterium, eine Kombination von einigen oder allen möglichen Kriterien definiert sein kann. Das in der Praxis am häufigsten zu lösende Problem ist das Finden einer ökonomischen Aufnahmekonfiguration, das heißt, dass eine möglichst geringe Anzahl an Standpunkten gefunden werden soll, da jeder weitere Standpunkt zusätzliche Zeit und somit Kosten bedeutet. Eine über diesen Beitrag hinausgehende Analyse der Optimierung von Aufnahmekonfigurationen beim terrestrischen Laserscanning ist in Wujanz et al. (2016b) zu finden.

2 Simulation von TLS-Beobachtungen

Bevor auf die Suche nach einer optimalen Aufnahmekonfiguration eingegangen wird, soll in diesem Abschnitt die Simulation von Laserscannerbeobachtungen und die Datenaufbereitung thematisiert werden, die dazu unerlässlich ist. Zuerst gilt es, Punktwolken zu simulieren, die von verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen wurden. Für diesen Schritt sind die folgenden Informationen vom Benutzer vorzugeben:

- dreidimensionale Koordinaten von potentiellen Standpunkten,
- Auflösung der Winkelinkremente des zu simulierenden Scanners,
- trianguliertes 3D-Modell des zu erfassenden Objekts,
- stochastisches Modell des simulierenden Scanners (optional).

Mit Hilfe dieser Informationen kann ein sogenanntes Ray-Tracing (Appel 1968) von jedem Standpunkt aus ausgeführt werden. Dazu wird ein dreidimensionales Vektorfeld erzeugt, dessen Auflösung der vorgegebenen Auflösung des simulierten Scanners entspricht. Die jeweils ersten Schnittpunkte jedes Vektors mit der Modelloberfläche führen zur simulierten Punktwolke eines Standpunktes. Soll eine Standpunktplanung zur Vorbereitung einer Ingenieurvermessung durchgeführt werden, so sind ebenfalls stochastische Informationen notwendig.

Die Eingangsdaten für den Ray-Tracing-Prozess zeigt [Abb. 1a](#). Die gelbe Kugel markiert den Aufnahmepunkt, von der aus ein Scan auf das graue triangulierte 3D-Modell simuliert werden soll. Dazu muss zunächst die Winkelauflösung des zu simulierenden Scanners definiert werden, welche die Auflösung im Objekt-raum beeinflusst. Um den Rechenaufwand der Simulation zu begrenzen, hilft es, eine sogenannte Region of Interest festzulegen. Dazu eignet sich eine Bounding Box, die das 3D-Modell umschließt und in [Abb. 1b](#)) durch einen gelben transparenten Quader markiert wird. Die roten und grünen Dreiecke kennzeichnen das horizontale und vertikale Sichtfeld des Scanners. Innerhalb dieses Bereichs

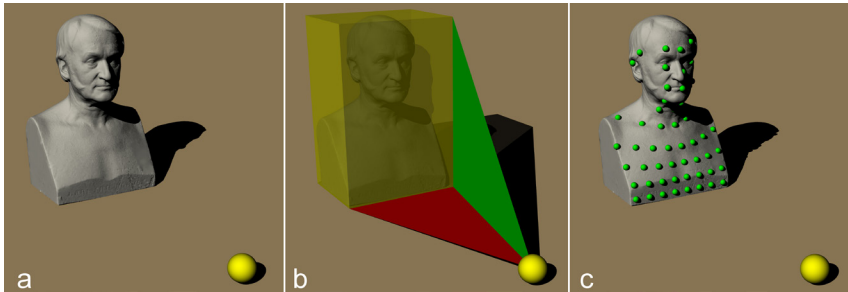


Abb. 1: a) 3D-Modell und simulierter Standpunkt (gelbe Kugel). b) Horizontales (rote Fläche) und vertikales Sichtfeld (grüne Fläche), dass die gelbe Bounding Box umschließt. c) Simulierte TLS-Punktwolke (grüne Kugeln)

kann das Ray-Tracing durchgeführt werden, was zu den grünen Kugeln auf der Modelloberfläche in [Abb. 1c](#) führt – der simulierten Punktwolke.

3 Standpunktplanung unter ökonomischen Gesichtspunkten

Die Berücksichtigung ökonomischer Aspekte bei der geodätischen Datenerfassung wird u. a. in Niemeier (2008, S. 335 ff.) diskutiert. Die zur Durchführung einer gestellten Messaufgabe nötige Aufwandsrestriktion kann mit

$$\sum a_j n_j \leq \sum_A \quad (1)$$

angegeben werden, wobei a_j den zeitlichen Aufwand zur einmaligen Beobachtung der Größe l_j und n_j die Anzahl dieser Messungen bezeichnet. Der Wert \sum_A ist der maximal zulässige Gesamtaufwand. Dieses Maß kann entweder durch ein definiertes Budget eines Klienten oder vorgegebenen Zeitfenstern, zum Beispiel während Ruhephasen auf einer Baustelle, bemessen werden. Da der Zeitaufwand für eine einzelne Messung beim terrestrischen Laserscanning sehr kurz ist, wird im Folgenden, statt des in (1) aufgeführten Zusammenhangs, die Forderung nach einer minimalen Anzahl an Standpunkten STP zur Erfassung eines Objekts verwendet,

$$\sum \text{STP} \rightarrow \min. \quad (2)$$

Eine anschauliche Interpretation des gestellten Problems wird von Chvatal (1975) als Problem der Museumswächter umschrieben. Dabei soll ein Museum, dessen Grundriss als geschlossenes Polygon beschrieben wird, von einer minimalen Anzahl an Wächtern so abgesichert werden, dass die gesamte Fläche

unter Beobachtung steht. Zur Lösung dieses Problems bestehen prinzipiell zwei Strategien: kombinatorische oder sogenannte Greedy-Strategien. Erstere ermitteln unter Berücksichtigung aller möglichen Standpunkte aus einer gegebenen Menge die optimale Lösung. Es ist ersichtlich, dass solche Lösungsansätze sehr rechenintensiv sein können und gegebenenfalls in endlicher Rechenzeit zu keiner Lösung führen. Zur Überwindung dieses potentiellen Nachteils eignen sich Greedy-Algorithmen, die durch sequentielles Zusammenfügen einzelner Scans eine optimale Lösung bestimmen. Ein Manko dieser Vorgehensweise ist jedoch, dass die gefundene Lösung ein lokales Minimum beschreiben kann und somit nicht optimal ist.

Ein Algorithmus, der eine Greedy-Strategie zur Identifizierung von optimalen Standpunktmengen bestimmt, wurde von Soudarissanane et al. (2008), Soudarissanane und Lindenberg (2011) und Soudarissanane (2016) beschrieben. Ein vergleichbarer Ansatz wurde von Ahn und Wohn (2015) beschrieben. Als Eingangsdaten dienen 2D-Grundrisspläne, die aus einem gegebenen 3D-Modell abgeleitet werden. Soudarissanane und Lindenberg (2011) begründen diesen Schritt dadurch, dass „... *nahezu alle 3D-Szenen von Innenräumen auf zwei Dimensionen reduziert werden können, indem eine horizontale Schnittebene einer Ebene z. B. auf Höhe der Kippachse des Sensors berechnet wird. Diese Vereinfachung der 3D-Szene zu einer 2D-Karte reduziert den Rechenaufwand*“ (Übersetzung aus dem Englischen). Das Optimierungsproblem wird an Hand dreier Kriterien gelöst:

- Vollständigkeit: Alle Kanten der 2D-Karte müssen von mindestens einem Standpunkt aus erfasst werden.
- Reichweite: Kanten können nur von einem Standpunkt aus erfasst werden, der nicht außerhalb der Reichweite des simulierten Scanners liegt.
- Einfallswinkel: Kanten gelten nur als erfasst, wenn sie innerhalb eines bestimmten Einfallswinkels erfasst wurden.

Im linken Teil von [Abb. 2](#) ist ein Beispiel eines Sichtbarkeitspolygons eines Innenraums zu sehen, dass aus einem Horizontalschnitt einer Punktwolke abgeleitet wurde. Das äußere Begrenzungs-polygon P_0 ist mit roten Linien gekennzeichnet. Innere Begrenzungslinien $P_{ij} = 1, \dots, 6$ sind in blau hervorgehoben. Ein simulierter Standpunkt O ist durch einen roten Stern gekennzeichnet, wobei das resultierende Sichtbarkeitspolygon V durch die grüne Fläche markiert wird. Auf der rechten Seite sind neunzehn simulierte Standpunkte ebenfalls durch Sterne gekennzeichnet, auf deren Grundlagen alle Kanten des Außenpolygons unter Berücksichtigung von Reichweite und Einfallswinkel erfasst werden. Die entsprechenden Sichtbarkeitspolygone sind in grau dargestellt.

Während 2D-Grundrisspläne zwar eine geeignete Vereinfachung für Innenräume beschreiben, lässt sich dies zweifelsohne nicht auf komplexe Strukturen

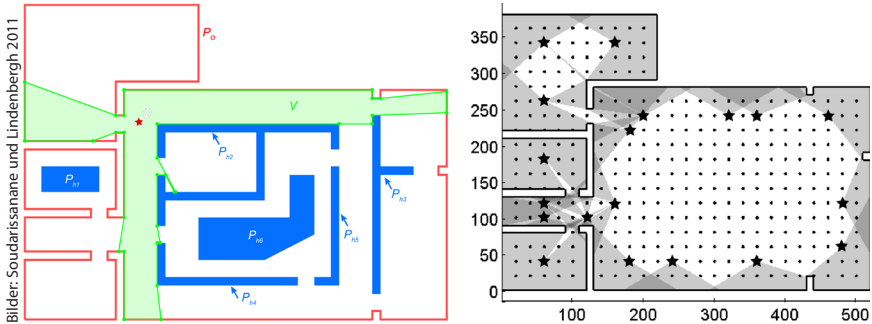


Abb. 2: Der linke Teil der Abbildung zeigt ein Beispiel eines 2D-Sichtbarkeitspolygons. Auf der rechten Seite sind neunzehn unter ökonomischer Betrachtung optimale Standpunkte durch Sterne hervorgehoben.

oder natürliche Szenen übertragen. Folglich verfolgen Ososinski und Labrosse (2014) eine Strategie, die auf räumlichen Daten basiert. Dazu dienen niedrig aufgelöste oder ausgedünnte Punktwolken. Da Ray Casting nicht auf Punktdaten angewendet werden kann, wird eine alternative Repräsentation der Daten gewählt. Diese basiert auf einer Baumstruktur, den sogenannten Octrees (Meagher 1982), durch die eine Vereinfachung der originären Daten erreicht wird. Ein Octree basierend auf dem Datensatz aus [Abb. 1](#) ist im linken Teil von [Abb. 3](#) zu sehen.

Der Ray Casting Prozess wird lediglich für die Ecken einzelner Octreezellen durchgeführt. Als Ergebnis können drei Zustände unterschieden, die in der Mitte von [Abb. 3](#) zu sehen sind: eine Fläche ist von einem simulierten Standpunkt (gelber Kreis) aus vollständig sichtbar (grün), teilweise sichtbar (blau) oder nicht sichtbar (rot). Basierend auf einem Bewertungsschema erhält jeder Standpunkt eine Wertung, die auf der zuvor beschriebenen Sichtbarkeitsüberprüfung beruht. Zur Bestimmung einer optimalen Menge an Standpunkten wird

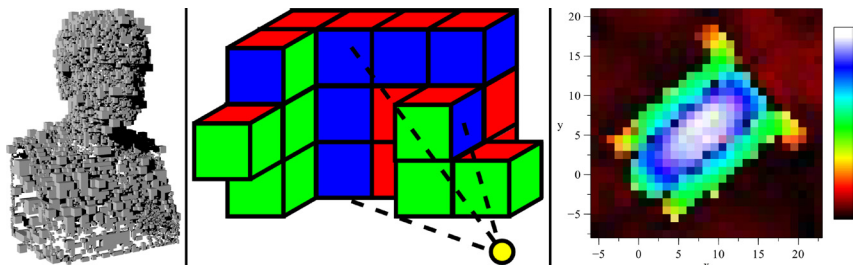


Abb. 3: Octree des Datensatzes aus [Abb. 1](#) (links). Beispiel der Flächensichtbarkeit von einem Standpunkt aus (Mitte) und Heat Map (rechts) potentieller Standpunkte (Mitte und rechts: Ososinski und Labrosse 2014)

ein Greedy-Algorithmus verwendet. Dieser selektiert zunächst den Standpunkt mit der höchsten Wertung und löscht die dazugehörigen Octreezellen aus dem Datenbestand. Anschließend erhalten alle verbleibenden Standpunkte neue Bewertungen, wobei das zuvor beschriebene Schema solange wiederholt wird, bis keine Zellen mehr vorhanden sind. Abb. 3 zeigt auf der rechten Seite eine Heat Map, welche die jeweiligen Bewertungen einzelner Standpunkte visualisiert. Das verwendete Farbschema kennzeichnet höchste Bewertungen mit weiß, wobei die niedrigsten Werte in dunkelrot eingefärbt sind.

Obwohl Ososinski und Labrosse (2014) räumliche Informationen als Datengrundlage ihres Algorithmus verwenden und die Vollständigkeit des resultierenden Standpunktplans überprüfen, wird die Frage, ob die Daten untereinander registriert werden können (z. B. Besl und McKay 1992), nicht berücksichtigt. Des Weiteren beschreibt der Übergang von einer Punktwolke in eine Baumstruktur eine Vereinfachung der ursprünglichen Geometrie. Wujanz und Neitzel (2016) stellen in Ihrem Beitrag einen Algorithmus vor, der kombinatorisch Lösungen generiert, die untereinander registrierbar sein müssen und so zu einer zusammenhängenden Punktwolke führen. Als Eingangsdaten werden triangulierte 3D-Modelle verwendet. Nach Definition potentieller Standpunkte wird, wie in den zuvor beschriebenen Algorithmen, ein Ray-Tracing durchgeführt, wie in Abb. 4a zu sehen ist. Anschließend wird die Punktwolke trianguliert und die Begrenzungslinie der resultierenden Vermaschung bestimmt. Diese ist in Abb. 4b durch eine rote Linie hervorgehoben. Anschließend wird diese auf die Eingangsdaten projiziert, was in Abb. 4c illustriert wird. Dadurch wird eine gemeinsame geometrische Grundlage geschaffen, die es ermöglicht, Überlappung zwischen simulierten Punktwolken durch Vergleich identischer Dreiecke zu bestimmen. Die Bestimmung einer Menge von optimalen Standpunkten erfolgt durch einen

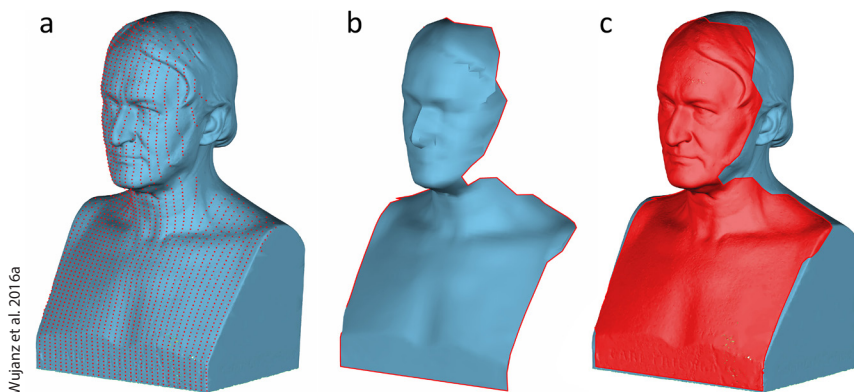


Abb. 4: a) Simulierte und b) triangulierte Punktwolke mit Begrenzung und c) Projektion der Begrenzung auf das Originalmodell

kombinatorischen Algorithmus. Dieser sucht so lange nach einer möglichen Lösung, bis eine definierte Abdeckung der Eingangsdaten erreicht wurde. Dadurch wird ein praktisches Problem während der Datenerfassung berücksichtigt, denn eine vollständige Erfassung eines Objektes ist auf Grund von Verschattungen oder Einschränkungen der Perspektive in der Regel nicht möglich.

4 Standpunktplanung im Kontext der Ingenieurgeodäsie

Im vorherigen Kapitel lag der Fokus auf der Suche nach einer Menge an Standpunkten, mit der ein Objekt oder Objektraum möglichst ökonomisch erfasst werden kann. Im Kontext der Ingenieurgeodäsie sind ökonomische Aspekte zwar ebenfalls von Bedeutung, jedoch spielen die Genauigkeit der Messungen und daraus abgeleitete Produkte eine übergeordnete Rolle. Folglich befasst sich dieser Abschnitt mit Problemstellungen aus dem Themenkomplex der Ingenieurgeodäsie bei Verwendung von terrestrischen Laserscannern.

4.1 Einfluss der Standpunktwahl auf die Präzision der Messungen

Im Rahmen von Ingenieurvermessungen gilt es, im Vorfeld zunächst Überlegungen bezüglich der optimalen Positionierung eines Sensors im Objektraum zu tätigen, um geforderte Genauigkeiten der Messungen sicherstellen zu können. Dazu sind detaillierte Informationen über die stochastischen Eigenschaften des zu simulierenden Laserscanners nötig, die es ermöglichen, die erreichbare Genauigkeit individueller Punkte in Abhängigkeit von einer gewählten Aufnahmekonfiguration abzuschätzen. Die kritischste Komponente in diesem Zusammenhang ist die reflektorlose Streckenmessung, die Schlüsseltechnologie, welche die Entwicklung von terrestrischen Laserscannern ermöglichte. Zahlreiche Einflussgrößen wirken auf die Präzision von reflektorlos gemessenen Strecken, zum Beispiel:

- die Distanz zwischen Scanner und Objekt (Elkhrachy und Niemeier 2006),
- die Oberflächeneigenschaften (Zámečníková et al. 2014),
- variierende Einfallswinkel (Soudarissanane et al. 2008).

Trotz enormen Forschungsbemühungen ist bisher kein Unsicherheitsmodell vorgestellt worden, das alle potentiellen Einflussgrößen berücksichtigt. Interessierten Lesern sei der Beitrag von Soudarissanane (2016) empfohlen, der dieses Thema in der gebührenden Tiefe diskutiert. Auch Holst et al. (2016) greifen dieses Thema auf. Ein neuer Weg, die stochastischen Eigenschaften von TLS zu beschreiben, wurde in Wujanz et al. (2016b) vorgestellt und zum Zwecke der Standpunktplanung eingesetzt. Die generelle Idee hinter dem vorgestellten

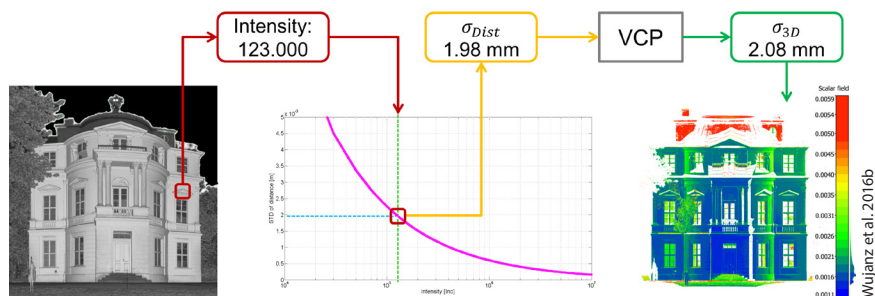


Abb. 5: Prozesskette des vorgestellten Verfahrens

stochastischen Modell ist es, die vom Scanner erfasste Signalstärke beziehungsweise die Intensität zu nutzen, um daraus Schlüsse über die Präzision einzelner Streckenmessungen zu ziehen. Kurzgesagt kann gesagt werden, dass ein stärkeres Signal zu präziseren Streckenmessungen führt und umgekehrt, was ein wohl-knowner Fakt im Themenbereich der Signalverarbeitung ist.

Abb. 5 zeigt die Prozesskette des Verfahrens. Im linken Teil der Abbildung ist ein Intensitätsbild einer Punktwolke in Graustufen zu sehen. Für jeden Punkt wird die gemessene Intensität dazu genutzt, um die Präzision der entsprechenden Streckenmessungen $\sigma_{Strecke}$ abzuschätzen. Dazu ist das in der Mitte abgebildete stochastische Modell notwendig. Ist die Präzision der Winkelmessung des Scanners bekannt, so kann im Rahmen einer Varianz-Kovarianzfortpflanzung (VKF) eine Abschätzung für die 3D-Präzision σ_{3D} eines Punktes erfolgen. Die Anwendung dieser Prozesskette auf alle Punkte eines Datensatzes führt zu einer „stochastischen“ Punktwolke basierend auf der Präzision der Streckenmessung, wie im rechten Teil der Abbildung zu sehen ist, und bildet somit den Grundstein für eine ingenieurgeodätische Standpunktplanung.

Es ist offensichtlich, dass das benötigte Ausgangsmodell des zu erfassenden Objekts zusätzlich zur geometrischen Beschreibung auch radiometrische Informationen enthalten muss. Ist dies nicht der Fall, so müssen Annahmen über einen einheitlichen realitätsnahen Reflektionskoeffizienten für das Objekt getroffen werden. Anschließend wird analog zu den im vorherigen Kapitel vorgestellten Verfahren eine Simulation einzelner Laserscans von zuvor definierten potentiellen Standpunkten aus durchgeführt. Daraufhin gilt es, den Signalverlust in Abhängigkeit von einer gewählten Aufnahmekonfiguration zu berechnen (Höfle und Pfeifer 2007). Ein relativer Verlust der Signalstärke führt folglich zu einem Verlust der Präzision einer Streckenmessung. Nachdem jedem Punkt stochastische Eigenschaften zugewiesen wurden, erfolgt die eigentliche Suche nach einem optimalen Standpunkt. Dafür werden die stochastischen Eigenschaften aller Punkte mit einer räumlichen Präzisionsvorgabe verglichen und bewertet. Des Weiteren gilt es, die jeweilige Modellabdeckung zu bestimmen, wozu

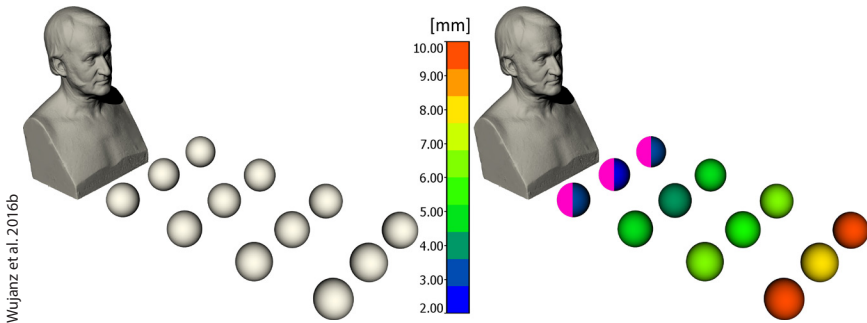


Abb. 6: Auf der linken Seite ist das Eingangsmodell mit simulierten Standpunkten zu sehen. Auf der rechten Seite ist die mittlere Präzision einzelner Standpunkte farbcodiert dargestellt.

das Verhältnis zwischen Ausdehnung eines simulierten Scans und der gesamten Modellfläche gebildet wird. Diese Größe dient als Vollständigkeitsmaß und kann als ökonomisches Attribut interpretiert werden. Liegt die Vollständigkeit eines Standpunktes unterhalb einer vordefinierten Größe, so kann dieser als unökonomisch angesehen werden und daher nicht die optimale Lösung darstellen. Diese kann nur ein Standpunkt sein, der sowohl eine ausreichende Abdeckung im Objektraum aufweist, als auch über eine höhere mittlere räumliche Präzision der einzelnen simulierten Punkte verfügt.

Abb. 6 zeigt auf der linken Seite das Eingangsmodell für eine Standpunktplanung, als auch potentielle Standpunkte, die mit Kugeln hervorgehoben sind. Auf der rechten Seite der Abbildung ist die mittlere räumliche Präzision der Standpunkte farblich codiert dargestellt. Die vermeintlich besten Ergebnisse liefern die drei Standpunkte, die dem Modell am nächsten liegen. Da die entsprechenden Vollständigkeitsmaße unterhalb einer vorgegebenen Grenze liegen (durch pinke Hälften gekennzeichnet), kann keiner dieser Aufnahmepunkte die optimale Lösung darstellen. Demnach stellt die dunkelgrüne Kugel den optimalen Standpunkt dar, da sowohl die Vollständigkeit gewährleistet ist, als auch Vorgaben bezüglich der Präzision erfüllt werden.

4.2 Einfluss der Standpunktwahl auf die Bestimmung von unbekannten Parametern

Werden Laserscanner zur Oberflächenanalyse eingesetzt, steht die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der aus der Punktwolke geschätzten Parameter des Oberflächenmodells im Vordergrund. Da ein Laserscan aus einer Vielzahl von Punkten besteht und die Anzahl an zu schätzenden Parametern in den meisten Fällen deutlich geringer ist, ist die Redundanz der Ausgleichung immer sehr hoch.

Dennoch hängt die Qualität der Parameterschätzung in Form der Genauigkeit und Zuverlässigkeit sehr stark von der Standpunktwahl des Laserscanners ab, da dieser über die Punktdichte und Punktverteilung auf der gemessenen Oberfläche entscheidet. Dies zeigen Holst (2015) sowie Holst et al. (2014) anhand der Redundanzanteile der einzelnen Scanpunkte.

Eng verbunden mit dem Einfluss des Laserscannerstandpunktes ist die Tatsache, dass das Modellwissen bei der Approximation von Laserscans meistens limitiert ist. Das bedeutet, dass das gescannte Objekt nicht vollständig bekannt ist aufgrund seiner komplexen Struktur oder aufgrund unbekannter Deformationen. Diese Deformationen können entweder Bestandteil der Aufgabenschreibung sein, z. B. bei einer Deformationsanalyse, oder sie sind für die Bearbeitung der Aufgabe irrelevant, z. B. wenn ein einfaches 3D-Modell eines Hauses basierend auf Laserscans erstellt werden soll. Unabhängig davon ist die Tatsache, dass dieses limitierte Modellwissen abhängig von der Standpunktwahl des Laserscanners zu einer verzerrten Parameterschätzung führen kann.

Dies kann anhand eines simulierten Beispiels näher erläutert werden: Eine teilweise deformierte Ebene wird von fünf Standpunkten gescannt, wobei jeder Standpunkt einen Abstand von 10 m zur Ebene hat. Abb. 7 zeigt Standpunkt 1

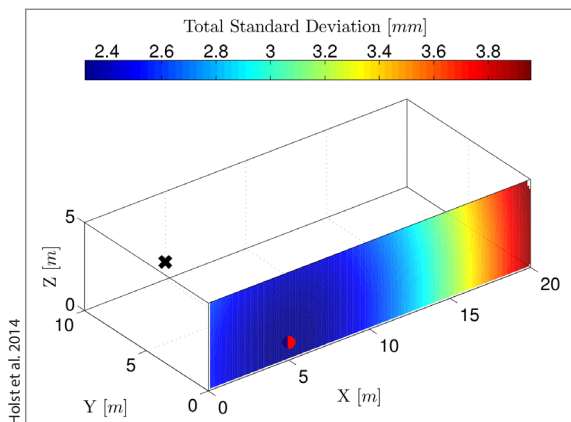


Abb. 7:
Simulierter Scan einer deformierten Ebene:
Messkonfiguration von Standpunkt 1 (schwarzes Kreuz, roter Punkt: Projektion des Standpunktes auf Ebene)

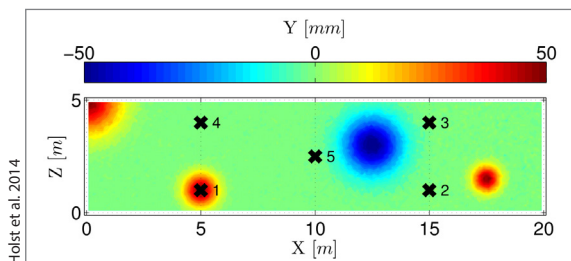


Abb. 8:
Simulierter Scan einer deformierten Ebene:
unbekannte Deformationen und Projektionen der fünf verschiedenen Standpunkte auf Ebene (schwarze Kreuze)

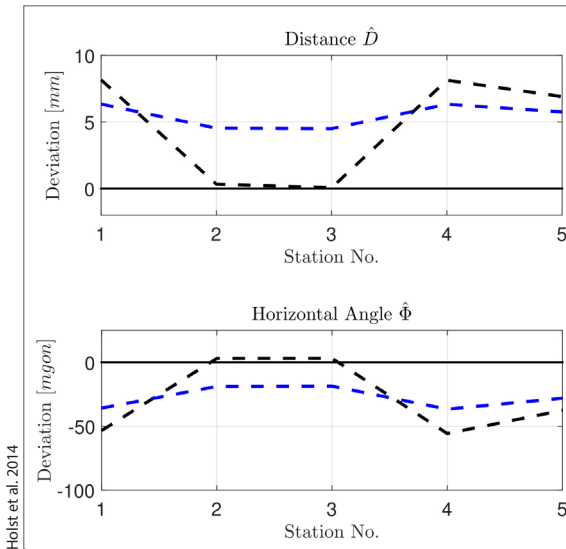


Abb. 9:
Simulierter Scan einer
deformierten Ebene:
geschätzte Parameter
abhängig vom Standpunkt
des Laserscanners (schwarz:
originale Punktwolke, blau:
ausgedünnte Punktwolke)

sowie die daraus resultierende Genauigkeit der Messpunkte basierend auf der Unsicherheit der Messelemente des Laserscanners Leica HDS 6100, ohne Berücksichtigung der Punktintensitäten. Abb. 8 stellt die unbekannten Deformationen sowie alle simulierten Standpunkte dar.

Da die Deformationen unbekannt sind, können Sie bei der Parameterschätzung der Ebenenparameter, dargestellt in Abb. 9, nicht berücksichtigt werden. Wie anhand der schwarz gestrichelten Linie zu sehen ist, weichen die geschätzte Distanz der Ebene sowie deren Horizontalwinkel von den Sollwerten ab. Diese Abweichungen hängen zudem signifikant vom Standpunkt des Laserscanners ab. Gleiches gilt für den hier nicht explizit dargestellten Vertikalwinkel der Ebene. Wird die Punktwolke hingegen auf ein regelmäßiges Raster ausgedünnt, ist die Abhängigkeit zum Standpunkt des Laserscanners kaum noch vorhanden (blau gestrichelte Linie). Demnach hat die Punkterteilung, die vom Standpunkt des Laserscanners abhängt, einen signifikanten Einfluss auf die Parameterschätzung bei der Approximation gescannter Oberflächen. Diese Aspekte werden tiefergehend in Holst (2015) sowie Holst et al. (2014) behandelt.

5 Fazit

Dieser Artikel stellt einen Zugang zum Thema der Standpunktplanung beim terrestrischen Laserscanning her. Es wird verdeutlicht, dass die optimale Planung der Laserscannerstandpunkte davon abhängt, welches Optimalitätskriterium

erreicht werden soll. Das gebräuchlichste Kriterium ist dabei die Ökonomie bzw. Wirtschaftlichkeit: In diesem Falle soll die Anzahl an Standpunkten möglichst klein gehalten werden. Nebenbedingungen können hier z.B. noch akzeptable Einfallswinkel des Messpunktes auf der Oberfläche oder nicht zu überschreitende Messdistanzen sein. Dieses Kriterium ist vor allem dann zielführend, wenn die Anforderung an die Genauigkeit des Laserscans im Hintergrund und die schnelle Erfassung der Oberfläche im Vordergrund steht.

Sollen hingegen auch gewisse Qualitätsmaße eingehalten werden, spielen Betrachtungen der Messkonfiguration und deren Auswirkung auf Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Laserscans eine größere Rolle. Zwei verschiedene Sichtweisen – der Einfluss der Standpunktwahl auf die Präzision der Streckenmessung sowie der Einfluss der Standpunktwahl auf die Bestimmung unbekannter Parameter – wurden hier betrachtet. Es ist erkenntlich, dass unterschiedliche Optimalitätskriterien auch zu unterschiedlichen Lösungen einer im jeweiligen Sinne optimalen Standpunktplanung führen. Eine tiefergehende Behandlung dieser Thematik – auch unter Betrachtung der Detektierbarkeit von Deformationen abhängig von der Standpunktwahl – ist in Wujanz et al. (2016b) zu finden.

Literatur

- Ahn, J.; Wohn, K. (2015): Interactive scan planning for heritage recording. *Multimedia Tools and Applications*, S. 1–21.
- Appel, A. (1968): Some techniques for shading machine renderings of solids. In: *Proceedings of the April 30–May 2, 1968, spring joint computer conference*, S. 37–45.
- Besl P. J.; McKay N. D. (1992): a method for registration of 3d shapes. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 14(2), S. 239–256.
- Chvatal, V. (1975): A combinatorial theorem in plane geometry. *Journal of Combinatorial Theory*, S. 39–41.
- Chvatal, V. (1979): A greedy heuristic for the set-covering problem. *Mathematics of operations research*, 4, S. 233–235.
- Elkhrachy, I.; Niemeier, W. (2006): Stochastic assessment of terrestrial laser scanner measurements to improve data registration. *ASPRS Annual Conference Reno, USA*.
- Höfle, B.; Pfeifer, N. (2007): Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(6), S. 415–433.
- Holst, C. (2015): Analyse der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis von Nivellements und terrestrischen Laserscans, Deutsche Geodätisch Kommission, Reihe C, 760, München.
- Holst, C.; Artz, T.; Kuhlmann, H. (2014): Biased and unbiased estimates based on laser scans of surfaces with unknown deformations. *Journal of Applied Geodesy*, 8(3), S. 169–184.

- Holst, C.; Neuner, H.; Wieser, A.; Wunderlich, T.; Kuhlmann, H. (2016): Calibration of terrestrial laser scanners. *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)*, 6/2016, S. 147–157.
- Meagher, D. (1982): Geometric modeling using octree encoding. *Computer graphics and image processing*, 19(2), S. 29–147.
- Ososinski, M.; Labrosse, F. (2014): Multi-viewpoint visibility coverage estimation for 3D environment perception volumetric representation as a gateway to high resolution data. In: *Computer Vision Theory and Applications*, S. 462–469.
- Soudarissanane, S. (2016): The Geometry of Terrestrial Laser Scanning – Identification of Errors, Modeling and Mitigation of Scanning Geometry. PhD Thesis, Delft University of Technology.
- Soudarissanane, S.; Lindenbergh, R. (2011): Optimizing terrestrial laser scanning measurement set-up. In: *ISPRS Laser Scanning 2011, Calgary*, Vol. XXXVIII, S. 1–6.
- Soudarissanane, S.; Lindenbergh, R.; Gorte, B. (2008): Reducing the error in terrestrial laser scanning by optimizing the measurement set-up. In: *XXI ISPRS Congress*, Beijing, China.
- Wujanz, D.; Burger, M.; Mettenleiter, M.; Neitzel, F. (2016b): Modellbasierte Standpunktplanung für terrestrische Laserscanner unter ingenieurgeodätischen Gesichtspunkten. In: *Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.), Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016*. Herbert Wichmann Verlag.
- Wujanz, D.; Holst, C.; Neitzel, F.; Kuhlmann, H.; Schwieger, V.; Niemeier, W. (2016a): Survey configuration for terrestrial laser scanning. *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)*, 06/2016, S. 158–169.
- Wujanz, D.; Neitzel, F. (2016): Model based viewpoint planning for terrestrial laser scanning from an economic perspective. In: *Proceedings of the ISPRS XXIII conference in Prague, Czech Republic*.
- Zámečníková, M.; Wieser, A.; Woschitz, H.; Ressler, C. (2014): Influence of surface reflectivity on reflectorless electronic distance measurement and terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Geodesy*, 8(4), S. 311–326.

Kontakt

Daniel Wujanz | Frank Neitzel

Technische Universität Berlin, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik

Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

daniel.wujanz@tu-berlin.de

Christoph Holst | Heiner Kuhlmann

Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation

Nußallee 17, 53115 Bonn

c.holst@igg.uni-bonn.de

Von der texturierten Punktwolke zum as-built BIM

Sören Loges | Jörg Blankenbach

1 Einleitung

In Deutschland nimmt die Bedeutung der Methode *Building Information Modeling* (BIM) stark zu. So hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Dezember 2015 einen Plan zur stufenweisen Einführung von BIM bei Planung und Umsetzung von Infrastrukturprojekten bis 2020 verabschiedet (BMVI 2015). BIM bezeichnet die vollständige digitale Abbildung eines Bauwerks im Computer mit allen funktionalen, technischen und physikalischen Eigenschaften über den gesamten Lebenszyklus inklusive der mit dem Bauwerk verbundenen Prozesse. Als neuartige, kooperative Planungsmethodik soll BIM es allen am Bauwerkslebenszyklus beteiligten Fachdisziplinen ermöglichen, Daten konsistent zu erfassen, zu verwalten und untereinander auszutauschen.

Die Grundlage für die digitale Beschreibung eines Bauwerks in BIM bildet ein in der Regel semantisches bauteilorientiertes Bauwerksmodell mit dreidimensionaler Geometriebeschreibung (Abb. 1), das idealerweise während der Planungsphase erzeugt und über den Lebenszyklus gepflegt wird. Handelt es sich jedoch nicht um einen Neubau sondern um eine Planung im Bestand, z. B. Sanierungs-, Umbau- oder Umnutzungsvorhaben, muss ein entsprechendes as-built BIM-Modell für die Planung erst aus dem Gebäudebestand erzeugt werden.

Für die Bestandsaufnahme, d. h. zur Erstellung des geometrischen Modells und in Teilen auch der Semantik, stehen verschiedene Aufmaßverfahren zur Verfügung, welche jedoch meist eher mit konventionellen zeichnungsorientierten CAD-Modellen und weniger mit den geforderten bauteilorientierten Modellen konform gehen. Zur as-built Dokumentation bietet sich u. a. die Erzeugung von Punktwolken (z. B. durch terrestrische Laserscanner oder Photogrammetrie) an, da diese je nach Punktdichte ein detailreiches Abbild des Bestandes darstellen. Forschungsbedarf besteht hier jedoch in der Entwicklung und Erprobung von Aufnahmeverfahren, die eine kontinuierliche und zeiteffiziente sowie eine detailreiche Erfassung des Bestandes ermöglichen.

Die eigentliche Ableitung des Modells erfolgt nach der Datenaufnahme in der Nachbearbeitung. Im Falle einer Punktwolke wird diese händisch strukturiert und Bauteile z. B. über die Extrusion von Schnittbildern erzeugt. Die Eingabe

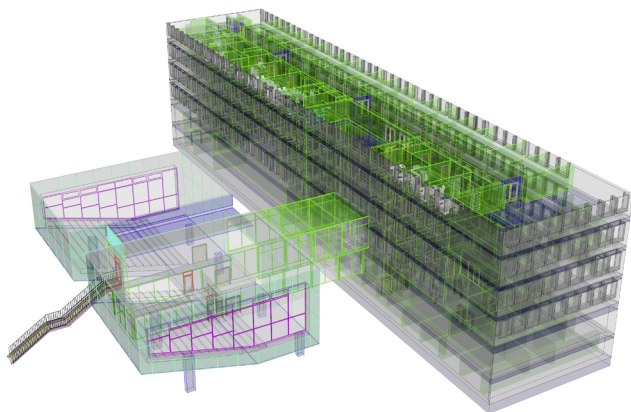


Abb. 1:
Bauteilorientiertes
BIM-Architektur-
modell des
Sammelbaus Bau-
ingenieurwesens der
RWTH Aachen

der weiteren Bauteileigenschaften erfolgt ebenfalls manuell. Diese größtenteils händische Erzeugung des bauteilorientierten Modells bedeutet einen hohen zeitlichen und personellen Aufwand. Diesen Prozess der Erzeugung des as-built Modells gilt es durch die Erforschung von höher automatisierten Verfahren effizienter zu gestalten.

2 Erzeugung von Punktwolken im Innenraum

Zur Bestandsdatenerfassung für das Gebäudeaufmaß können verschiedene originäre Messverfahren verwendet werden. Nach Blankenbach (2015) sind die vier für ein Gebäudeaufmaß grundsätzlichen Basisverfahren die Photogrammetrie, das terrestrische Laserscanning, die Tachymetrie und das elektronische Handaufmaß. Eine Diskussion der verschiedenen Messverfahren wird in Blankenbach (2015) gegeben und aus diesem Grund an dieser Stelle nicht weiter thematisiert.

Im BIM-Kontext wird insbesondere das terrestrische Laserscanning für die as-built Dokumentation angepriesen, welches den Begriff „Scan-to-BIM“ geprägt hat (Braunes 2014). Ein Grund dafür ist die Erfassung von räumlich hochaufgelösten Punktwolken, die eine flexible Erzeugung von Modellen unterschiedlicher Detaillierungsgrade ermöglicht. Hier werden terrestrische Laserscanner an verschiedenen Positionen im Gebäude aufgestellt und einzelne Scans durchgeführt, sodass eine umfassende Abdeckung des Gebäudes erreicht wird. In der Nachbearbeitung wird durch die Registrierung der einzelnen Punktwolken eine gemeinsame Punktwolke erzeugt.

Die Erzeugung von Punktwolken ist allerdings nicht unmittelbar an die Verwendung von terrestrischen Laserscannern geknüpft. Die Kategorie IMMS (Indoor Mobile Mapping Systeme) umfasst Systeme, die speziell für die Aufgabe

der Erfassung von Innenräumen entwickelt wurden. Diese Systeme gleichen den Mobile Mapping Systems (MMS) für den Außenbereich. Doch im Gegensatz zu diesen, welche die Möglichkeit der Nutzung von GNSS (Globales Navigationssatellitensystemen) besitzen, wird hier die Bestimmung der Position des Messsystems zum Beispiel über eine gemeinsame Auswertung der Daten einer Inertialmesseinheit und den gescannten Punkten realisiert. Zur Schätzung der Position werden sogenannten SLAM-Verfahren (Simultaneous Localization and Mapping) genutzt (Thomson et al. 2013).

Eine preiswerte Alternative ist die Erzeugung einer Punktwolke aus Bildern mittels der photogrammetrischen Methode Structure from Motion (SfM), die eine zügige mobile Datenaufnahme ermöglicht, bereits eine zusammenhängende Punktwolke liefert und orientierte Bilder zur weiteren Analyse bereitstellt. Der SfM-Prozess beschreibt die Erzeugung von 3D-Oberflächen aus Bildern unterschiedlicher Perspektiven. Zur Erzeugung der 3D-Oberfläche ist lediglich die Eingabe von sich überlappenden Bildern notwendig. Hierzu ist bereits bei der Aufnahme der Bilder darauf zu achten, den Überlappungsbereich der Aufnahmen möglichst groß zu wählen. Die Berechnung von 3D-Koordinaten, der Kamerapositionen und -orientierungen wird automatisch gelöst. Hierzu wird eine hoch redundante und iterative Prozedur der Bündelausgleichung verwendet, die auf automatisch aus den Bildern extrahierten Features beruht. Die anschließende Bildzuordnung (Dense Image Matching) erzeugt eine dichte Punktwolke auf Grundlage der Ergebnisse der Bündelausgleichung (Westoby et al. 2012).

Zur Erfassung von Innenräumen können heute auch Tiefenkameras verwendet werden, welche unter anderem aus ihrem Einsatz in Spielekonsolen bekannt sind. Mit dem Tango-Projekt von Google (Google 2016) wird eine solche Tiefenkamera in Smartphones oder Tablets integriert und so dem Massenmarkt zugänglich gemacht. Diese Kameras arbeiten nach dem Time-of-Flight-Prinzip, weshalb sie auch als ToF-Kameras bezeichnet werden. Sie bestehen aus einer Beleuchtungseinrichtung und einem Sensor zur Messung der Laufzeit. Die Laufzeit des Lichtes kann über die Verwendung eines Lichtpulses oder über die kontinuierliche Beleuchtung und Messung des Phasenunterschiedes von Ausgangs- und Eingangssignal realisiert werden. Dies geschieht für jedes Pixel des Sensors. Die Laufzeiten werden in Distanzen umgerechnet, sodass ein räumliches Abbild des Objektes entsteht (Foix et al. 2011).

3 Der Weg von der Punktwolke zum as-built BIM

Die Erzeugung eines as-built BIM-konformen Modells kann in vier Teilaufgaben gegliedert werden. Diese setzen sich aus der Datenaufnahme, Segmentierung, Klassifizierung und der Zuordnung der klassifizierten Elemente samt Objekt-

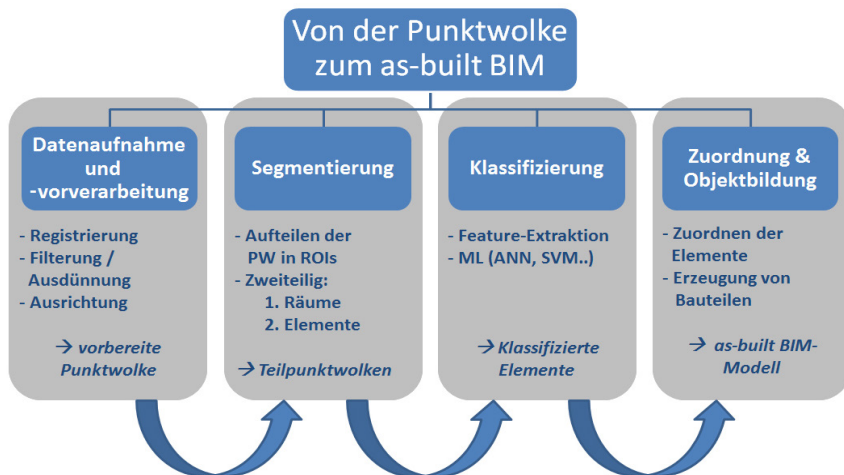


Abb. 2: Die vier Teilaufgaben zur Erzeugung eines as-built Modells aus einer 3D-Punktwolke

bildung zusammen (Abb. 2). Im Folgenden sollen die einzelnen Schritte erläutert und der aktuelle Forschungsstand sowie die eigenen Ansätze zur Umsetzung der Aufgaben präsentiert werden.

3.1 Datenaufnahme und Datenvorprozessierung

Neben der reinen Datenaufnahme (siehe Kap. 2) beinhaltet der erste Schritt auch die erste Verarbeitung der Daten. Diese kann die Registrierung einzelner Punktwolken sowie die Filterung und/oder Ausdünnung der Punktwolken umfassen. Ein weiterer vorbereitender Schritt ist das Ausrichten der Punktwolke. Neben der Horizontierung hat das Ausrichten der Punktwolke das Ziel, diese so im Raum zu drehen, dass die Hauptachsen des Gebäudes parallel zu den Koordinatenachsen des Koordinatensystems der Punktwolke liegen. Vorausgesetzt werden dabei dominierende orthogonale Gebäudeachsen und Raumanordnun-

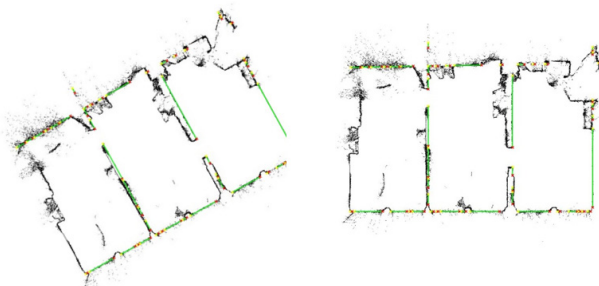


Abb. 3:
Ausrichten einer Punktwolke

gen (Manhattan-Geometrie), was jedoch in der Praxis für die meisten Bestandsgebäude zutrifft (Abb. 3).

Die Ausrichtung der Punktwolke kann über die iterative Analyse der Normalen der Punkte einer Punktwolke geschehen (Khosravani 2016). Eine weitere hier verwendete Methode ist die Analyse von Schnittbildern mittels einer Hough-Transformation (Hough 1962). Es werden Schnittbilder der Punktwolke durch ihre XY-Ebene, XZ-Ebene und durch ihre YZ-Ebene erzeugt und mittels einer Hough-Transformation Linien in den Bildern detektiert. Anhand der dominierenden Linien erfolgt eine iterative Drehung der Punktwolke.

Im Anschluss erfolgt nach der Drehung die höhenmäßige Ausrichtung der Punktwolke. Hierzu kann ein Histogramm der Höhenwerte analysiert werden. In der Regel sind im Innenraum drei dominierende lokale Maxima im Histogramm zu erkennen. Das erste und das letzte Maximum werden durch die Boden- und Deckenebene erzeugt. Ein weiteres entsteht häufig auf der Höhe von Tischen und Möbeln. Es folgt eine Translation der Punktwolke in Z-Richtung, sodass die Höhenwerte der Bodenpunkte den Wert null annehmen. Ein bereits korrigiertes Histogramm der Höhenwerte eines Raumes ist in Abb. 4 dargestellt.

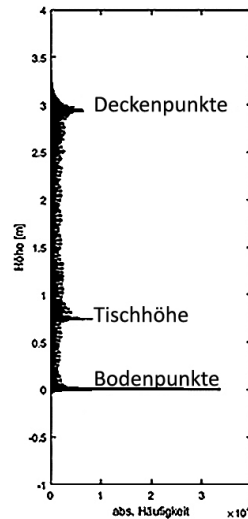


Abb. 4:
Beispielhafte Verteilung der Höhenpunkte eines Raumes der SfM-Punktwolke

3.2 Segmentierung

Im nächsten Arbeitsschritt erfolgt die Segmentierung der Punktwolke. Diese kann in die grobe und feine Segmentierung unterteilt werden. In der groben Segmentierung wird zunächst die Punktwolke in die einzelnen Räume unterteilt. Hierzu sind verschiedene Ansätze in der Literatur zu finden. In Macher et al. (2015) wird hierzu ein Binärbild aus einem Schnittbild der Punktwolke auf Deckenhöhe erzeugt. Das erzeugte Binärbild zeigt eindeutig die Umrisse der einzelnen Räume ohne Raumübergänge an, sodass die Räume über ein Region Growing bestimmt werden können. In Ochmann et al. (2014) werden Ebenen in der Punktwolke erkannt, in die Horizontalebene projiziert und miteinander verschnitten. Die Lösung von Mura et al. (2014) beruht ebenfalls auf der Extraktion von vertikalen Ebenen und der Projizierung dieser in der Horizontalebene. Zur Lösung der Segmentierung werden die Schnittpunkte der projizierten Ebenen über ein angelegtes Raster gewichtet.

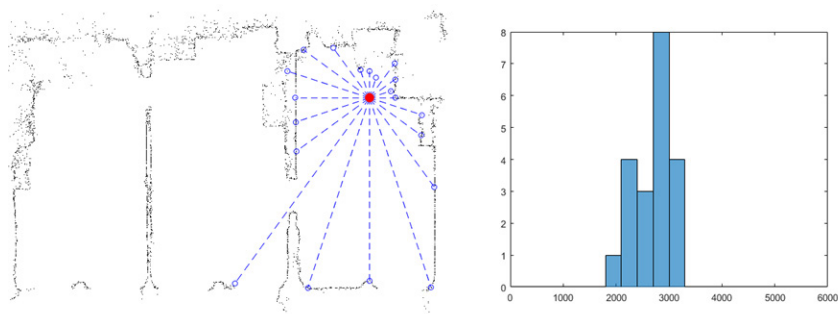


Abb. 5: Verschneidung der Zielstrahlen (links), Histogramm der X-Werte (rechts)

Der hier vorgestellte Ansatz zur Segmentierung der Punktwolke basiert auf der Analyse von Histogrammen zur Detektion von Raumübergängen. Er beruht auf der Tatsache, dass sich einzelne Räume durch die Verteilung ihrer Punkte signifikant voneinander abgrenzen. Zusätzlich zur Punktwolke wird die bekannte Trajektorie der Bewegung bei der Datenaufnahme als weitere Information genutzt. Die Grundlage des Ansatzes bildet eine Grundrissdarstellung der Punktwolke durch die Erzeugung eines Schnittbildes in der Horizontalebene.

Im ersten Schritt werden von jeder Aufnahmeposition n kreisförmig angeordnete Zielstrahlen mit dem erzeugten Schnittbild verschritten. Die X- und Y-Komponenten der Endpunkte der Zielstrahlen werden jeweils in Histogrammen getrennt zusammengefasst. In Abb. 5 ist dies beispielhaft für 20 Zielstrahlen und dem dazugehörigen Histogramm der X-Werte dargestellt.

Für die Robustheit gegenüber Ausreißern, welche aufgrund der Streuung der Punktwolke sowie Tür- oder Fensteröffnungen entstehen können, wird nur ein Bereich betrachtet in dem 50 % der Werte liegen. Hierzu werden die beiden Verteilungen der X- und Y-Werte durch statistische Lagemaße beschrieben. Diese werden durch die Quartile Q1 und Q3 realisiert.

Sequentiell werden die Quartile der einzelnen Aufnahmepositionen analysiert und übereinstimmende Histogramme zu einem Raumhistogramm addiert. Stimmt das Histogramm der aktuellen Position mit dem Raumhistogramm der bisherigen Positionen ausreichend überein, wird das Histogramm der aktuellen Position zu dem Raumdiagramm addiert und mit der nächsten Position fortgefahren. Übersteigt die Differenz zwischen aktuellem Histogramm und Raumdiagramm einen definierten Schwellenwert, wird das Abbruchkriterium erreicht. An dieser Stelle wird ein Raumübergang detektiert und ein neuer Raum begonnen. Die Wahl des Abbruchkriteriums ist somit entscheidend für die erfolgreiche Detektion von Raumübergängen. Für die Quartile Q1 und Q3 werden Konfidenzintervalle festgelegt. Der Bereich wird definiert über den Interquartilsabstand und einem Maßstab m , welcher den Bereich skaliert und maßgeblich die

Schärfe der Trennung steuert. Erfahrungen aus verschiedenen Testdaten zeigen, dass für m Werte zwischen 0,5 und 0,8 gute Ergebnisse liefern:

$$\left[Q1_{\text{Raum}} - \text{Interquartilsabstand}_{\text{Raum}} \cdot m, Q1_{\text{Raum}} + \text{Interquartilsabstand}_{\text{Raum}} \cdot m \right]. \quad (1)$$

Das Ergebnis der Segmentierung ist eine nach Räumen aufgeteilte Punktwolke. Zusätzlich werden auch die Raumübergänge näherungsweise bestimmt und die Aufnahmepositionen den Räumen zugeordnet.

In der feinen Segmentierung wird der Raum weiter in seine Bestandteile wie Wände, Decke, Boden, Fenster und Türen segmentiert. Die Segmentierung von Boden- und Deckenpunkten kann über die Analyse eines Histogramms der Punkthöhen (siehe Abb. 4) erreicht werden. Wandsegmente lassen sich über die Analyse eines horizontalen Schnittbildes bestimmen (Okorn et al. 2010). Fenster und Türen können als leere Flächen innerhalb der Wandebenen detektiert werden (Adan und Huber 2011). Im hier verwendeten Ansatz werden die maßgeblichen Flächen eines Raumes extrahiert. Es erfolgt eine Zerlegung des Raumes in Schichten in Richtung der Hauptrichtungen (Abb. 6). Die in den Schichten enthaltenen Punkte werden zunächst in den Bildraum transformiert, sodass kleine Lücken innerhalb von Flächen mittels morphologischer Operatoren geschlossen werden können. Mittels eines Boundary-Tracing Algoritmus wird das umschließende Polygon einer Fläche bestimmt. Anhand des berechneten Flächeninhalts des Polygons werden nun die dominierenden Flächen, d. h. Flächen mit einer vorherdefinierten Mindestgröße, ausgewählt (Abb. 7). Aus den extrahierten Flächen lassen sich im nächsten Schritt, die für die Klassifizierung notwendigen Features ableiten.

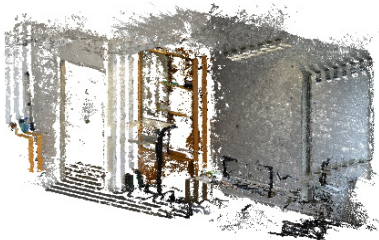


Abb. 6:
Punktwolke zerlegt
in Schnitte

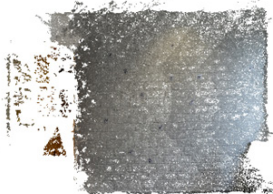


Abb. 7:
Schnitt (links),
Analyse des
Schnitts nach Flä-
chen mit Mindest-
größe (rechts)

3.3 Klassifizierung

Die Klassifizierung hat das Ziel, aus dem Ergebnis der Feinsegmentierung die Gebäudekomponenten und deren relevanten Eigenschaften zu erkennen und sie so mit einer für das as-built Modell notwendigen Semantik zu versehen. Zur Klassifizierung von Objekten ist die Extraktion von geometrischen und semantischen Informationen sowie die Behandlung von Verdeckungen und anderen Störungen in der Punktwolke notwendig (Volk et al. 2014). Hierbei wird zwischen datenbasierten Ansätzen, welche die vorliegende Eigenschaften von Objekten (z. B. Farbe, Form etc.) nutzen, und modellbasierten Ansätze, welche vorgegebenes Wissen (z. B. über den Aufbau eines Gebäudes wie Nachbarschaften) nutzen, unterschieden. In der Literatur werden beide Ansätze häufig kombiniert. Adan und Huber (2011) klassifizieren rechteckige Lücken in den Wandebenen mittels Support Vector Machines (SVM) zu Fenstern und Türen. Xiong et al.

(2015) erweitern diesen Ansatz und nutzen auch die Informationen von Nachbarschaften zur Klassifizierung. Eine regelbasierte Klassifizierung wird in Wang et al. (2015) vorgestellt.

Anhand der extrahierten datenbasierten oder modellbasierten Attribute eines Objektes erfolgt seine Klassifizierung. Ein einfaches Beispiel zur Umsetzung der Klassifizierung ist die Verwendung eines Entscheidungsbaums (Abb. 8) mit im Vorfeld definierten Regeln. Entscheidungsbäume bestehen aus hierarchisch aufeinander folgenden Regeln. Für jedes Attribut

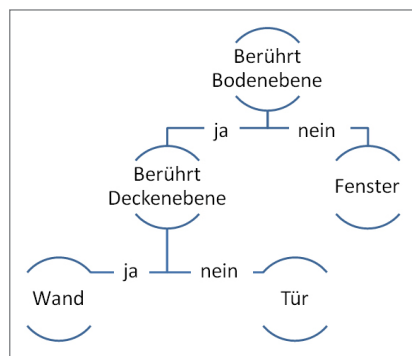


Abb. 8: Vereinfachter Aufbau eines Entscheidungsbaums

eines Objektes wird eine Entscheidung getroffen, sodass schließlich das Objekt anhand seiner Attribute einer Klasse zugeordnet werden kann.

Sind die Regeln zur Klassifizierung nicht klar definierbar, bieten sich Methoden des maschinellen Lernens an. Hier wird anhand von im Vorfeld erhobener Daten (Attribute und Klasse eines Objektes) eine Maschine angelernt, sodass die Klassifizierung anhand von Testdaten erlernt wird. Veranschaulicht werden kann dieses Vorgehen an einem künstlichen neuronalen Netz (KNN). KNN haben ihr Vorbild im Aufbau des menschlichen Gehirns, wo einzelne Synapsen untereinander kommunizieren. Der Aufbau von künstlichen neuronalen Netzen besteht aus Knoten, die über Kanten miteinander verbunden sind. Die Knoten bilden Schichten. Das Netz besteht mindestens aus einer Eingabeschicht, einer oder mehreren verdeckten Schichten und einer Ausgabeschicht. Die Knoten

nehmen über die Kanten Informationen entgegen und geben diese in modifizierter Art an andere Knoten weiter. Die Kanten drücken die Verbindung zwischen zweier Knoten aus. Die Stärke der Verbindung wird über eine Gewichtung festgelegt. Das angelernte Wissen eines Netzes ist in diesen Gewichten gespeichert. In der Regel besteht das Lernen eines Netzes aus der Veränderung dieser Gewichte (Reif 2000). In Abb. 9 ist beispielhaft ein neuronales Netz zur Klassifizierung von Bauteilen skizziert. Der Eingabeschicht werden die Attribute des Objekts übergeben und die Ausgabeschicht gibt die Klasse des Objekts zurück. In der verdeckten Schicht werden anhand von erlernten Gewichten die Informationen so verarbeitet, dass das Neuron der zugehörigen Klasse in der Ausgabeschicht aktiviert wird.

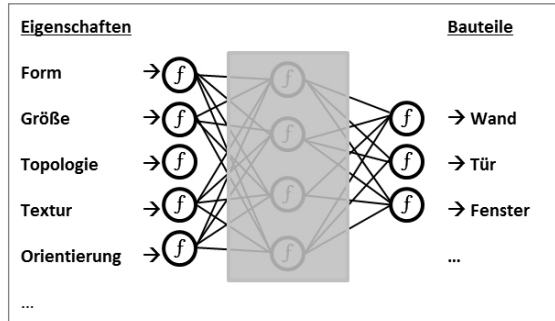


Abb. 9: KNN zur Klassifizierung von Bauteilen

Bei Betrachtung der eingeführten Attribute, wird deutlich, dass auch hier der datengetriebene Ansatz und der modellgetriebene Ansatz verschmelzen. Neben dem aus Beispieldaten erlernbaren Wissen, steht für die Klassifizierung auch das Modellwissen in Form von Restriktionen innerhalb eines Gebäudes sowie das Wissen über konkrete Attribute von Bauteilen aus den Bauteilkatalogen zur Verfügung. Dieses Wissen gilt es so aufzubereiten, dass es die Klassifizierung ergänzt und eine Steigerung der Zuverlässigkeit bewirkt.

3.4 Zuordnung

Im Anschluss an die Klassifizierung erfolgt die Zuordnung und Objektbildung. Hierzu werden die klassifizierte Elemente wieder zu einem Gebäudemodell, im vorliegenden Fall einem bauteilorientierten Modell, zusammengesetzt (Abb. 10). Die Ebenen der Wandflächen einzelner Räume werden einander zugeordnet und schließlich Wände erzeugt, die miteinander

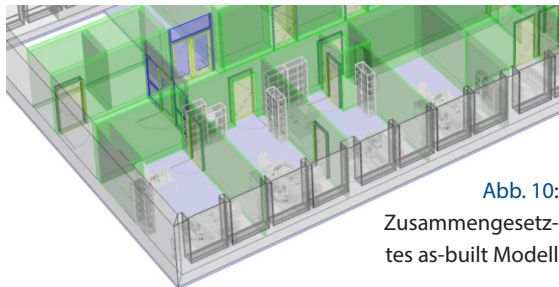


Abb. 10:
Zusammengesetztes as-built Modell

verschnitten werden. Für die detektierten Fenstern und Türen werden anhand ihrer Klassenattribute und Geometrien Bauteile aus dem Katalog ausgewählt und innerhalb der Wände platziert. Das gleiche Vorgehen gilt für die weiteren Bauteile.

4 Vergleich der Segmentierung eines terrestrischen Laserscans mit einer SfM Punktwolke

Getestet wurden die Ansätze zur Segmentierung in einem Szenario von drei benachbarten Büroräumen, welche über zwei Türöffnungen miteinander verbunden sind. Die durch SfM erzeugte Punktwolke wurde aus 138 Aufnahmen gerechnet. In Abb. 11 ist die erzeugte SfM-Punktwolke und die während der Aufnahme zurückgelegte Trajektorie im Schnittbild dargestellt. Die Erzeugung der TLS-Punktwolke wurde mit dem Laserscanner Riegl VZ400 in sechs Scanpositionen durchgeführt. Die verwendete Trajektorie zwischen den Scanpositionen wurde nicht aufgezeichnet sondern händisch genähert erzeugt.

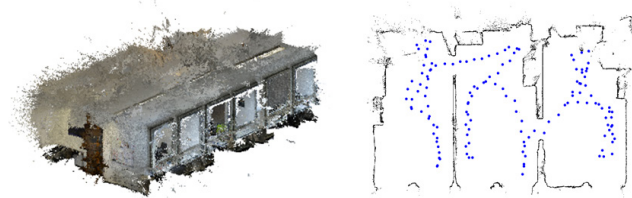


Abb. 11: Erzeugte Punktwolke (links), Trajektorie der Aufnahme (rechts)

Für die Segmentierung wurden 200 Zielstrahlen pro Kamera- bzw. Scannerposition – im Folgenden kurz als Aufnahmeposition bezeichnet – genutzt und der Maßstab m mit 0,6 festgesetzt. In Abb. 12 ist das Ergebnis der Segmentierung, die bestimmten Raumhistogramme sowie das Schnittbild mit den eingefärbten Schnittpunkten, dargestellt. Die Histogramme liefern eine eindeutige Beschreibung der Räume, obwohl die Punktwolke teils verrauscht ist. Anhand der Histogramme kann so bereits ein stark vereinfachtes Modell der Räume erzeugt werden.

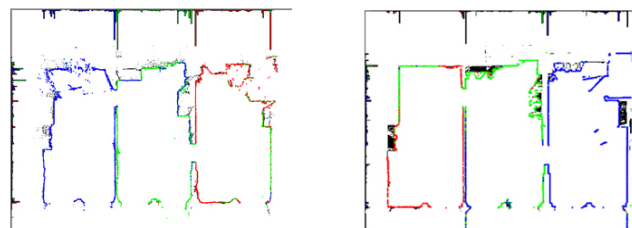


Abb. 12: Raumhistogramme und eingefärbte Schnittpunkte. Rechts: SfM-Punktwolke, links: TLS-Punktwolke

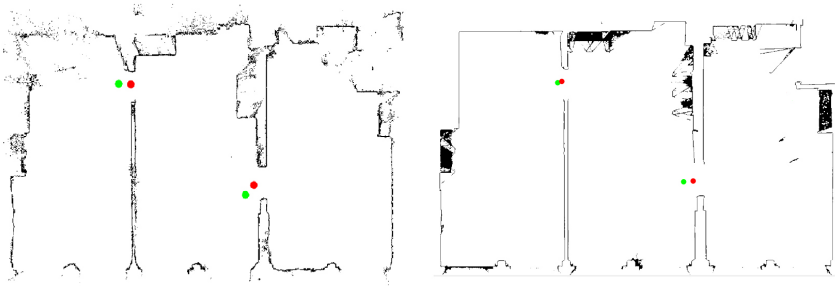


Abb. 13: Detektierte Räumübergänge (rot = letzte Position, grün = erste Position)

In Abb. 13 sind die detektierten Raumübergänge aufgetragen, mit rot für die jeweils letzte und grün für die erste Aufnahme-position eines Raumes. Anhand dieser Positionen ist eine erste Approximation der Raumübergänge möglich. In der groben Segmentierung ist das Ergebnis trotz des deutlich erkennbaren Rauschens in der SfM-Punktwolke (Abb. 13) für die beiden Punktwolken nahezu gleich.

In Abb. 14 ist das Ergebnis der Fernsegmentierung eines Wandabschnittes dargestellt. Hier zeigen sich deutlich die Unterschiede der beiden Messmethoden. Ist das Rauschen in der SfM-Punktwolke deutlich erkennbar (Abb. 14 links), was sich unmittelbar auf die Form der segmentierten Flächen auswirkt, so sind die Geometrien in der TLS-Punktwolke trennscharf abgebildet (Abb. 14 rechts). Durch die einzelnen Aufnahme-positionen des terrestrischen Laserscanners (zwei pro Raum) kommt es jedoch zu Verdeckungen in den segmentierten Flächen. Auch wird die Fläche, des in der Mitte platzierten Schrankes weniger gut erkannt, was unter anderem auf die Glastüren und dem unregelmäßigen Inhalt zurückzuführen ist.

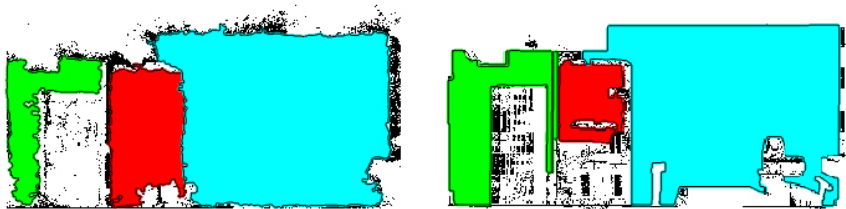


Abb. 14: Segmentierte Flächen. Links: SfM-Punktwolke, rechts: TLS-Punktwolke

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag geht auf das grundsätzliche Konzept der as-built Modell Erzeugung aus einer Punktwolke ein. Zur Automatisierung des Prozesses benötigt es der

Umsetzung der vier maßgeblichen Schritte: Datenaufnahme, Segmentierung, Klassifizierung und Zuordnung/Bauteilerzeugung. Diese Schritte werden im Einzelnen erläutert und Ansätze zu ihrer Lösung dargestellt. Die Schritte der Segmentierung werden anhand zweier unterschiedlicher Punktwolken, eine erzeugt mittels eines terrestrischen Laserscanners und die andere erzeugt mittels Structure from Motion, der gleichen Szene getestet. Das Ergebnis zeigt, dass der Segmentierungsansatz für beide Punktwolken gute und sehr ähnliche Ergebnisse produziert. Des Weiteren werden die Unterschiede der beiden Messverfahren im Ergebnis der Segmentierung deutlich. Die SfM-Lösung liefert eine komplettere aber verrauschte und die TLS-Lösung liefert eine rauscharme aber mit Verdeckungen versehene Punktwolke.

Im nächsten Schritt sollten auch die Punktwolken anderer Messverfahren (z. B. einer ToF-Kamera) betrachtet und die Lösungen hinsichtlich ihrer Genauigkeit für die Bauteilerzeugung untersucht werden. Die Klassifizierung der segmentierten Elemente sollte dahingehend erforscht werden, welche Features/Attribute aus den Segmenten extrahiert werden können und wie das explizite Modellwissen aus den Bauteilkatalogen mit in die Klassifizierung eingebracht werden kann.

Literatur

- Adan, A.; Huber, D. (2011): 3D reconstruction of interior wall surfaces under occlusion and clutter. In: 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), 2011 International Conference, S. 275–281. IEEE.
- Blankenbach, J. (2015): Bauwerksvermessung für BIM. In Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Praxis, S. 247–254. Heidelberg: Springer Verlag.
- Braunes, J. (2014): Von der Punktwolke zum Building Information Model (BIM). Konsequenzen und Wege für die Bestandserfassung. VDVmagazin, 2/14, S. 132–136.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015, Dezember): Stufenplan Digitales Planen und Bauen – Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff: 5.10.2016.
- Foix, S.; Alenya, G.; Torras, C. (2011): Lock-in time-of-flight (ToF) cameras: a survey. IEEE Sensors Journal, 11(9), 1917–1926.
- Google (2016): Project Tango. <http://get.google.com/tango>, letzter Zugriff 10.10.2016.
- Hough, P. V. C. (1962): Method and means for recognizing complex patterns. Google Patents.
- Khosravani, A. M. (2016): Automatic modeling of building interiors using low-cost sensor systems. Dissertation, Universität Stuttgart.

- Macher, H.; Landes, T.; Grussenmeyer, P. (2015): Point clouds segmentation as base for as-built BIM creation. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W3, 191–197.
- Mura, C.; Mattausch, O.; Jaspe Villanueva, A.; Gobbetti, E.; Pajarola, R. (2014): Automatic room detection and reconstruction in cluttered indoor environments with complex room layouts. *Computers & Graphics*, 44, 20–32.
- Ochmann, S.; Vock, R.; Wessel, R.; Tamke, M.; Klein, R. (2014): Automatic Generation of Structural Building Descriptions from 3D Point Cloud Scans. In: *GRAPP 2014 – International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*. Lisbon, Portugal: SCITEPRESS.
- Okorn, B.; Xiong, X.; Akinci, B.; Huber, D. (2010): Toward automated modeling of floor plans. In *Proceedings of the symposium on 3D data processing, visualization and transmission*, Bd. 2.
- Reif, G. (2000): *Moderne Aspekte des Wissensverarbeitung – Ein interaktiver Lernbehelf für das Web Based Training*. Diplomarbeit, TU Graz.
- Thomson, C.; Apostolopoulos, G.; Backes, D.; Boehm, J. (2013): Mobile Laser Scanning for Indoor Modelling. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W2, 289–293.
- Volk, R.; Stengel, J.; Schultmann, F. (2014): Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127.
- Wang, C.; Cho, Y.K.; Kim, C. (2015): Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications. *Automation in Construction*, 56, 1–13.
- Westoby, M. J.; Brasington, J.; Glasser, N. F.; Hambrey, M. J.; Reynolds, J. M. (2012): ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.
- Xiong, X.; Adan, A.; Akinci, B.; Huber, D. (2013): Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in Construction*, 31, 325–337.

Kontakt

Sören Loges | Jörg Blankenbach

RWTH Aachen University

Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme

Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen

loges@gia.rwth-aachen.de

Session 2 – Flächenhafte Deformationsanalysen

TLS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von Standardsoftware

Christoph Holst | Berit Schmitz | Heiner Kuhlmann

1 Motivation

Terrestrische Laserscanner werden mittlerweile für eine Vielzahl unterschiedlicher Deformationsanalysen eingesetzt. Beispiele sind die Überwachung von Brücken, Schleusen, Staudämmen, Türmen, Tunneln und Radioteleskopen. Neuner et al. (2016) und Mukupa et al. (2016) liefern einen detaillierten Überblick über diese verschiedenen Anwendungen.

Während das Vorgehen bei der Aufnahme der Laserscans kaum zwischen den verschiedenen Anwendungen und Autoren variiert, hängt die Strategie bei der Auswertung sehr stark vom Anwender ab. Dies ist damit zu begründen, dass bei der Auswertung von Laserscans zur Deformationsanalyse der schon viel beschworene Paradigmenwechsel in der Ingenieurgeodäsie von punktwisen Messungen auf flächenhafte vollzogen wird: Es liegen keine signalisierten Einzelpunkte in zwei Epochen vor, deren Differenz auf Signifikanz geprüft werden kann. Stattdessen sind die Deformationen aus zwei Punktwolken willkürlich verteilter Einzelpunkte abzuleiten. Der in Heunecke et al. (2013) beschriebene Zwei-Epochentest identischer Messpunkte ist daher nicht ohne weiteres durchführbar. Vielmehr ist in jedem Fall eine Vorverarbeitung und Modellierung der erstellten Punktwolke nötig, um Punktkorrespondenzen herzustellen und allenfalls im Anschluss einen Zwei-Epochentest durchführen zu können, um über das Vorliegen einer Deformation entscheiden zu können. Wie diese Vorverarbeitung und Modellierung auszusehen hat, ist bisher jedoch nur sehr anwendungs- und anwenderbezogen zu beantworten.

Das prinzipielle Vorgehen ist in [Abb. 1](#) veranschaulicht. Bestandteil dieses Vorgehens ist die epochenweise Datenaufnahme, Registrierung und evtl. auch die Georeferenzierung sowie die Vorverarbeitung der Punktwolke. Diese Prozessierungsschritte sind zwar auch mitentscheidend für die Aussagekraft und Signifikanz einer Deformationsanalyse, werden aber folgend nicht weiter betrachtet. Der Artikel fokussiert stattdessen ausschließlich die Methoden der Punktwolkenvergleiche und deren Eignung zur TLS-basierten Deformationsanalyse.

Soll zur Analyse der Deformation eine Standardsoftware genutzt werden, bieten sich verschiedene Möglichkeiten, um Punktwolken zu vergleichen. Drei

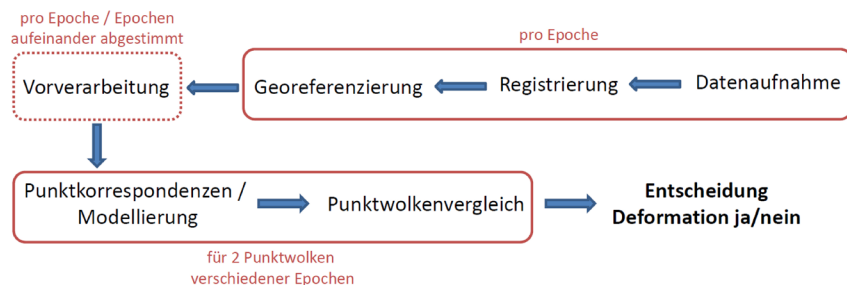


Abb. 1: Vorgehen bei der Messung und Auswertung von Deformation basierend auf terrestrischen Laserscans

gängige Softwarepakete zum Vergleich zweier Punktwolken sind Geomagic Studio/Control (3DSystems), 3DReshaper (Hexagon Metrology) und die Open Source Freeware CloudCompare (www.danielgm.net/cc). In allen drei Paketen können Punktwolken entweder direkt oder aber über eine vorherige Vermaischung, Glättung oder Blockbildung miteinander verglichen werden. Auf diese Schritte wird in [Kap. 2](#) und [Kap. 3](#) detaillierter eingegangen.

Zur TLS-basierten Deformationsanalyse steht also eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung, die auch in Softwarepaketen implementiert sind. Daher stellt sich die Frage, welche Vor- und Nachteile die einzelnen Methoden haben und inwieweit sie sich eignen, Deformationen eines Objekts tatsächlich erwartungstreu, zuverlässig und evtl. sogar statistisch gesichert, wie es bei der Deformationsanalyse von Einzelpunkten möglich ist, aufzudecken. Dieser Frage wird im vorliegenden Beitrag nachgegangen. Es wird analysiert, inwieweit Starrkörperbewegungen und Verformungen eines Objekts in den Punktwolkenvergleichen ersichtlich werden und ob sich die Größenordnung der Deformation daraus (signifikant) ableiten lässt. Als Beispiel dient dabei eine deformierte Holzplatte von $1,50 \times 1,50$ m Größe. Die zugrunde liegenden Methoden werden in [Kap. 3](#) erläutert, [Kap. 4](#) bespricht das Beispiel und [Kap. 5](#) fasst die Ergebnisse zusammen.

2 TLS-basierte Deformationsanalyse

Prinzipiell ist der Vergleich zweier Punktwolken in fünf verschiedenen Deformationsmodellen möglich, wie von Ohlmann-Lauber und Schäfer (2011) in [Abb. 2](#) kategorisiert. Punktbasierte Modelle können nur eingesetzt werden, wenn der Laserscanner in beiden Epochen vom selben Standpunkt mit identischer Winkelauflösung beobachtet, damit unmittelbar je zwei Punkte verglichen werden können. In punktwolkenbasierten Modellen werden Beziehungen zwischen zwei Punktwolken, z. B. durch Koordinatentransformationen, hergestellt.

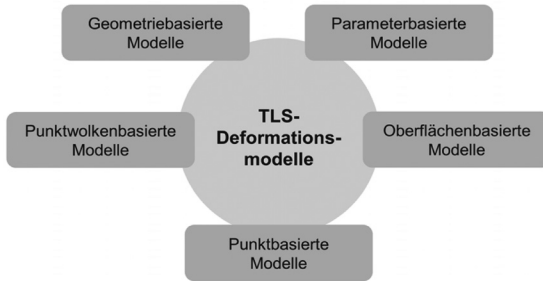


Abb. 2: TLS-basierte Deformationsmodelle nach Ohlmann-Lauber und Schäfer (2011)

Ein Beispiel ist der von Besl und Mc Kay (1992) vorgestellte Iterative Closest Point Algorithmus. Oberflächenbasierte Modelle verarbeiten die Punktwolken zu Punktgittern über eine Vermaschung oder Interpolation, damit ein Vergleich hergestellt werden kann.

Bei geometriebasierten Modellen werden die Punktwolken mit einem geometrischen Modell approximiert und mit einer Sollform oder der anderen Epoche verglichen, um flächenhafte Differenzen offenzulegen. In parameterbasierten Modellen werden darüber hinaus die geschätzten Parameter zur Analyse der Deformationen verwendet. Diese Modelle werden in Wunderlich et al. (2016) und Neuner et al. (2016) weiter eingeordnet und anhand von Beispielen dargelegt.

Aus diesen Beschreibungen wird ersichtlich, dass punktbasierte Modelle nur limitiert verwendet werden können und geometriebasierte sowie parameterbasierte Modelle eine Vorinformation über das abgetastete Objekt benötigen, das sogenannte Modellwissen. Daher wird in vielen Fällen, wo keine Vorinformation über die Geometrie der beobachteten Oberfläche integriert werden kann oder soll, auf punktwolkenbasierte oder oberflächenbasierte Modelle zurückgegriffen.

Aus diesem Grund sind in den meisten Softwarepaketen auch punktwolken- und oberflächenbasierte Modelle implementiert; teilweise auch geometriebasierte Modelle, wobei auf diese aufgrund der o.g. Limitation im Folgenden nicht mehr eingegangen wird. Punktwolkenbasierte Modelle basieren auf einem Cloud-to-Cloud-Vergleich (C2C) oder einem Multiscale-Model-to-Model-Cloud-Vergleich (M3C2), oberflächenbasierte auf einem Cloud-to-Mesh-Vergleich (C2M) oder Mesh-to-Mesh-Vergleich (M2M). Diese werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.

3 Punktwolkenvergleiche in Standardsoftware

Zur TLS-basierten Deformationsanalyse werden in der vorliegenden Studie drei Standardsoftwarepakete verwendet: 3DReshaper, CloudCompare und Geomagic Studio bzw. Geomagic Control. Die Funktionen von Geomagic Studio und Geomagic Control der hier dargestellten Untersuchungen sind jeweils identisch.

Beim Vergleich dieser soll nicht die jeweilige Software im Vordergrund stehen, sondern die jeweils verwendeten Methoden zum Punktwolkenvergleich. Unter Vernachlässigung der Approximation von Regelgeometrien, wie es bei den geometrie- und parameterbasierten Modellen durchgeführt wird, stehen bei diesen Softwarepaketen die folgenden Punktwolkenvergleiche zur Verfügung (siehe [Tab. 1](#)): Cloud-to-Cloud (C2C), Multiscale-Model-to-Model-Cloud (M3C2), Cloud-to-Mesh (C2M) oder Mesh-to-Mesh (M2M). Diese werden in den folgenden Kapiteln 3.1 bis 3.4 detaillierter beschrieben.

Tab. 1: Mögliche Punktwolkenvergleiche in Standardsoftware

Software	C2C	C2M	M2M	M3C2
3DReshaper	X	X	X	
CloudCompare	X	X	(X)	X
Geomagic		X	X	

3.1 Cloud-to-Cloud-Vergleich (C2C)

Der C2C-Vergleich erfolgt nach dem punktwolkenbasierten Modell über eine Zuordnung korrespondierender Punkte und anschließender Abstandsberechnung zwischen den Punkten. Daher sind die Verschiebungsbeträge als Endresultat des Vergleichs grundsätzlich immer positiv. Der einfachste Weg zur Bildung von Punktwolkenkorrespondenzen ist die Suche nach dem nächsten Nachbarn (Tsakiri und Anagnostopoulos 2015). Für diese Berechnung ist weder eine Vermaschung, noch die Berechnung von Oberflächennormalen notwendig (Girardeau-Montaut et al. 2005). Mit diesem Algorithmus können allerdings Zuordnungsprobleme entstehen (siehe [Abb. 3](#)): Korrespondierende Punkte werden nicht richtig erkannt, da ausschließlich die kürzeste Distanz von Bedeutung ist. So können Punkte einer deformierten Punktwolke näher an einem Punkt der Referenzpunktwolke liegen als der wahre korrespondierende Punkt.

Zur Verbesserung der Zuordnung wird die Oberfläche um den Referenzpunkt durch eine geometrische Form oder Fläche zweiter Ordnung modelliert. Somit kann ein Normalenvektor n für den gegebenen Punkt berechnet werden. Anschließend erfolgt die Suche nach dem nächsten Nachbarn in der Vergleichspunktwolke entlang des Normalenvektors (Tsakiri und Anagnostopoulos 2015, siehe [Abb. 4](#)). In diesem Fall wird nicht nur der absolute Abstand berechnet, sondern das Vorzeichen der Abweichung kann anhand der Richtung des Normalenvektors ermittelt werden.

Es ist ersichtlich, dass die Schätzung des Normalenvektors sehr hilfreich für die Berechnung der Punktwolkendifferenzen ist. Jedoch handelt es sich bei die-

sem Verfahren nicht um das klassische geometriebasierte Modell aus Kap. 2, da der Normalenvektor nur eine unterstützende Hilfe zur Suche des korrespondierenden Punktes darstellt und die Messpunkte der deformierten Punktwolke nicht mit der Ebene verglichen werden.

Das Ergebnis dieses C2C-Vergleichs – wie auch das der folgenden C2M- und M2M-Vergleiche – ist die farbcodierte Darstellung von Punktwolkendifferenzen wie in Abb. 3 und Abb. 4 skizziert.

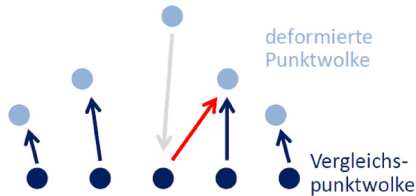


Abb. 3: C2C-Vergleich ohne lokale Modellierung

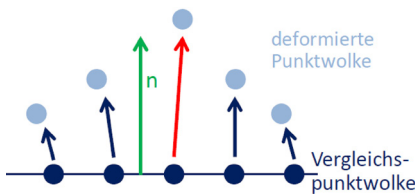


Abb. 4: C2C-Vergleich mit lokaler Modellierung

Diese Darstellung ist rein quantitativ; es wird kein Signifikanztest durchgeführt, der die Abweichungen qualitativ bewerten würde.

CloudCompare ermöglicht diesen direkten Punktvergleich. Einerseits kann, nach dem punktwolkenbasierten Modell, die Distanz über direkte Nachbarn berechnet werden und zum anderen gibt es in der Software drei Möglichkeiten der lokalen geometrischen Modellierung zur Berechnung des Normalenvektors für jeden Messpunkt der Referenzpunktwolke. Optional wird eine Ebene durch eine benutzerdefinierte Anzahl nächster Nachbarn geschätzt und die Distanz der Punkte der deformierten Punktwolke zu den lokalen Ebenen berechnet. Diese Option wird im Programm *Least square plane* genannt (CloudCompare 2015). Als weitere Möglichkeit zur lokalen Modellierung dient die Option *Height function*. Hier wird als Modell aus einer benutzerdefinierten Nachbarschaft oder innerhalb eines definierten Radius eine flächenhafte, quadratische Funktion verwendet. Die dritte Option *2D1/2 Triangulation* ist die Berechnung einer lokalen Triangulation der definierten Nachbarn. Die Punkte werden auf eine Ebene projiziert und die Delaunay-Triangulation berechnet. Für die Vermaschung werden jedoch die originalen 3D-Punkte verwendet, sodass eine lokale 2.5D-Vermaschung entsteht (CloudCompare 2015). Für die Distanzberechnung können die einzelnen Komponenten X, Y und Z separat voneinander bestimmt werden.

In 3DReshaper wird der C2C-Vergleich ohne lokale Modellierung durchgeführt; Geomagic Studio/Control beinhaltet keinen C2C-Vergleich.

3.2 Cloud-to-Mesh-Vergleich (C2M)

Statt eines lokalen Modells besteht die Möglichkeit, ein oberflächenbasiertes Modell durch eine globale Vermaschung zu erstellen und diese Vermaschung mit einer Punktwolke zu vergleichen. Dabei wird der Abstand einer 3D-Vermaschung zu einer Punktwolke berechnet (Cignoni et al. 1998). Dieser Ansatz ist einer der gebräuchlichsten zur Analyse von Punktwolken mit Softwareprodukten und kann besonders gut bei ebenen Flächen verwendet werden (Lague et al. 2013). Bei sehr kantigen Objekten oder Punktwolken mit Datenlücken wird dieser Ansatz nach Lague et al. (2013) nicht empfohlen. Oft wird die Vermaschung TIN (*triangulated irregular network*) genannt, da es sich bei der Fläche um ein unregelmäßiges Netz aus Dreiecksflächen handelt (Niemeier 2008, S. 416 f.).

Meistens wird eine Delaunay-Triangulation verwendet. Dies ist eine Dreiecksvermaschung mit der Bedingung, dass in dem Umkreis eines Dreiecks kein weiterer Messpunkt liegt. Dadurch wird vermieden, dass lange schmale Dreiecke entstehen (Niemeier 2008, S. 417). Aus den Dreiecken der Vermaschung lassen sich Normalenvektoren berechnen. Mit diesen wird der Abstand einer Punktwolke zur Vermaschung berechnet.

In CloudCompare gibt es zwei Möglichkeiten der Vermaschung. Im Allgemeinen wird ein 2.5D-Mesh gebildet. Wie in [Kap. 3.1](#) schon erklärt, werden die Punkte in eine Ebene projiziert. Die korrespondierenden 2D-Punkte werden trianguliert und die Mesh-Struktur wird auf die 3D-Punkte angewendet. Bei der Projektion gibt es zwei Auswahlmöglichkeiten. Zum einen werden die Punkte bei der Option *Delaunay 2.5D (XY plane)* in die XY Ebene, zum anderen bei der Option *Delaunay 2.5D (best fit plane)* in eine am besten angepasste Ebene projiziert. Anschließend wird die Distanz zwischen der Vermaschung und der Vergleichspunktwolke berechnet (CloudCompare 2015).

Ebenso ist ein C2M-Vergleich in Geomagic möglich. Die Vermaschung wird in dieser Software allerdings direkt im dreidimensionalen Raum durchgeführt (Akca 2012). Des Weiteren besteht die Möglichkeit, eine Oberfläche mit NURBS zu erstellen. Diese werden in Geomagic aus der Dreiecksvermaschung abgeleitet, sodass nicht die Originaldaten für die NURBS verwendet werden.

In 3DReshaper kann eine Vermaschung in 3D oder auch in 2D durchgeführt werden. Zusätzlich ist die Bildung einer sphärischen Vermaschung möglich. Diese ist speziell bei Deformationsanalysen, bei denen der Standpunkt zwischen den zwei Epochen konstant bleibt, empfehlenswert.

Bei einer reinen Vermaschung findet prinzipiell keine Glättung oder Rauschreduktion statt, sodass zufällige Messabweichungen zu einer erschwerten Interpretation der Punktwolkenvergleiche führen. Daher geht die Punktwolkenverarbeitung bei allen Softwareprodukten mit einer Glättung einher. So glättet CloudCompare direkt die Punktwolke, Geomagic und 3DReshaper führen bei

der Vermaschung eine Glättung durch. Die Stärke der Glättung ist durch Auswahl verschiedener Parameter jeweils beeinflussbar.

3.3 Mesh-to-Mesh-Vergleich (M2M)

Als Variation zum C2M-Vergleich können zwei oberflächenbasierte Modelle direkt miteinander verglichen werden. Dazu werden aus den zwei Punktwolken Vermaschungen gebildet. Ähnlich zum C2M-Vergleich werden die kürzesten Abstände zwischen den beiden Oberflächen berechnet. Dazu werden jeweils die Normalenvektoren der beiden Oberflächen genutzt, um die Richtung des kürzesten Abstands zu definieren.

Der M2M-Vergleich ist mit den verwendeten Softwareprodukten in Geomagic und 3DReshaper möglich. In CloudCompare besteht zwar auch die Möglichkeit, zwei Vermaschungen einzuladen und diese zu vergleichen. Allerdings werden dabei nur die Knoten der Vergleichsvermaschung in den Vergleich einbezogen, sodass wieder ein C2M-Vergleich entsteht.

3.4 Multiscale-Model-to-Model-Cloud-Vergleich (M3C2)

Wie bereits beschrieben, wurde das Messrauschen bei den bisherigen Methoden außer Acht gelassen. Es erfolgt lediglich eine Glättung bei der Punktwolkenvorverarbeitung oder bei der Vermaschung. Die aus der Glättung ermittelbaren Aussagen zu Messabweichungen werden jedoch nicht beim Punktwolkenvergleich verwendet. Dies geschieht beim M3C2-Vergleich, der ausschließlich in CloudCompare implementiert ist: Mehrere Punkte werden in einem Kernpunkt zusammengefasst und die Streuung um diesen Kernpunkt wird als Maß für die Genauigkeit der Messung weiter verwendet. Daher wird diese Information auch zur Prüfung signifikanter Abweichungen beim Punktwolkenvergleich verwendet. Da dieses Maß jedoch lediglich die innere Genauigkeit aufnimmt, verlangt die Software bei der Prüfung signifikanter Abweichungen noch die Eingabe einer Registriergenauigkeit als äußere Genauigkeit.

Im Algorithmus werden zunächst Kernpunkte festgelegt, für die jeweils eine Distanz und ein Konfidenzintervall berechnet werden (Lague et al. 2013). Der Abstand der Kernpunkte wird im Programm festgelegt. Durch die Bildung dieser Kernpunkte wird die Punktwolke geglättet, das Rauschen also minimiert. Des Weiteren führt die Reduktion der Vergleichspunkte zu einer Beschleunigung der Rechengeschwindigkeit (Lague et al. 2013). Im zweiten Schritt wird ein geometriebasiertes Modell gebildet, denn für jeden Kernpunkt i wird ein Normalenvektor \mathbf{n} berechnet. Dazu wird eine Ebene aus den Punkten berechnet, die in einem definierten Radius $D/2$ um den Kernpunkt i liegen. Aus den Entfernungen der nächsten Nachbarn zur Ebene wird eine Standardabweichung $\sigma_i(D)$

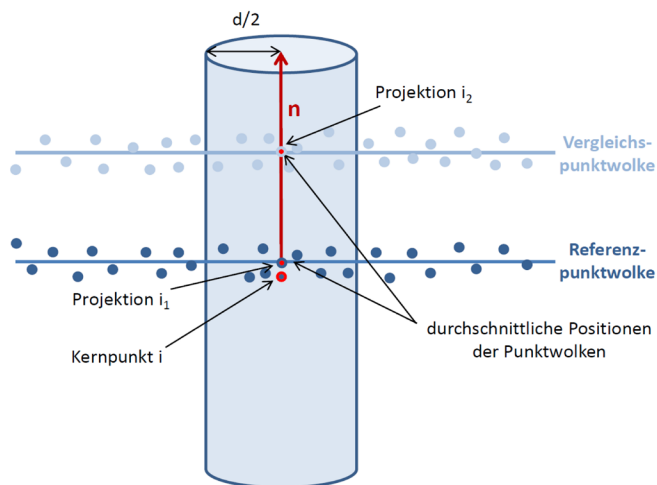


Abb. 5:
Vereinfachte Darstellung der Berechnung des Punktwolkenabstandes an einem Kernpunkt mit dem M3C2-Vergleich

berechnet, welche als Maß für die Oberflächenbeschaffenheit der Umgebung von i gilt. Anschließend wird der Kernpunkt i entlang des Normalenvektors in beide Ebenen der Punktwolken projiziert. Dies geschieht durch den in Abb. 5 dargestellten Zylinder mit dem benutzerdefinierten Radius $d/2$ und einer in beide Richtungen definierten Länge. Das heißt, der Durchmesser d des Zylinders und der Durchmesser D der Fläche, in der die Punkte zur Berechnung des Normalenvektors liegen, können mit unterschiedlichen Werten festgelegt werden.

Die Zylinderachse läuft durch den Kernpunkt i und ist durch den Normalenvektor n orientiert. Durch die Projektion entstehen die beiden durchschnittlichen Punktwolkenpositionen i_1 und i_2 . Beide Positionen erhalten zusätzlich eine Standardabweichung, welche die lokale Punktwolkenstreuung entlang der Normalenrichtung angibt. Der Abstand zwischen den Punktwolken gleicht letztendlich der Distanz zwischen i_1 und i_2 .

Die genaue Beschreibung des M3C2-Algorithmus und Beispielanwendungen sind in Lague et al. (2013) ausgeführt. Das Verfahren kann den punktwolkenbasierten Modellen zugeordnet werden, was allerdings nicht ganz eindeutig ist. Wie bereits oben beschrieben wird zunächst ein geometriebasiertes Modell gebildet, jedoch werden die Punkte der Vergleichspunktwolke nicht mit dem geometrischen Modell verglichen. Stattdessen wird dieses durch die Projektion der Kernpunkte und Berechnung der Oberflächenbeschaffenheit erweitert, sodass schlussendlich der Abstand zwischen zwei Punkten berechnet wird.

Das Ergebnis dieses M3C2-Vergleichs ist zum einen eine Grafik, in der die Kernpunkte einer vorher ausgewählten Punktwolke mit einem Farbwert für die Distanz zwischen Referenz- und Vergleichspunktwolke versehen sind. Diese Darstellung ist vergleichbar mit denjenigen der vorherigen Methoden. Zum

anderen können in CloudCompare jedoch auch die Distanzunsicherheit, signifikante Differenzen und optional die Standardabweichung der Kernpunkte und Anzahl der Nachbarn an jedem Kernpunkt betrachtet werden (CloudCompare 2015).

Die Darstellung der signifikanten Punktwolkendifferenzen hängt in CloudCompare von der mit Hilfe der Kernpunkte bestimmten Messunsicherheit und einer selbst zu bestimmenden Registrierungsabweichung ab. Die Eingabe einer Registriergenauigkeit ist nötig, da die mit Hilfe der Kernpunkte bestimmte Messunsicherheit lediglich ein Maß für die innere Genauigkeit ist. Somit ist der Bereich, ab wann eine Abweichung als signifikant ermittelt wird, durch die subjektiv zu wählende Registriergenauigkeit beliebig skalierbar. Ein stochastisch vollständig fortgeplanter Signifikanztest analog zum Zwei-Epochenvergleich punktweiser Deformationen wird also nicht durchgeführt.

Barnhart und Crosby (2013) vergleichen den Algorithmus mit dem C2M-Algorithmus. Dabei wird der M3C2-Algorithmus aufgrund der Berücksichtigung von Unsicherheiten durch Registrierung und Oberflächenbeschaffenheit positiv hervorgehoben.

4 Deformationsanalyse einer Holzplatte

Die Ergebnisse einer TLS-basierten Deformationsanalyse unter Nutzung von Standardsoftware werden in der vorliegenden Studie anhand eines Beispiels besprochen: Eine unbehandelte Holztafel mit einer Dimension von $1,50 \times 1,50$ m (Abb. 6), die wiederum auf einer weißen Holzplatte montiert ist, wird mit einer Auflösung von $6,3 \text{ mm} @ 10 \text{ m}$ mit der Leica ScanStation P20 mit einer Messdistanz von ca. 5 m in mehreren Epochen gescannt. Die Holztafel wird dabei entweder nicht deformiert oder sie wird im Sinne einer Starrkörperbewegung verschoben oder verformt. Diese Holzplatte ist nicht eben, sondern weist in



Abb. 6:
Aufnahmesituation
beim Scanning der unbehandelten Holztafel, die auf einem weißen Brett verschraubt ist.

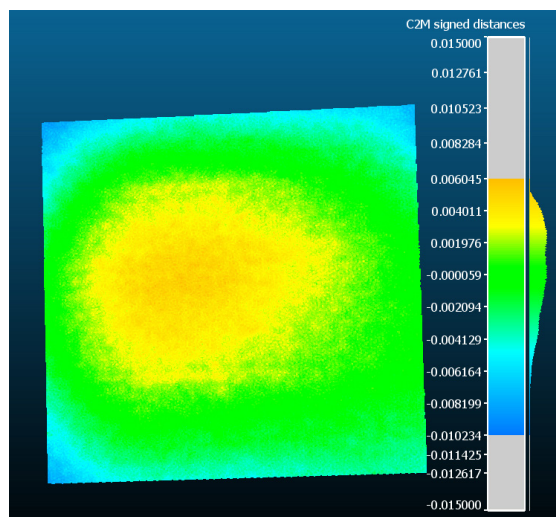


Abb. 7:
Verformung der gemessenen Holztafel [m] gegenüber einer bestanpassenden Ebene (dargestellt in CloudCompare)

ihrer spannungsfreien Lagerung schon Verformungen im Bereich von -6 mm bis $+5$ mm verglichen mit einer bestanpassenden Ebene auf (Abb. 7). Daher kann bei der Deformationsanalyse nicht die Annahme getroffen werden, dass es sich um eine Ebene handelt, deren Parameter unmittelbar Aufschluss über eventuell vorhandene Deformationen liefern.

Die Messung und Auswertung zur Deformationsanalyse erfolgt dabei in drei Schritten, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden:

1. Untersuchung des Signifikanzbereichs zur Deformationsanalyse: Ohne Deformation der Holztafel wird diese in der Nullepoche mehrfach von dem in Abb. 6 dargestellten Standpunkt gescannt. Hieraus soll abgeleitet werden, inwieweit Abweichungen in den Punktwolken allein aus der Wiederholungsmessung resultieren. Gleiches wird für einen Standpunktwechsel durchgeführt.
2. Untersuchung der Verformung: Die Holztafel wird stärker gekrümmt, indem ihr Abstand von der Wand lokal vergrößert wird, ohne dass die Verschraubung an der Wand gelöst wird. Hier wird die Holztafel in zwei Epochen, vor und nach der Verformung, von identischem Standpunkt gescannt.
3. Untersuchung der Starrkörperbewegung: Die Holztafel wird abgeschraubt und leicht versetzt wieder festgeschraubt. Hierbei wird durch eine spannungsfreie Lagerung darauf geachtet, keine signifikanten Verformungen zu erzeugen. Dies konnte mit Hilfe eines Messarms mit Laserlinienscanner mit übergeordneter Genauigkeit verifiziert werden. Auch hier wird die Holztafel in beiden Epochen von identischem Standpunkt gescannt.

4.1 Untersuchung des Signifikanzbereichs

Liegen mehrere Laserscans der Holztafel vor, ohne dass zwischen diesen Epochen eine Deformation stattgefunden hätte, ergeben sich bei den Punktwolkenvergleichen dennoch Abweichungen. Diese Abweichungen sind – analog zu punkthaften Deformationsanalysen mit dem Zwei-Epochenvergleich – auf Signifikanz zu überprüfen. Nach den in [Kap. 2](#) beschriebenen Methoden wird in den Softwarepaketen jedoch kein Zwei-Epochentest durchgeführt, sondern nur Abweichungen berechnet und farbig dargestellt, ohne sie qualitativ zu beurteilen. Daher wird in diesem Artikel versucht, einen Signifikanzbereich empirisch zu ermitteln und die Farbskala der Punktwolkenvergleiche entsprechend anzupassen, um Abweichungen außerhalb dieses Bereichs zu erkennen. Es wird also rein visuell unterschieden, ob Abweichungen auf Deformationen schließen lassen.

Die Punktabweichungen zwischen zwei Epochen sind beim Laserscanning mit der Messunsicherheit des Sensors zu begründen, wie es auch z. B. bei der Tachymetrie der Fall ist. Hinzu kommt jedoch die Tatsache, dass keine identischen Punkte in mehreren Epochen angemessen wurden. Demnach hängt die Größenordnung der Abweichungen nicht allein vom stochastischen Modell des Laserscanners, sondern auch von der Punktauflösung am Objekt ab, die wiederum durch das abtastende Winkelinkrement des Laserscanners, die Messgeometrie und die Objektgeometrie beeinflusst wird. [Abb. 8](#) skizziert diese Abweichungen, ohne detailliert auf Winkelinkremente, Messgeometrie und Objektgeometrie Bezug zu nehmen.

Um dennoch den Signifikanzbereich abschätzen zu können, wird die Holztafel mehrfach von identischen Standpunkten abgescannt. Somit kann von den dadurch entstehenden Differenzen der Punktwolken auf einen Signifikanzbereich geschlossen werden. [Abb. 9](#) zeigt den C2C-Vergleich bei der Messung von einem Standpunkt. Die Abweichungen sind alle positiv, da Streckenunterschiede berechnet werden (siehe [Kap. 3.1](#)). Die Größenordnung der Abweichungen auf

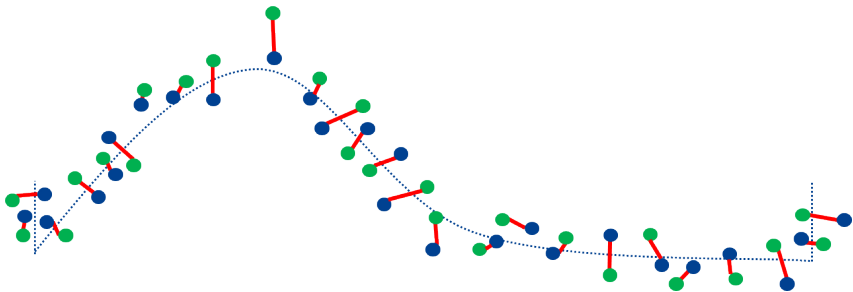


Abb. 8: Abweichungen (rot) zwischen der Punktwolke von Epoche 1 (blau) und Epoche 2 (grün) bei Messung einer Oberfläche (blau gestrichelt) in zwei Epochen ohne Deformation

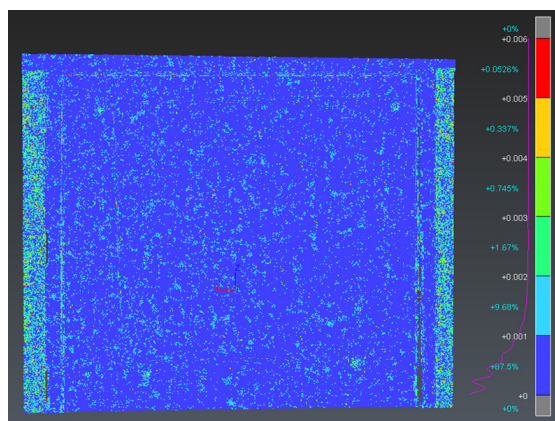


Abb. 9:
C2C-Vergleich [m] ohne Deformation bei Messung von identischem Standpunkt in zwei Epochen (3DReshaper)

der Holzplatte liegt bei maximal 2 mm, auf den angrenzenden Türen aufgrund schlechter Reflexionseigenschaften (siehe Abb. 6) bei mehr als 2 mm. Auch sind die Kanten der Holztafel sowie der Unterkonstruktion aufgrund linienhaft angeordneter, erhöhter Abweichungen zu erahnen.

Basierend auf dieser Untersuchung wird der Signifikanzbereich für das Auftreten von Deformationen auf 2 mm empirisch festgelegt werden. Größere Abweichungen lassen somit auf Deformationen schließen.

Die Abhängigkeit dieses Signifikanzbereichs von der Mess- und Objektgeometrie kann mit Hilfe des Scans von einer radial um 5 Meter um die Holzplatte herum verschobenen Position offengelegt werden. Abb. 10 zeigt den M2M-Vergleich für die beiden von zwei verschiedenen Standpunkten aufgenommenen Punktwolken. Damit dieser Vergleich in einem einheitlichen Koordinatensystem durchgeführt werden kann, werden die beiden Scans vorher über vier Zielzei-

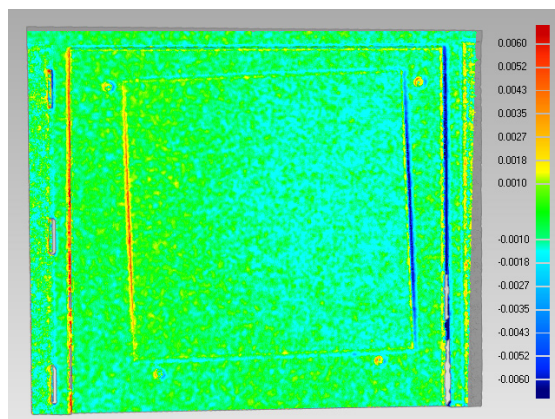


Abb. 10:
M2M-Vergleich [m] ohne Deformation bei Messung von unterschiedlichen Standpunkten in zwei Epochen (Geomagic)

chen, die in den Reflektornestern unmittelbar neben der Holzplatte montiert wurden, registriert. Neben der unterschiedlichen Messgeometrie wirkt nun also auch zusätzlich die Genauigkeit der Registrierung auf den Punktwolkenvergleich.

Der C2M- und M3C2-Vergleich zeigen ein nahezu identisches Bild, der C2C-Vergleich ebenso mit Ausnahme der rein positiven Abweichungen. Daher sind diese Vergleiche nicht dargestellt.

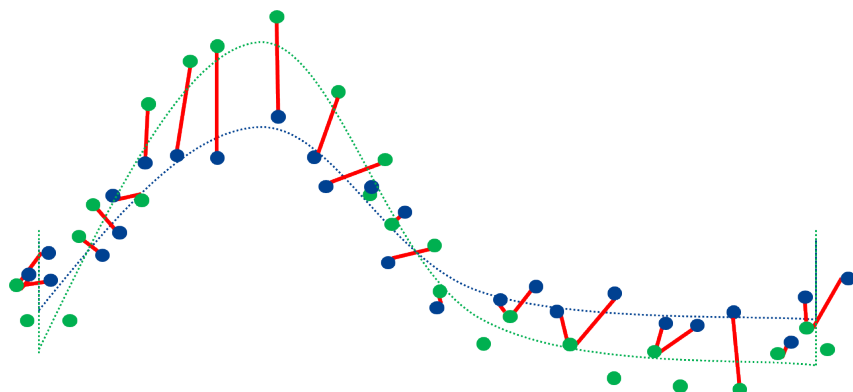
Auffällig sind die beiden roten und blauen Bereiche, die die Stirnflächen links und rechts von der Holzplatte sowie der Unterkonstruktion repräsentieren. Diese Bereiche erscheinen aufgrund der hohen Abweichungen fälschlicherweise als deformiert. Tatsächlich aber handelt es sich um Bereiche, die in einem der beiden Laserscans jeweils abgeschattet waren. Beim Punktwolkenvergleich werden immer Zuordnungen zu den nächsten Punkten der anderen Epoche hergestellt. Da Punkte nur außerhalb des abgeschatteten Bereichs liegen, sind die zugehörigen Verbindungsvektoren demnach länger als in nicht abgeschatteten Bereichen. Die Länge hängt sowohl von der Messgeometrie und Objektgeometrie als auch von der Punktauflösung am Objekt ab. Im vorliegenden Fall ist die Dicke der Holzplatte von 8 mm mitentscheidend.

Soll also die Möglichkeit variierender Standpunkte mit in die Betrachtung des Signifikanzbereichs aufgenommen werden, muss der Signifikanzbereich entsprechend vergrößert werden. Daher sind die Punktwolkenvergleiche zwischen Punktwolken aufgenommen von verschiedenen Standpunkten weniger sensitiv als diejenigen, bei denen in allen Epochen (nahezu) identische Standpunkte besetzt werden.

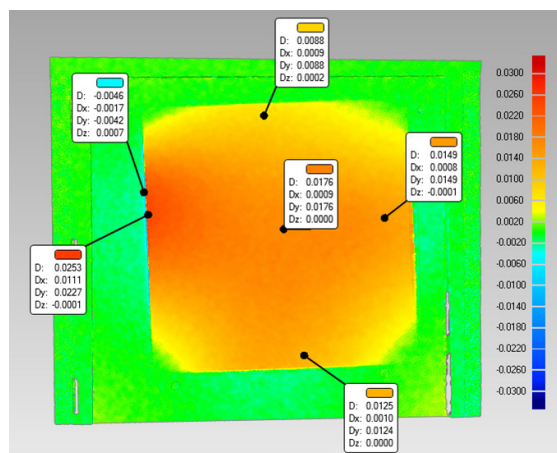
4.2 Verformung

Zur Verformung der Holzplatte werden zwischen Wand und Platte einige Holzstäbe geschoben, sodass die Platte in Spannung versetzt wird. Die Fixierungen an der Unterkonstruktion werden dabei nicht gelöst, es liegt also keine zusätzliche Starrkörperbewegung vor. Dies wurde mit Hilfe eines Messarms in übergeordneter Genauigkeit bestätigt. Die Auswirkung auf den Punktwolkenvergleich bei dieser Verformung zeigt [Abb. 11](#) in Anlehnung an [Abb. 8](#). Wie zu sehen ist, treten in dieser Skizze große Abweichungen vor allem an den Positionen der größten Verformung auf.

Diese theoretische Betrachtung kann anhand der experimentellen Daten bestätigt werden: [Abb. 12](#) zeigt den C2M-Vergleich in Geomagic Control, [Abb. 13](#) den M2M-Vergleich in 3DReshaper und [Abb. 14](#) den M3C2-Vergleich in CloudCompare. Alle Vergleiche zeigen übereinstimmend den Verlauf der Oberflächen deformationen auf, wobei die Anschaulichkeit zwischen den drei Softwarepaketen leicht variiert. Der in [Kap. 4](#) festgelegte Signifikanzbereich von 2 mm ist jeweils grün dargestellt.



↑ Abb. 11: Abweichungen (rot) zwischen der Punktwolke von Epoche 1 (blau) und Epoche 2 (grün) bei Messung einer Oberfläche (blau und grün gestrichelt) in zwei Epochen vor und nach einer Verformung



← Abb. 12: C2M-Vergleich [m] bei einer Verformung (Geomagic Control)

Die größte Deformation liegt jeweils im linken mittleren Bereich der Holzplatte vor, zu allen Seiten hin nimmt sie ab. Diese Deformation hat einen Wert von ca. 25 mm (C2M, Geomagic Control), 23 mm (M2M, 3DReshaper) und 23 mm (M3C2, CloudCompare). Der mit dem Messarm bestimmte Referenzwert beträgt 23 mm. Diese Werte wurden jeweils punktweise aus den Vergleichen an der maximalen Deformation abgegriffen, unterliegen also einer gewissen Streuung. Dennoch kann festgestellt werden, dass die erkannten Deformationen im Bereich des Sollwertes liegen.

Dass beim C2M-Vergleich eine größere Abweichung erhalten wird, ist jedoch erwartbar: Die Streuung der Punktwolke, die nicht vermascht wird, fließt unmittelbar in den Vergleich ein. Beim M2M- und M3C2-Vergleich findet bei beiden Punktwolken jeweils eine Glättung statt. Der C2C-Vergleich liefert hier ähnliche Ergebnisse wie der C2M-Vergleich.

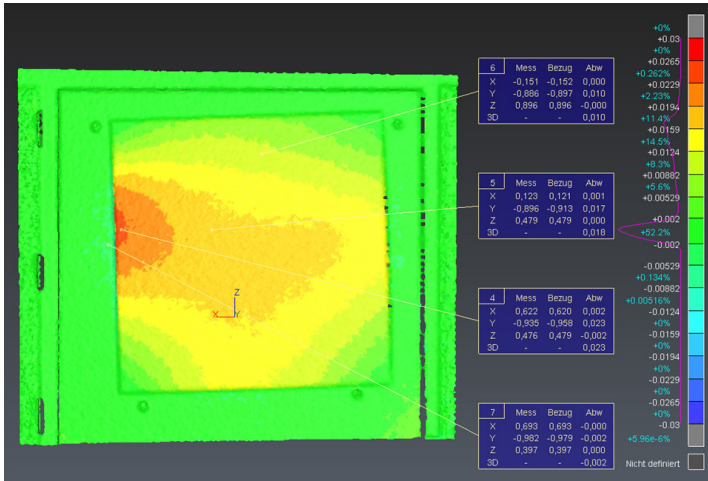


Abb. 13:
M2M-Ver-
gleich [m]
bei einer
Verfor-
mung
(3DRe-
shaper)

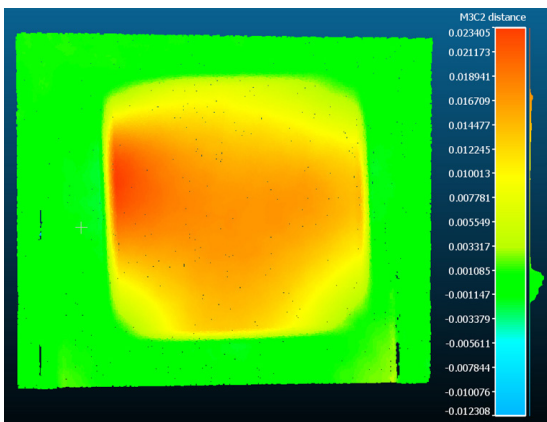
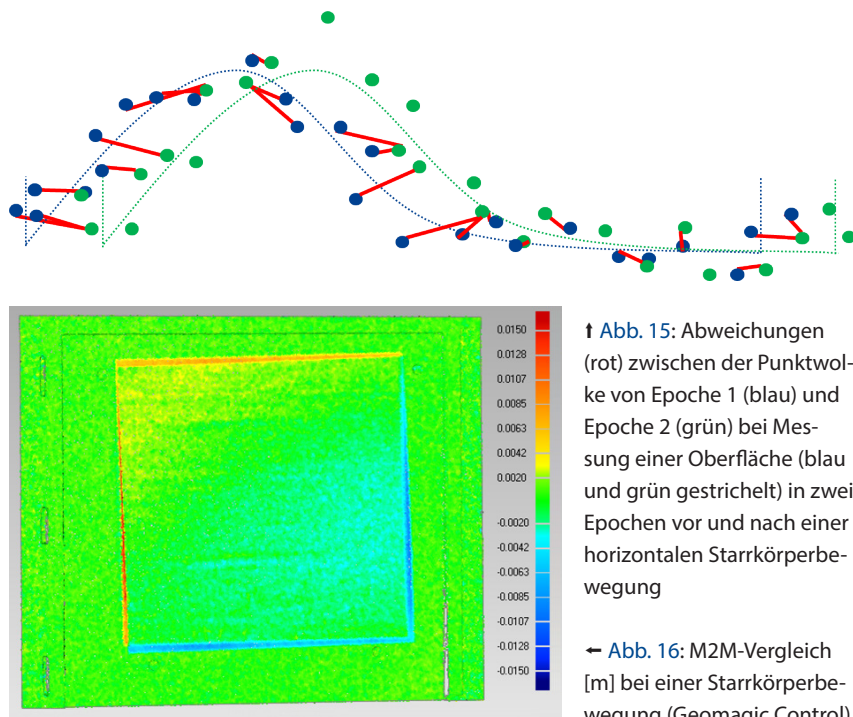


Abb. 14:
M3C2-Vergleich [m]
bei einer Verformung (Cloud-
Compare)

4.3 Starrkörperbewegung

Zur Analyse von Starrkörperbewegungen mit Hilfe der Standardsoftware wird die Holzplatte von der Unterkonstruktion abgeschraubt und einige Zentimeter nach links verschoben und leicht gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Durch eine möglichst spannungsfreie Lagerung der Holzplatte nach der Bewegung sollte eine Verformung vermieden werden. Die Kontrollmessung mit Hilfe eines Messarms in Kombination mit einem Laserlinienscanner konnte bestätigen, dass keine signifikanten Verformungen vorliegen. Somit kann eine Starrkörperbewegung basierend auf Abb. 8 nach Abb. 15 skizziert werden: Durch die horizontale Verschiebung der Oberfläche in der zweiten Epoche bilden sich neue



Punktzuordnungen von der ersten Epoche (blau) zu den nächsten Punkten in der zweiten Epoche (grün) und darauf basierend neue Abweichungsvektoren. Größere Abstände ergeben sich vor allem in Bereichen großer Unebenheiten bzw. Oberflächenkrümmungen und am Anfang und Ende der Oberfläche (in der 2D-Skizze: links und rechts). Bereiche mit geringer Krümmung weisen der Skizze nach keine erhöhten Abweichungen auf.

Auch diese theoretische Betrachtung kann anhand des M2M-Vergleichs in Abb. 16 bestätigt werden: Die größten Abweichungen treten am Rand der Holzplatte auf. Die Größenordnung von 15 mm verdeutlicht, dass die Punkte der ersten Epoche hier nicht mehr dem verschobenen Objekt zugeordnet werden, sondern dem nicht bewegten Hintergrund. Dies lässt sich erkennen, da die Holzplatte eine Dicke von 8 mm hat und maximal ca. 7 mm vom Hintergrund absteht. Das Maß der maximalen Punktwolkendifferenz korreliert also nicht mit dem tatsächlichen Betrag der Verschiebung von mehreren Zentimetern.

Zusätzlich treten Abweichungen von mehreren Millimetern, also außerhalb des grünen Signifikanzbereichs, im Bereich links oben der Platte sowie rechts unten auf. Unter Hinzunahme der Holzplattenform wird deutlich, dass diese Bereiche aufgrund der Unebenheit der Holzplatte von ca. -6 mm bis +5 mm

(Abweichungen gegenüber einer Ebene, siehe Abb. 7) großen Abweichungen unterliegen: Die Platte wurde nach links verschoben und gedreht, sodass nun unterschiedlich gekrümmte Bereiche der Ebene bei der Bildung von Punktzuordnungen als korrespondierend angesehen werden. Aufgrund dieser falschen Zuordnungen erscheint die Holzplatte nun beim Vergleich in diesen Regionen als verformt, wie auch schon skizziert in Abb. 15 deutlich wurde.

Aus dieser Analyse wird deutlich, dass eine Starrkörperbewegung nur schwer als eine solche mit Hilfe der Punktwolkenvergleiche erkennbar ist. Noch weniger ist die Größenordnung dieser Verschiebung ersichtlich. Vielmehr erscheinen die Resultate wie eine Verformung, sind von dieser also nur schwer zu unterscheiden. Einziger Anhaltspunkt ist hier die scharfe Kante erhöhter Punktwolken-differenzen, die am Rand des deformierten Objekts auftreten. Ob im mittleren Bereich der Holzplatte jedoch nur eine Starrkörperbewegung oder auch eine Verformung vorliegt, ist anhand von Abb. 16 nicht ersichtlich. Die C2C-, C2M- und M3C2-Vergleiche zeigen, wie auch schon bei der Verformung, ähnliche Ergebnisse und werden daher nicht gezeigt.

Diese Erkenntnis kann noch verdeutlicht werden, wenn der M3C2-Vergleich unter Betrachtung der dort nur als signifikant erkannten Punktvergleiche dargestellt wird (Abb. 7). Hierzu wurde eine Registriergenauigkeit empirisch auf 1 mm festgelegt (siehe Kap. 3.4). Auch hier ist erkennbar: Die Randbereiche sowie die in Abb. 16 schon auffälligen Bereiche erscheinen als signifikante Abweichungen (siehe Abb. 17). Eine Erhöhung der Registriergenauigkeit führt zu mehr auffälligen Punkten, einer Verringerung dazu, dass nur noch die Randbereiche auffällig sind. Die Aussagekraft deckt sich hier mit derjenigen aus den übrigen Vergleichen.

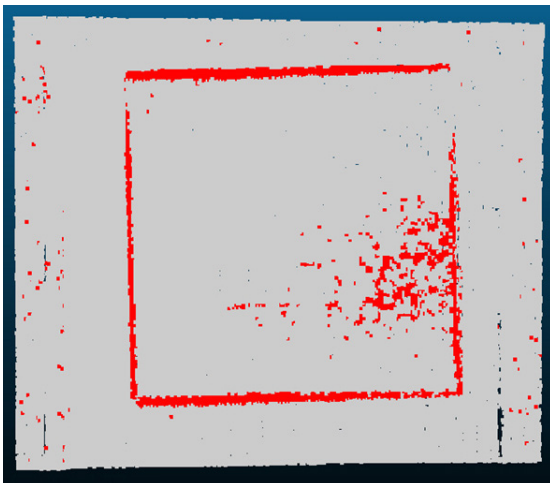


Abb. 17:

Signifikante Abweichungen (rot) beim M3C2-Vergleich einer Starrkörperbewegung (CloudCompare)

5 Fazit und Ausblick

Sollen über zwei Punktwolken, aufgenommen in zwei Epochen, Oberflächen-deformationen analysiert werden, gibt es eine Fülle von möglichen Methoden, die sich den fünf in Abb. 2 dargestellten TLS-Deformationsmodellen zuordnen lassen. Falls keine geometrische Vorinformation über die gescannte Oberfläche vorliegt, wird in der Regel auf punktwolkenbasierte oder oberflächenbasierte Modelle zurückgegriffen. Diese lassen sich weiter unterteilen in C2C-, C2M-, M2M- und M3C2-Vergleiche. Hierbei werden die zwei Punktwolken entweder direkt verglichen (C2C), als Zwischenschritt Vermaschungen gebildet (C2M und M2M) oder Punktwolken vor dem Vergleich unter Beachtung nachbarschaftlicher Struktur geglättet (M3C2). Die einzelnen Methoden sind jeweils in verschiedenen Softwarepaketen implementiert, wobei in diesem Artikel die Standardpakete 3DReshaper, CloudCompare und Geomagic Studio/Control verwendet werden.

Anhand einer deformierten Holzplatte können verschiedene Rückschlüsse gezogen werden:

- Zwischen den Punktwolken liegen immer Abweichungen vor. Diese sind – wie auch bei punktweisen Deformationsanalysen – der Messunsicherheit zuzuschreiben. Ferner liegen aber auch Abweichungen vor, da Scanpunkte aus zwei Epochen nicht identisch sind, sondern einen Abstand abhängig von der Messauflösung besitzen. Daher ist es schwierig zu beurteilen, ab wann Abweichungen signifikant sind. Aus diesem Grund ist ein Zwei-Epochentest zur Prüfung signifikanter Abweichungen, wie er bei punktweisen Deformationen durchgeführt wird, auf Basis der dargestellten Methoden nicht ohne subjektiven Eingriff durchführbar.
- Wird der identische Standpunkt in beiden Epochen besetzt, wirken Abschattungen und systematische Abweichungen auf die Messungen ähnlicher als bei zwei unterschiedlichen Standpunkten. Dies führt zu einer einfacheren Interpretation des Punktwolkenvergleichs.
- Bei einer Verformung lassen sich die tatsächlichen Formabweichungen und deren Größenordnung mit Hilfe aller Punktwolkenvergleiche herausarbeiten.
- Aus einer Starrkörperbewegung resultieren zwar große Abweichungen, diese hängen jedoch nicht mit der tatsächlichen Bewegung des Messobjekts zusammen. Vielmehr führen Kanten und Krümmungsunterschiede der gescannten Oberfläche zu großen Abweichungen beim Punktwolkenvergleich, nicht der Verschiebungsbetrag und die Verschiebungsrichtung.
- Während diese Erkenntnisse für alle Methoden der Punktwolkenvergleiche gelten, neigt der C2C-Vergleich zu einer größeren Unsicherheit in der Aussagekraft, da die Scanpunkte weniger geglättet werden. Auch ist hier der Einfluss der Punktwolkenauflösung am größten.

Diese Ergebnisse beziehen sich auf das hier betrachtete Beispiel der von einem Standpunkt gescannten, deformierten Holzplatte, was sich als sehr gutmütig erweist: Wie bereits angerissen wurde, führt eine zusätzliche Registrierung mehrerer Punktwolken aufgrund verschiedener Laserscannerstandpunkte zu einer erschwerten Deformationsuntersuchung. Gleiches gilt für komplexere Oberflächen mit Kanten und resultierenden Datenlücken und insbesondere für inhomogene Oberflächeneigenschaften (Material, Farbe, Reflexionsverhalten). In diesen Fällen ist anzunehmen, wie in Lague et al. (2013) festgestellt, dass der C2C- und C2M-Vergleich und evtl. auch der M2M-Vergleich an Aussagekraft verlieren und der M3C2-Vergleich aufgrund der Integration von Messunsicherheit weitere Vorteile offenbart.

Generell wird anhand der vorliegenden Studie deutlich, dass punktweise Deformationsanalysen nicht einfach in flächenhafte überführt werden können, wenn die hier betrachteten Punktwolkenvergleiche herangezogen werden: Starrkörperbewegungen lassen sich kaum detektieren, da kein zusammenhängendes Objekt beim Punktwolkenvergleich erkannt wird. Ferner kann aufgrund des fehlenden stochastischen Modells beim Punktwolkenvergleich kein strenger Signifikanztest zur Beurteilung relevanter Abweichungen durchgeführt werden. Dies wird im vorliegenden Beitrag nur anhand der Punktwolkenauflösung betrachtet, lässt sich jedoch auch anhand bisher nur unzureichend vorhandener Kenntnis über räumliche Korrelationen von Laserscans sowie systematischer Messabweichungen ausführen (Kauker et al. 2016; Holst et al. 2016).

Diese Erläuterungen führen zu dem Schluss, dass die hier vorgestellten und verwendeten Methoden zwar einen Rückschluss auf Veränderungen zwischen zwei Punktwolken zulassen, jedoch nicht von einer Deformationsanalyse eines Objektes gesprochen werden kann. Hierzu wären eine Objektmodellierung sowie die Herausarbeitung statistisch gesicherter Aussagen nötig, wie sie aus der punktweisen Deformationsanalyse bekannt sind (Heunecke et al. 2013). Dieser Nachteil flächenhafter Deformationsuntersuchungen wird momentan in einer Vielzahl ingenieurgeodätischer Veröffentlichungen thematisiert und weiter analysiert (z. B. Wunderlich et al. 2016, Holst und Kuhlmann 2016), sodass hier zukünftig von Weiterentwicklungen auszugehen ist.

Literatur

- Akca, M. D. (2012): 3D modeling of cultural heritage objects with a structured light system. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 12(1), 139–152.
- Barnhart, T. B.; Crosby, B. T. (2013): Comparing two methods of surface change detection on an evolving thermokarst using high-temporal-frequency terrestrial laser scanning, Selawik River, Alaska. *Remote Sensing*, 5(6), 2813–2837.
- Besl, P. J.; Mc Kay, N. D. (1992): A Method for Registration of 3D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256.

- Cignoni, P.; Rocchini, C.; Scopigno, R. (1998): Metro: measuring error on simplified surfaces. *Computer Graphics Forum*, 17(2), 167–174.
- CloudCompare (2015): User Manuel. www.danielgm.net/cc, letzter Zugriff: 25.04.2016.
- Girardeau-Montaut, D.; Roux, M.; Marc, R.; Thibault, G. (2005): Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(part 3), 30–35.
- Heunecke, O.; Kuhlmann, H.; Welsch, W.; Eichhorn, A.; Neuner, H. (2013): *Handbuch Ingenieurgeodäsie. Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. 2. Auflage. Wichmann, Heidelberg.
- Holst, C.; Kuhlmann, H. (2016): Challenges and Present Fields of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses. *J. Appl. Geodesy*, 10 (1), S. 17–25.
- Holst, C.; Neuner, H.; Wieser, A.; Wunderlich, T.; Kuhlmann, H. (2016): Calibration of Terrestrial Laser Scanners. *Allgem. Verm. Nachr.*, 6/2016, 147–157, Wichmann Verlag, Berlin.
- Kauker, S.; Holst, C.; Schwieger, V.; Kuhlmann, H.; Schön, S. (2016): Spatio-Temporal Correlations of Terrestrial Laser Scanning. *Allgem. Verm. Nachr.*, 6/2016, 170–182, Wichmann Verlag, Berlin.
- Lague, D.; Brodu, N.; Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10–26.
- Mukupa, W.; Roberst, G. W.; Hancock, C. M.; Al-Manasir, K. (2016): A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. *Survey Review*.
- Neuner, H.; Holst, C.; Kuhlmann, H. (2016): Overview on current modelling strategies of point clouds for deformation analysis. *Allgem. Verm. Nachr.*, 11/2016, Wichmann Verlag, Berlin.
- Niemeier, W. (2008): *Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden*. 2. Auflage. Walter de Gruyter, Berlin.
- Ohlmann-Lauber, J.; Schäfer, T. (2011): Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011 mit TLS-Challenge*. DVW-Schriftenreihe, Band 66/2011, Wißner-Verlag, Augsburg, 147–157.
- Tsakiri, M.; Anagnostopoulos, V. (2015): Change Detection in Terrestrial Laser Scanner Data Via Point Cloud Correspondence. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 4(3), 476–486.
- Wunderlich, T.; Niemeier, W.; Wujanz, D.; Holst, C.; Neitzel, F.; Kuhlmann, H. (2016): Areal deformation analysis from TLS point clouds – the challenge. *Allgem. Verm. Nachr.*, 11/2016, Wichmann Verlag, Berlin.

Kontakt

Christoph Holst | Berit Schmitz | Heiner Kuhlmann
Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation
Nußallee 17, 53115 Bonn
c.holst@igg.uni-bonn.de

Erfassung von Tübbingverformungen bei TVM-Vortrieben

Robert Wenighofer | Klaus Chmelina | Robert Galler

1 Einleitung

Bei der Errichtung sehr langer Tunnel (aktuell z. B. für Hochgeschwindigkeitsstrecken der Bahn) wird zur Erreichung hoher Vortriebsgeschwindigkeiten und damit Verkürzung der Bauzeit vermehrt maschinell unter Verwendung von Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) vorgetrieben (Abb. 1). Der Hohlraum wird dabei entsprechend den geotechnisch-geologischen Anforderungen entweder mit Ankern und Spritzbeton oder mit Tübbing gestützt. Tübbinge sind hochfeste Stahlbetonfertigteile mit hohen Anforderungen an die Fertigungstoleranzen im Zehntelmillimeterbereich (Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik 2009). Mehrere dieser Fertigteile werden auf der TVM im Schutze des Schildes von einem Manipulator (Erektor) zu einem Tübbingring zusammengesetzt. Nach dem Einbau wird der Ring aus dem Schild quasi „entlassen“, verpresst und



Abb. 1: Moderne Doppelschild-Tunnelvortriebsmaschine Aker-Wirth

es kann zu Deformationen aufgrund des dann einwirkenden Gebirgs- und auch Verpressdrucks kommen. Für die Erfassung der Tübbingdeformationen stehen bislang nur aufwändige und unzufriedenstellende Messmethoden und -mittel zur Verfügung. Zu den heute gebräuchlichsten zählen Konvergenzmessungen mit Maßbändern und Laserdistanzmessgeräten sowie 3D-Messungen mit Totalstationen. In diesem Beitrag wird über aktuelle Untersuchungen zur Nutzung von 3D-Laserscannern für die Erfassung von Tübbingdeformationen berichtet.

2 Laserscanning des Einzeltübbings

2.1 Tübbingprüfstand

An der Montanuniversität Leoben (Lehrstuhl für Subsurface Engineering) befindet sich ein Tübbingprüfstand (Abb. 2) zur Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Tübbing. Dieser erlaubt es, einzelne Tübbinge kontrollierten Belastungen unter Laborbedingungen auszusetzen. Der Tübbingprüfstand besitzt mit max. 2 MN Vertikalkraft, 4 MN Horizontalkraft und 200 mm Zylinderweg ein Layout, das mittels elektrohydraulisch betriebener Pressen verschiedene Belastungskollektive erlaubt. Der Prüfstand setzt sich aus



Gehwolf 2016

Abb. 2: Tübbingprüfstand der Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Subsurface Engineering

zwei Hauptträger (1) und den Lagern (2, 3) zusammen, die den Tübbing aufnehmen. Zur vertikalen Kraftaufbringung dienen zwei Hohlkolbenzylinder (4), die via Zugstange (5) und Querhaupt (6) Lasten in den Tübbing einbringen. Die horizontale Krafteinleitung übernehmen zwei Hydraulikzylinder (7) mit Tübbingschuhen (8), die als Überträger der Lasten fungieren (Gehwolf 2016).

2.2 Versuchsdurchführung

Bei der Versuchsdurchführung wird stufenweise die Belastung erhöht. Dabei werden Messungen mit den folgenden Messsystemen durchgeführt:

- Seilzugsensoren und Extensometer zur Erfassung vertikaler und horizontaler Verschiebungen,
- Dehnungsmessstreifen, Extensometer und ein mobiles Kamerasystem für die Rissdetektion und
- ein 3D-Laserscanner zur Erfassung der Verformung des Tübbings.

Die Messsensorik unterscheidet sich insbesondere hinsichtlich der Echtzeitfähigkeit. Die Messergebnisse der Seilzugsensoren, Extensometer und Dehnungsmessstreifen werden während der Versuchsdurchführung über Industriemesswertverstärker in Echtzeit aufgezeichnet. Für Messungen mit dem 3D-Laserscanner und dem Kamerasystem werden Pausen in der Laststufensteigerung eingelegt.

Für die Tübbingverformungsmessung mittels 3D-Laserscanning sind in mehreren Versuchen ein Z+F Imager 9010 C und ein Faro Focus 3D X 130 zum Einsatz gekommen. Der Laserscannerstandpunkt befindet sich mittig unterhalb des Tübbings knapp über dem Boden nahe dem Hohlkolbenzylinder (Punkt 4 in Abb. 2). Von diesem Standpunkt aus kann die Tübbinginnenfläche vollständig erfasst werden. Die Montage des Laserscanners erfolgt mittels Zwangszentrierung. Aus Sicherheitsgründen wird das Instrument während der Lasterhöhungen bei höheren Laststufen entfernt, wohingegen der Scanner in den Phasen der Lasterhöhung bei niedrigeren Laststufen nicht entfernt wird. Diese Vorgehensweise ermöglicht einen direkten Vergleich der einzelnen 3D-Laserscans ohne Notwendigkeit von Koordinatentransformationen.

2.3 Messdatenprozessierung

Die Prozessierung von Laserscandaten im maschinellen Tunnelbau bedient sich häufig einfacher geometrischer Modelle wie elliptischer Zylinder oder Kreiszylinder (Wang 2014). Für maschinelle Vortriebe liegt die Wahl eines Kreiszylinders auf Grund der Bauweise nahe (Nuttens T. S. 2014). Bei der Schätzung der Modelle konkurrieren algebraische und geometrische Lösungsansätze.

Algebraische Lösungen sind gekennzeichnet durch einen geringen Berechnungsaufwand und führen direkt auf die allgemeine Gleichung 2. Ordnung des geometrischen Körpers. Indes minimiert ein geometrischer Fit die Quadratsumme der euklidischen Distanzen gemessener Punkte zum geometrischen Körper, beispielsweise den Normalabstand zur Mantelfläche eines Kreiszylinders. Daraus resultieren rechenaufwändige, nicht lineare Gleichungssysteme, deren Lösung mit den klassischen Methoden der Ausgleichsrechnung gelingt, jedoch die Kenntnis von Startwerten bedingt. Diese Fittingmethode findet ihre Anwendung speziell bei Datensätzen, die nur Teile des geometrischen Körpers umfassen (Walton 2014). Tübbinge in aktuellen Tunnelprojekten überstreichen z. B. ca. 1/6 einer zylindrischen Mantelfläche. Darauf gründet sich die durchgehende Verwendung dieser Fittingmethode im vorliegenden Beitrag.

Die wesentlichsten Abweichungen vom perfekten zylindrischen Modell eines maschinellen Vortriebs mit Tübbingausbau bilden Einbau- und Herstellungungenauigkeiten der einzelnen Tübbinge. Beispielsweise liegt die Innenradiustoleranz eines Tübbings durchaus bei mehreren Millimetern. Lokale Abweichungen resultieren aus der individuellen Verformung (Eigengewicht, Temperatur) sowie auch der individuellen Produktions(un)genauigkeit der jeweiligen Tübbingschalung. Abb. 3 zeigt in einer Abwicklung die Normalabstände gescannter Punkte eines Tübbings vom gefitteten Zylinder. Die lokalen Abweichungen von der perfekten Zylinderform betragen durchaus mehrere Millimeter und sind als blaue Schlieren erkennbar. Grau treten die Tübbingschuhe und rot die Aussparungen für den Erektor (= Manipulator zum Versetzen der Tübbinge auf der TVM) und die Verschraubungen hervor. Als feine Linien werden am Tübbing aufgeklebte Verkabelungen der weiteren Messsensorik sichtbar.

Im Fachgebiet TLS nimmt Punktwolkenfilterung zur nicht auf dem Zielobjekt liegender Punkte breiten Raum ein. Zahlreiche Algorithmen befassen sich mit der Punktwolkenbereinigung (Zhu 2016). Für die Auswertung der Scandaten

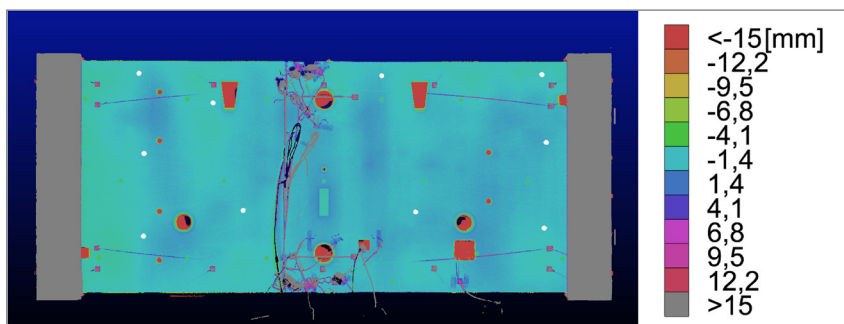


Abb. 3: Normalabstände von Scanpunkten eines am Prüfstand gemessenen Tübbingsegments zur gefitteten Zylinderfläche

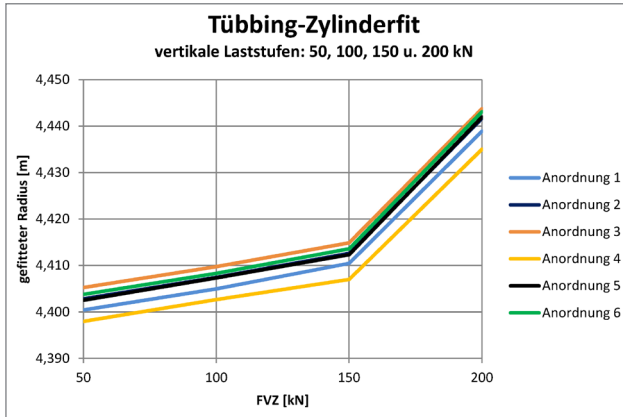


Abb. 4:
Gefittete Radien bei sechs verschiedenen Stützstellenanordnungen in einem Belastungsversuch

am Prüfstand werden für den Zylinderfit nur Scanpunkte gewählt, welche sich in einem Umkreis von 2 cm um zehn vorausgewählte Stützstellen befinden. Dies führt zu einer signifikanten Reduktion der Datenmenge für den Zylinderfit und verhindert, dass Scanpunkte in Verschraubungs- oder Erektortaschen oder auf aufgeklebter Messensorik in die Berechnung eingehen. Eine Anordnung dieser zehn Stützstellen ersieht man in [Abb. 3](#) anhand der weißen Punkte. Ein Zylinderfit greift so bei der vorliegenden Punktdichte auf immer noch mehr als 10.000 Scanpunkte zurück.

Die Wahl (Anzahl, Lage) der Stützstellen kann auf die gefitteten Zylinder radien in Abhängigkeit von der Fertigungsgenauigkeit des Tübbings einen signifikanten Einfluss ausüben. Eine Variation der Stützstellenanordnung führt zu Radiusänderungen von bis zu 1 cm. [Abb. 4](#) zeigt die errechneten Radien bei sechs verschiedenen, beliebig gewählten Anordnungen von 10 Stützstellen. Selbst eine geringfügige Verschiebung der Stützstellen um nur wenige Zentimeter kann bereits Radiusänderungen von mehreren Millimetern bewirken. Die Verwendung des gefitteten Radius als Kenngröße zur Interpretation der Tübbingdeformation aus aufeinanderfolgenden Scanepochen setzt somit voraus, dass die einmal gewählten Stützstellen in den Scanepochen exakt lokalisiert/reproduziert werden können.

In einem 3-Punkt-Biegeversuch wurde nachgewiesen, dass eine Laststeigerung eine Radiuszunahme bewirkt, welche ihre Entsprechung auch in einer wachsenden Rissanzahl hat ([Abb. 5](#)). Nach Beendigung des Lastversuchs kehrt der Tübbing infolge der Risse und plastischen Verformungen nicht mehr in seine ursprüngliche Form zurück. Bei der berührungslosen messtechnischen Begleitung des Versuchs kommen ein 3D-Laserscanner Faro Focus3D X 130 und eine auf einer Linearführung fixierte Digitalkamera Nikon D750 mit Teleobjektiv zum Einsatz. Mit der Kamera wird nach jeder Laststeigerung die Stirnseiten-

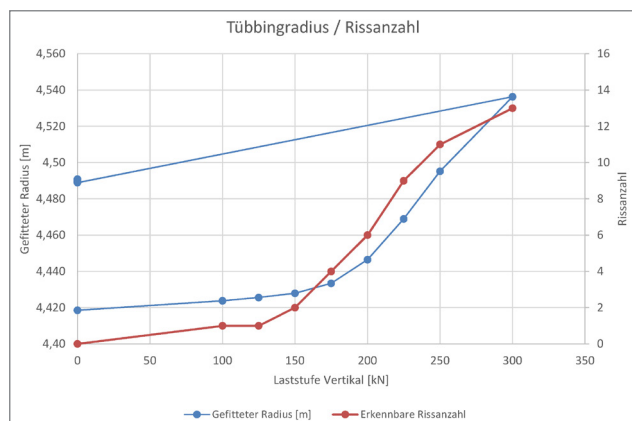


Abb. 5:
Verlauf des gefitteten Radius (blau)
und der Rissanzahl (rot)

mitte des Tübbings über einen Bereich von 1,80 m zur Dokumentation des Risswachstums aufgenommen. Die Belastungen werden in Schritten von 25 kN vertikal erhöht. Mit der Kamera können Auflösungen von weniger als 0,1 mm/px erreicht und Risse im frühen Stadium entdeckt werden. Rissanzahl und ermittelte Radien korrelieren deutlich (Abb. 5).

3 Laserscanning im maschinellen Vortrieb

3D-Laserscanning stellt ein probates Mittel zum Verformungsmonitoring maschineller Vortriebe dar (Nuttens T.D. 2010). Aufnahmen eines vollen Rings im unmittelbaren Schildbereich (somit unmittelbar nach Tübbingeinbau) erfordern infolge der ausgeprägten Sichtbehinderungen die Durchführung mehrerer Scans von unterschiedlichen Standpunkten. Hierfür muss der Vortrieb unterbrochen werden und es werden Zielformen benötigt, um die Scans zu registrieren. Für eine effiziente Verarbeitung der Scandaten zur Aussage über Verformungen wird ein steigender Automatisierungsgrad angestrebt. Im Allgemeinen ist das Monitoring bisher auf einzelne Messprofile oder -punkte beschränkt, wofür Punktidentitäten zwischen Referenz- und Vergleichsaufnahmen mittels Referenzzielformen bzw. -prismen für Scanner bzw. Totalstationen hergestellt werden müssen. Dies bedingt eine zeit- und arbeitsaufwändige Montage sowie Unter-/Erhaltung von Zielpunkten an den Tübbingen (Nuttens T.S. 2014, Zhu 2016).

Für eine dauerhafte messtechnische Überwachung und Dokumentation des Tübbingausbaus im Bereich unmittelbar nach dem Schild wird im Rahmen eines Forschungsprojekts (Projekt TBMonitor) erstmalig ein 3D-Laserscanner verwendet. Das Instrument ist dauerhaft mittels einer Konsole auf einer TVM

installiert. Nach jedem Ringbau bzw. TVM-Vorschub nimmt der Scanner den First- und Kämpferbereich mehrerer Tübbingringe auf (Chmelina 2016).

3.1 Messdatenprozessierung

Für eine automatisierte Extraktion und Identifikation des einzelnen Tübbings aus den Messdaten eignet sich die Extraktion von Konturlinien wie der Ringfuge. Überdies sind mit Auffinden der Ringfuge Profile abseits der schon erwähnten Aussparungen in der Tübbinginnenseite automatisch generierbar.

Die Extraktion von Konturlinien aus 3D-Scans ist eine vorwiegend im Airborne Laserscanning eingesetzte Technik zum automatischen Generieren von Bruchkanten in Geländemodellen. Häufig finden Algorithmen aus der Bildverarbeitung auf 2.5D-Darstellungen von Topographien Anwendung, die mittels Interpolation aus durch den Aufnahmeprozess unregelmäßig vorliegenden Punktwolken zu errechnen sind und unter anderem auf erprobte Bildverarbeitungsalgorithmen wie den Canny-Edge-Detektor zurückgreifen (Chen 2004, Briese 2004).

Für die Überführung der Scans in ein Format, das einer solchen Bildverarbeitung zugänglich ist, werden in die für 3D-Laserscans typische Flächendarstellung der erfassten Szene (Abb. 6 rechts) Abstände von einer gefitteten Mantelfläche gewissermaßen als Farbe eingefügt (Abb. 6 links). Dafür wird der Tübbingausbau mit einem Zylinder über auf den Segmenten liegende Stützstellen approximiert. Da der Laserscanner seiner dauerhaften Montage eine konstante Orientierung besitzt, können für jede Scanepoche die gleichen Startwerte des Zylinderfits verwendet werden.

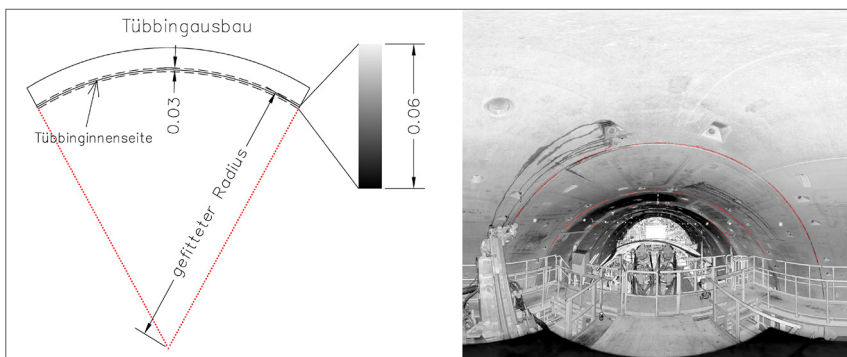


Abb. 6: Links: Schema für den Ersatz der Scanszene (rechts) durch in Grauwerte umgewandelte Punktabstände zur gefitteten Mantelfläche; Rechts: Scanszene in Vortriebsrichtung; rot: detektierte Punkte auf der Ringfuge

3.1.1 Extraktion von Konturen

Wie in Abb. 6 links angedeutet, werden die Abstände der Scanpunkte zur Mantelfläche des gefitteten Zylinders zu Grauwerten skaliert. In diese Skalierung werden nur jene Punkte einbezogen, deren Abstände zur Mantelfläche kleiner gleich 3 cm betragen. Für die Extraktion von Konturlinien (rot in Abb. 6 rechts) aus den Tübbingscans erweist sich die Verwendung des Canny-Edge-Detektors als hilfreich. Der Canny-Edge-Detektor vereint in sich die optimale Erfüllung mehrerer Ansprüche, darunter eine geringe Fehlerrate, eine möglichst genaue Lokalisierung von Kantenpunkten und die Rückgabe nur eines einzigen Kantenpunktes, wenn eine Umgebung bestehend aus mehreren möglichen Kantenpunkten gegeben ist (Gonzalez 2002). Die Ergebnisse des Detektors hängen wesentlich von seinen Parametern ab, zu denen zwei Schwellwerte zählen. Sie beeinflussen die Konnektivität der gefundenen Konturen stark. Aus der Aufnahmesituation des 3D-Laserscanners stellen sich die beiden Schwellwerte 15 und 40 als förderlich heraus, um eine gute Konnektivität der Ringfugenkonturen zu erreichen. Die Prozessierung wirft als Ergebnis Scanpunkte aus, an denen eine starke Variation der Zylindermantelabstände auftritt. Damit ist die Anzahl der Scanpunkte allerdings noch nicht auf die allein entlang der Fugen liegenden ausgedünnt. Ein weiterer Schritt zur Ausdünnung ist erforderlich.

3.1.2 Extraktion der Ringfuge

Für diesen Schritt wird ein für den Tübbingausbau mit ebener Ringfuge anwendbares RANSAC-Modell (RANdom Sample Consensus) implementiert. Der RANSAC-Algorithmus ist ein robustes Schätzverfahren, das häufig im Zusammenhang mit einer großen Anzahl von Ausreißern eines Rechenmodells genutzt wird. Seine Rechenschritte beginnen mit einer Zufallsauswahl von Punkten notwendig für ein Rechenmodell. Danach wird die Anzahl aller Punkte festgestellt, die innerhalb einer Fehlerschranke liegend mit diesem Rechenmodell übereinstimmen. Diese beiden Schritte werden in einer großen Anzahl wiederholt. Als robusteste Schätzung des Rechenmodells wird jene Zufallsauswahl gedeutet, die die meisten Treffer auf sich vereint (Szeliski 2011).

Der für einen Tübbingausbau mit ebener Ringfuge (siehe Abb. 6 bzw. Abb. 7 rechts) adaptierte RANSAC-Algorithmus führt folgende Schritte aus:

- Zufällige und i -mal wiederholte Wahl eines Punktes zur Generierung einer Ebene e_i mit dem Normalenvektor der Achse des über den Tübbingausbau gefitteten Zylinders,
- Berechnung der Lotabstände d aller nach der Canny-Edge-Detektion verbleibenden Punkte auf die Ebene e_i ,

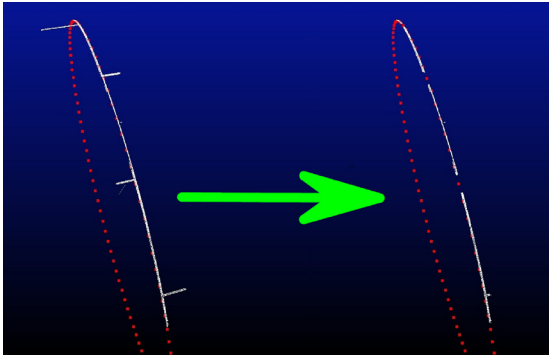


Abb. 7:

Von links nach rechts Beseitigung nicht der Ringfuge zugehöriger Punkte über Schwellenwertoperation der Singulärwerte aus dem Orthogonal Distance Fit (ODF)

- Wertung als einem der Ringfuge zugehörigen Punkt p , wenn der Rest r durch den Ringfugenabstand geteilten Lotabstände d kleiner als 0,05 m beträgt,
- für jede Ebene e_i wird die Anzahl der Punkte p vermerkt,
- die Ebene e_i mit der größten Anzahl der Punkte p wird als eine der parallel stehenden Ringfugen beurteilt.

3.1.3 Punktfiltrierung entlang der Ringfuge

Entlang einer Ringfuge tritt eine Anzahl weiterer mit dem Canny-Edge-Detektor erkannter Kanten, wie abgehende Längsfugen, Abplatzungen etc., auf, die als Ausreißer die Bestimmung der Lage der Ringfuge ungünstig beeinflussen. Für die Beseitigung dieser Merkmale werden die entlang der Ringfugen liegenden Punkte mit Ausgleichsgeraden gescannt. Dazu werden in regelmäßigen Abständen (rote Punkte in Abb. 7) die nach dem RANSAC-Schritt verbleibenden Punkte innerhalb einer Kugel von 15 cm Radius abgerufen und einer Ausgleichsrechnung als Raumgerade zugeführt. Die Berechnung der Geradenparameter erfolgt als Orthogonal-Distance-Fit (ODF) anhand einer Singulärwertzerlegung. Die Singulärwerte entsprechen der Quadratsumme der senkrechten Punktabstände, gebildet auf die Gerade durch den Schwerpunkt und den zugehörigen Singulärvektor (Ahn 2004). Ein Schwellenwertkriterium leitet die Beseitigung von Punkten ein. Gemäß diesem fallen alle Punkte weg, wenn das Verhältnis von kleinstem und nächstgrößtem Singulärwert 0,10 überschreitet. Den Effekt, wo sich die einzelnen Singulärwerte nur gering unterscheiden und sich keine eindeutige Richtung einer Raumgerade herauschält, sieht man in Abb. 7 links im Vergleich zu rechts. Dieser Rechenschritt vermindert die Ausreißer der Punkte entlang der Ringfugen beträchtlich und erbringt eine präzisere Lokalisierung der letztlich ermittelten Ebene der Ringfuge.

3.1.4 Ringfugenabstände aus Konturlinien versus Tübbingsegmentbreite

In Ergänzung zur Verwendung des Canny-Edge-Detektors und eines anschließenden RANSAC-Algorithmus zur Detektion der Ringfugen empfiehlt sich die Kontrolle der Abstände zwischen den einzelnen Ringebenen, da es sich bei den Tübbingringen um einen mit hoher Präzision hergestellten Ausbau konstanter Breite handelt. Die Scans von Ring A bis I in Abb. 8 werden der vorgeschlagenen Berechnungsabfolge jeweils 100-mal unterzogen. Die Parameter der Ringfugenextraktion sind wie folgt:

- Der Canny-Edge-Processing-Schritt erhält als oberen und unteren Schwellenwert die Werte 15 und 40.
- Der Abstand der Scanpunkte zu einer der parallelen Ringebenen beträgt max. 5 cm.
- Der RANSAC-Algorithmus iteriert maximal 200-mal.
- Das Verhältnis der Singulärwerte ist im höchsten Fall 0,1, um die Punkte auf der Ringfuge als Linienelement anzuerkennen.

Nach Anwendung dieser Berechnungsabfolge ergeben sich jeweils 100 Ebenendefinitionen für jede gefundene Ringfuge und für jeden Scan. Die Definitionen bestehen aus dem Normalenvektor und einem auf der Zylinderachse liegenden Punkt auf der Ebene. Abb. 8 rechts veranschaulicht rot und orange die Lage der mit dieser Berechnungsabfolge der Ringfuge zugewiesenen Punkte. Die roten Punkte streuen breiter als die dem Scanner näheren orangen Punkte. Der Aufnahmewinkel des Scanners beeinflusst somit wesentlich die Positionsbestimmung der Fugen.

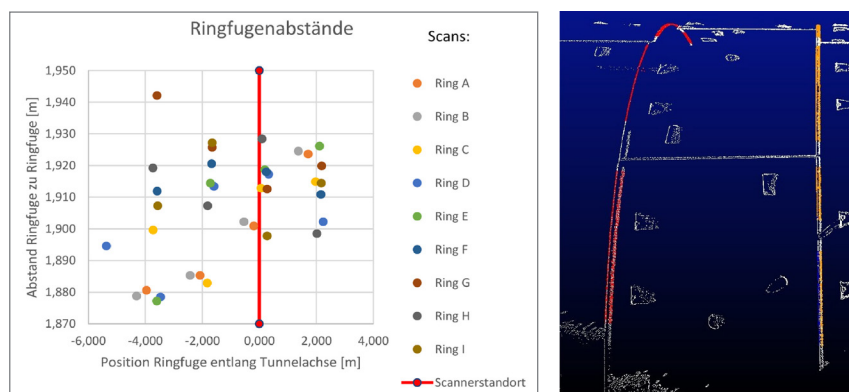


Abb. 8: Links: Abstände zwischen den Ringfugen, bezogen auf ihren Abstand vom Scanner entlang der Tunnelachse. Rechts: Lage der bei der Canny-Edge-Operation detektierten Punkte

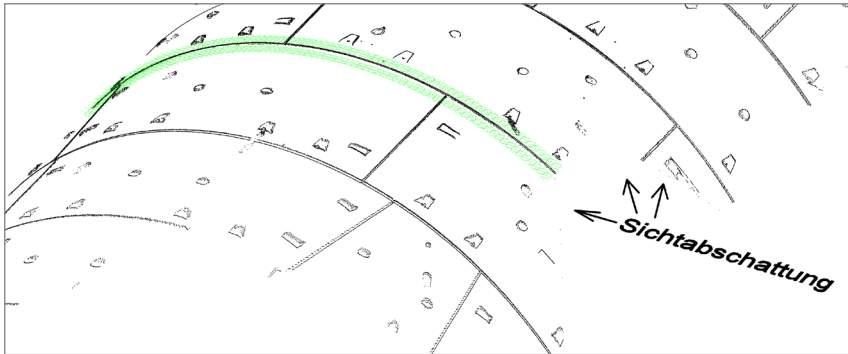


Abb. 9: Automatische Profilwahl (grün) entlang der Ringfuge zur Versatzkontrolle

Die Schnittpunkte von Zylinderachse und detektierter Ringebene zeigen durchgehend lagemäßig geringe Standardabweichungen im Bereich unterhalb eines Millimeters. Daher repräsentiert ein einzelner Datenpunkt in Abb. 8 links jeweils einen mittleren Abstand der 100-mal detektierten Ringfuge entlang der Tunnelachse vor (+) bzw. hinter (–) dem Laserscannerstandort (Position 0 m, rote vertikale Linie). Die pro Scan vorkommenden Ringfugen sind über gleiche Farbgebung erkennbar (siehe Legende in der Mitte). Vertikal ist in Abb. 8 der Abstand der jeweiligen hinteren zur vorderen Ringfuge eingetragen. Die ermittelten Ringfugenabstände stimmen dabei mit der projektspezifischen Konizität des Einzelrings überein.

Die automatische Ringfugendetektion ermöglicht die Erzeugung von Profilen, entlang derer sich der Versatz aufeinanderfolgender Tübbingringe (Abb. 9) als Differenzabstand auf die Tunnelachse errechnen lässt. Der parallele Abstand liegt mit 10 cm fest und sorgt für eine Platzierung des Profils abseits allfälliger Tübbingaussparungen. In Abb. 9 finden sich die Positionen, an denen aus dem Scan die Abstände zur Tunnelachse abgefragt werden, als grüner Streifen. Die Positionen sind in einem regelmäßigen Abstand festgesetzt. In die Berechnung des Abstands zur Tunnelachse fließen alle Scanpunkte im Umkreis von 8 cm

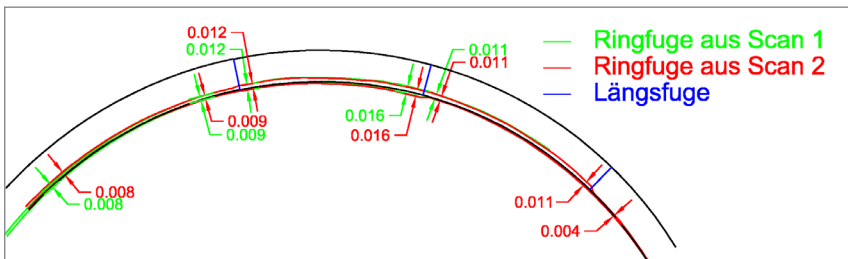


Abb. 10: Überhöhtes Profil der Versätze entlang einer Ringfuge, Vergleich zweier Scans

ein. Dabei wird der Median aller Punktabstände zur Beseitigung von Ausreißern verwendet. Das Vorliegen mehrerer Scans derselben Ringfuge gestattet zudem den Vergleich der Versätze über mehrere Hübe der TVM, wie in Abb. 10 bei zwei Scans in rot und grün mit überhöhten Profildarstellungen ersichtlich. Das grüne Profil ist infolge von Sichtabschattungen (Abb. 10 rechter Kämpferbereich) gegenüber dem roten verkürzt.

3.1.5 Extraktion der Längsfugen

In weiterer Folge braucht es für die Segmentierung des Tübbingausbaus ebenso einen Algorithmus zur Längsfugenextraktion mit folgenden Rechenschritten:

- Bereinigung aller entlang der Ringfugen liegenden Scanpunkte,
- zufällige Wahl eines nach der Canny-Edge-Operation verbleibenden Scanpunktes,
- Abfrage aller Punkte aus dem Scan, deren Abstand kleiner als 15 cm ist,
- Berechnung eines ODF-Linienfits,
- Schwellwertoperation über das Verhältnis der Singulärwerte,
- Schwellwertoperation über den Winkel zwischen dem Singulärvektor (= Richtungskosinus des gefitteten linienhaften Elements) des kleinsten Singulärwertes und der Tunnelachse.
- Bei Zutreffen beider Kriterien erfolgt die Berechnung eines neuen Abfragepunktes über einen Abstand und den im ODF-Linienfit gefundenen Richtungsvektor,
- Diese Rechenschritte werden bis zum Abbruch durch eine der beiden Schwellwertoperationen wiederholt und alle dadurch markierten Punkte aus den verbleibenden Scanpunkten ausgeschieden.
- Danach wiederholt sich die zufällige Wahl eines noch verbleibenden Scanpunktes.

Aus Abb. 11 werden obige Rechenschritte verständlich. Die Abbildung zeigt alle Scanpunkte, welche nach der Canny-Edge-Operation und der Beseitigung aller auf der Ringfuge liegenden Punkte übrig bleiben. Die zufällige Wahl greift einen der Scanpunkte entlang einer Längsfuge als Startpunkt auf, extrahiert alle Punkte innerhalb einer Umgebung (rote Kugel) und berechnet darüber einen Orthogonal-Distance-Fit. Nach Erfüllung der Schwellwertoperationen scannt der Algorithmus in bzw. entgegen der Vortriebsrichtung nach weiteren Umgebungen von Scanpunkten an anderen Positionen (schwarze Kugeln) bis zum Abbruch. Abb. 11 stellt die auf diese Weise gefundenen Längsfugen rot dar.

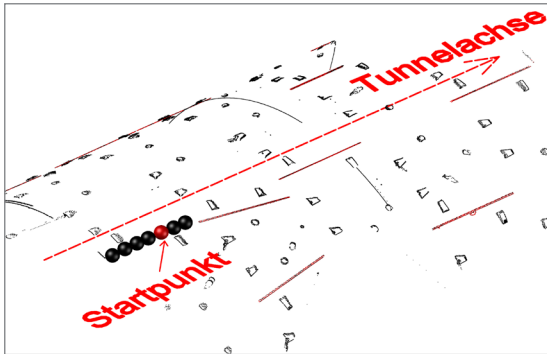


Abb. 11:
Suchalgorithmus nach Längsfugen mit Verfolgung linienhafter Scanpunktumgebungen in und entgegen der Vortriebsrichtung, beginnend z.B. an der roten Position

3.2 Segmentierung des Tübbingausbaus – Tübbingeinzelverformung

Die Segmentierung des Tübbingausbaus entlang Längs- und Ringfuge erlaubt nun erst die Untersuchung der Tübbingverformung und erkennt die Tübbinge als Starrkörper im Verband an, da die Fugen einer Verformung den geringsten Widerstand entgegensetzen. Zudem kann die Raumstellung der Tübbinge zueinander (Winkel zwischen Tübbingachsen von T1 und T2 in [Abb. 12](#)) im Zusammenhang mit Beschädigungen (Abplatzungen, Versätzen) erfasst werden und Startwerte für Iterative-Closest-Point Registrierungen liefern.

Laserscanning in der Nähe des Schildes unterliegt zumeist erheblichen Sichtabschattungen. Dies erschwert beispielsweise den Vergleich der Radien ([Abb. 12](#))

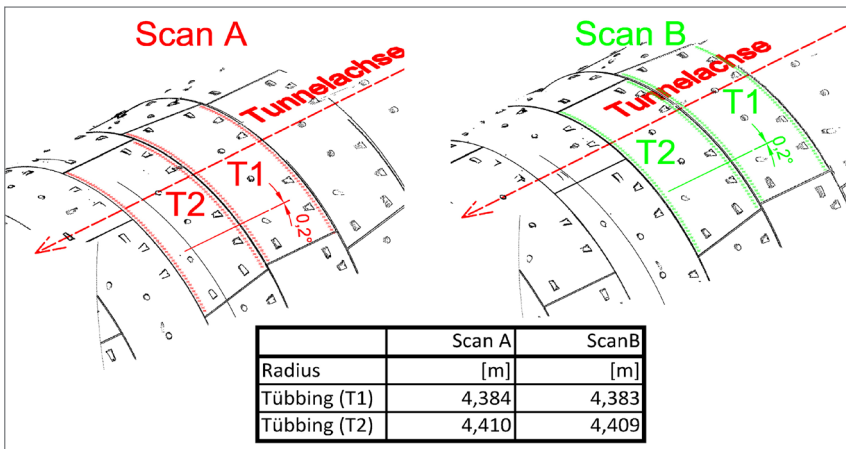


Abb. 12: Nach Segmentierung des Ausbaus mögliche Radiuskontrolle als Vergleich zwischen zwei Scans bzw. Maßen der Schalung, Schrägstellung zweier Segmente anhand beider Zylinderachsen

aus zwei unterschiedlichen Scans und erfordert eine Berücksichtigung der in die Berechnung einfließenden Stützstellen. Für die exemplarischen Angaben in Abb. 12 finden die rot bzw. grün gekennzeichneten Punkte entlang den Ringfugen Verwendung. Beide Tübbingsegmente (T1 und T2) sind in Scan A und B voll einsehbar und weisen nahezu die gleichen Radien auf. Die Betrachtung der Radien bedarf der Beachtung, dass bei dieser Tübbinggeometrie mit 8 mm Radiusänderung eine Durchbiegung von nur 1 mm einhergeht. Diese Eckdaten setzen besonderes Augenmerk auf die Kalibrierung des eingesetzten Instruments.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die berichteten Untersuchungen und Auswertungen zeigen, dass 3D-Laserscanner in Zukunft durchaus einen wertvollen Beitrag zur Verformungsmessung von auf einer TVM eingebauten Tübbing leisten können. Von besonderem bautechnischem Interesse sind dabei die Ermittlung der Gesamtverformung (Durchbiegung) des Einzeltübbings und der Tübbingversätze entlang der Fugen. Für einen effizienten Einsatz der Technologie müssen Datenerfassung und Auswertung jedoch noch weiterentwickelt und vor allem weiter automatisiert werden. Im Beitrag werden erste Konzepte, Messergebnisse und Auswertungen zur Verformungsermittlung und Fugenextraktion vorgestellt. In weiterer Folge ist angedacht, ein aus mehreren Scannern bestehendes Messsystem zu entwickeln, welches auf der TVM installiert wird und über Linearführungen die Aufnahmeeinheiten an geeignete Aufnahmepositionen verführt. Es soll die bisherigen Messverfahren ersetzen und eine vollflächige, berührungslose, hochgenaue und automatisierte Tübbingverformungsmessung leisten.

Die berichteten Untersuchungen werden im Rahmen des Projekts TBMonitor (2014–2017) von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG gefördert und gemeinsam von der Montanuniversität Leoben und dem Unternehmen Geodata ausgeführt.

Literatur

- Ahn, S. J. (2004): Least Squares Orthogonal Distance Fitting of Curves and Surfaces in Space. Springer, pp 125.
- Briese, C. (2004): Breakline Modelling from Airborne Laser Scanner Data, Dissertation. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.
- Chen, L. T. (2004): Fusion of lidar data and optical imagery for building modeling. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35(B4), pp. 732–737.
- Chmelina, K. (2016): Neue Entwicklungen bei Steuerleitsystemen für Tunnelbaumaschinen. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 219–225.

- Gehwolf, P. M.-W. (2016): Deformation measurements of tunnel segments at a newly developed test rig. *Geomechanics and Tunnelling*, 9, 3, 180–187.
- Gonzalez, R. C. (2002): *Digital Image Processing*. Prentice Hall, pp. 793.
- Nuttens, T. D. (2010): High resolution terrestrial laser scanning for tunnel deformation measurements. *Proceedings of the FIG Congress*, Sydney.
- Nuttens, T. S. (2014): Methodology for the ovalization monitoring of newly built circular train tunnels based on laser scanning: Liefkenshoek Rail Link (Belgium). *Automation in Construction*, 43, 1–9.
- Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (2009): *Tübbingsysteme aus Beton*. Wien.
- Szeliski, R. (2011): *Computer Vision, Algorithms and Applications*. London: Springer, pp. 812.
- Walton, G. D. (2014): Development of an elliptical fitting algorithm to improve change detection capabilities with applications for deformation monitoring in circular tunnels and shafts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 336–349.
- Wang, W. Z. (2014): Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 1 (5), 325–337.
- Zhu, N. J. (2016): Tunnel point cloud filtering method based on elliptic cylindrical model. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, 2016 XXIII ISPRS Congress, July 2016, Prague.

Kontakt

Robert Wenighofer | Robert Galler
Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Subsurface Engineering
Erzherzog Johann Straße 3, 8700 Leoben, Österreich
robert.wenighofer@unileoben.ac.at
robert.galler@unileoben.ac.at

Klaus Chmelina
Geodata Ziviltechnikergesellschaft mbH
Hütteldorferstraße 85, 1150 Wien, Österreich
klaus.chmelina@geodata.at

3D-Punktwolkenbasiertes Monitoring aus Sicht eines Ingenieurbüros – Chancen und Herausforderungen

Mario Haupt | Jens-André Paffenholz

1 Motivation

Die vermessungstechnische Erfassung von Deformationen eines Messobjektes ist eine typische Aufgabenstellung von einem Vermessungsbüro. Bei der Planung einer Monitoringaufgabe sind die richtige Auswahl des Messverfahrens, der Sensoren und der geodätischen Messdurchführung wichtige Fragestellungen, um eine bestmögliche Aussage über das Deformationsverhalten eines Objektes treffen zu können. Speziell bei komplex strukturierten Bauwerken (z. B. Gabionenwände) spielt die Auswahl der Messmethode eine wichtige Rolle zur Beurteilung von potentiellen geometrischen Objektveränderungen.

Neben den konventionellen punktbasierten Messmethoden, wie z. B. der Tachymetrie und dem Nivellement hat sich in den letzten Jahren das terrestrische Laserscanning (TLS) als weitere Erfassungstechnologie für die Bauwerksüberwachung von künstlichen und natürlichen Objekten etabliert (Holst und Kuhlmann 2016). Insbesondere bei komplexen Objektoberflächen weist das TLS aufgrund der flächenhaften Erfassung sowie seiner hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung gegenüber der punktuellen Messtechnologie entscheidende Vorteile auf. Infolge der flächenhaften Abtastung und entsprechender Datenanalyse können Aussagen über die vollständige Verformung 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.

Für ein Ingenieurbüro ergeben sich hieraus folgende Fragestellungen:

- Inwieweit muss das Monitoringkonzept für die Verwendung des TLS im Vergleich zum konventionellen Ansatz angepasst werden?
- Welche Möglichkeiten der flächenhaften Auswertung gibt es?
- Wie können eine Diskretisierung der 3D-Punktwolke und der Epochenvergleich erfolgen?
- Wie robust ist der gewählte Ansatz gegenüber dem Punktwolkenrauschen und Ausreißern?
- Welche Genauigkeiten sind erreichbar?

2 Grundlagen und Methoden

Die Ziele eines geodätischen Monitoring sind der Nachweis der Standsicherheit des überwachten Objektes sowie ein rechtzeitiges Detektieren von Veränderungen, um Gefährdungen für das Objekt sowie seine Umgebung zu vermeiden (Heunecke et al. 2013). Ein Monitoring unter Verwendung des terrestrischen Laserscannings ist ein komplexer Mess- und Auswertevorgang, der detailliert geplant, dokumentiert und systematisch analysiert werden muss, um eine hinreichende Datenqualität bei den Messergebnissen zu erzielen. Denn trotz aufwendiger Kalibrierung und Datenanalyse sind bei Monitoringaufgaben systematische Messfehler und -abweichungen nicht immer zu vermeiden. Dies liegt z. B. an den atmosphärischen Einflüssen, den Eigenschaften des Monitoringobjektes und den Messunsicherheiten der Sensorik. Diese Unsicherheiten können jedoch durch eine geeignete Vorgehensweise signifikant reduziert werden, sodass sich das TLS für das ingenieurgeodätische Monitoring und im Speziellen für die flächenhafte Deformationsanalyse natürlicher und anthropogener Objekte sehr gut einsetzen lässt (vgl. u. a. Eling 2009, Holst und Kuhlmann 2016, Ohlmann-Lauber und Schäfer 2011, Wujanz et al. 2014).

Sollen mehrere Messepochen zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf Deformationen untersucht werden, muss im Zuge der Auswertung ein gemeinsames geodätisches Datum festgelegt werden, damit eine Vergleichbarkeit der Epochen gewährleistet ist. Dazu ist ein robuster geodätischer Bezugsrahmen notwendig, der durch ein zeitlich stabiles Festpunktfeld und deren Koordinaten in Lage und Höhe beschrieben wird. Beim terrestrischen Laserscanning erfolgt die Datumsverfügung im Rahmen der Prozesse Registrierung und Georeferenzierung.

Die notwendigen Transformationsparameter zur Georeferenzierung der gemessenen Punktwolken können grundsätzlich mit den folgenden Methoden ermittelt werden (Paffenholz 2013):

- indirekte Georeferenzierung mittels künstlichen Zielmarken,
- direkte Georeferenzierung durch Nutzung externer Sensoren (z. B. GNSS).
- Seltener – insbesondere in Bezug auf Monitoringaufgaben – erfolgt die Georeferenzierung durch Nutzung von geometrischen Informationen innerhalb der gemessenen Punktwolken, verknüpft mit einer bereits georeferenzierten Datengrundlage (z. B. Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus).
- Die weiteren Untersuchungen hinsichtlich der praktikablen Anwendbarkeit des terrestrischen Laserscannings für das geodätische Monitoring beschränken sich auf die Methode der indirekten Georeferenzierung.

Nach derzeitigem Stand kommen für eine 3D-Deformationsanalyse eines Messobjektes hauptsächlich zwei Messmethoden in Frage:

- Bei der Tachymetrie handelt es sich um eine etablierte Messmethode, die bereits seit vielen Jahren bei geodätischen Überwachungsmessungen Anwendung findet und sich durch eine hinreichende Anzahl an Monitoringkonzepten und Messprogrammen auszeichnet.

Für das terrestrische Laserscanning, als relativ junge Disziplin in der ingenieurgeodätischen Überwachungsmessung, müssen die einzelnen Bearbeitungsschritte Planung, Ausführung und Auswertung noch genauer betrachtet und ein Gesamtkonzept in Abhängigkeit des Betrachtungsobjekt erarbeitet werden. In Analogie zu tachymetrischen Messungen wird ein Referenzrahmen für den epochalen Vergleich benötigt. Dieser Referenzrahmen kann zum einen über klassische Passpunkte oder eine direkte Georeferenzierung mit z. B. GNSS-Equipment erfolgen (Paffenholz 2013). Die Objektdiskretisierung unterscheidet sich durch die flächenhafte Erfassung des TLS fundamental von der tachymetrischen Vorgehensweise. Hiermit geht einher, dass die Objektdiskretisierung nicht a-priori

im Zuge der Planung erfolgen muss, sondern im Nachgang im Rahmen der Auswertung. Aufgrund des flächenhaften Charakters des TLS sowie des Unsicherheitsbudgets durch u. a. die reflektorlose Distanzmessung ist der Planung der Aufnahmestandpunkte im Rahmen der Planung eine besondere Bedeutung zuzuschreiben. Aufgrund der Komplexität des terrestrischen Laserscannings und seiner Auswertergebnisse stellt das Monitoring sowie die Deformationsanalyse und deren Ergebnisinterpretation eine besondere Herausforderung an den ingenieurgeodätischen Sachverstand dar. Zum einen muss das Unsicherheitsbudget, wie oben bereits erwähnt, (z. B. Rauigkeit, Auftreffwinkel, Objektmaterial, etc.) in das Messkonzept und in die Interpretation der Ergebnisse der Überwachungsmessung einbezogen werden (Paffenholz et al. 2015). Zum anderen muss die Deformation bzw. deren Richtung einer erweiterten Betrachtung unterzogen werden, da eine Ableitung von z. B. 3D-Verschiebungen aus den Punktwolken nicht ohne weiteres möglich ist. Durch die flächenhafte Objektrepräsentation in 3D-Punktwolken ist eine entsprechende Berücksichtigung bei der Modellierung von Objektveränderungen im Rahmen des Monitorings erforderlich. Diese unterscheidet sich von der klassischen Zuordnung identischer Objektpunkte in unterschiedlichen Messepochen. Einen Überblick über unterschiedliche Ansätze zur Ableitung von Deformation aus 3D-Punktwolken geben Ohlmann-Lauber und Schäfer (2011). Die Autoren identifizieren fünf Modelle zur Modellierung von Deformationen: punktbasierte, punktwolkenbasierte, oberflächenbasierte, geometriebasierte und parameterbasierte Modelle. Vertiefte Information zum ingenieurgeodätischen Monitoring mit TLS gibt auch Wujanz (2016).

Im Folgenden sind ausgewählte Methoden der flächenhaften Auswertung von 3D-Punktwolken für die Deformationsanalyse zusammengestellt. Eling (2009) erstellt zum einen ein Blockgittermodell für das Deformationsobjekt, hier eine Talsperre, und leitet für repräsentative Punkte innerhalb eines Gitterblockes

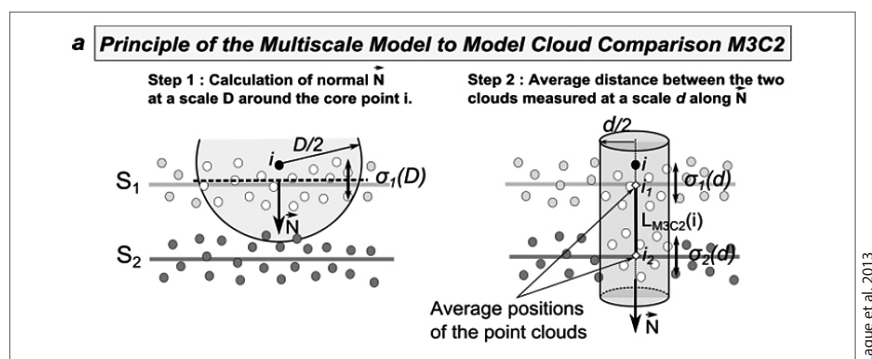


Abb. 2: Prinzipskizze des M3C2 Algorithmus und der zwei benutzerdefinierten Parameter D (Normalenmaßstab) und d (Projektionsmaßstab)

geometrische Veränderungen ab. Zum anderen beschreibt Eling (2009) die Approximation durch eine geometrische Form (hier Ellipsoid) für die Talsperre. Komplexere Formen und Ansätze zur Objektbeschreibung finden sich in Harmening und Neuner (2015), die Spline-Funktionen zur Modellierung von natürlichen Objekten (hier Gurkenblätter) einsetzen. Ein unmittelbarer Vergleich der 3D-Punktwolken je Epoche ohne Approximation oder Modellierung kann im Rahmen einer Berechnung der 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke (Cloud2 Cloud) Differenzen erfolgen. Lague et al. (2013) stellen einen multiskaligen Model zu Model Punktwolke Vergleich (Multiscale Model to Model Cloud Comparison M3C2) Algorithmus vor. Das Prinzip des Algorithmus ist in Abb. 2 gezeigt. Eine Implementierung des M3C2-Algorithmus bietet das OpenSource Programm CloudCompare (CloudCompare 2016).

3 Praktische Anwendung

3.1 Messobjekt Gabionenwand

Für den Test der praxisnahen Anwendbarkeit des 3D-Punktwolkenbasierten Monitorings wurde eine Gabionenwand ausgewählt. Die Gabionenwand befindet sich in der Nähe der Stadt Freyburg (Unstrut) in der unmittelbaren Nähe der Bundesstraße 180 und verläuft grob in Nord-Süd-Richtung.

Das terrassenartige Bauwerk hat eine Länge von ungefähr 70 m bei einer maximalen Höhe von 7 m und die Gabionensteine werden durch ein Metallgitter mit regelmäßigen Raster (ca. $3 \times 3 \text{ cm}^2$) gestützt (Abb. 3). Die vorhandene Vegetation ist stark jahreszeitabhängig.

Im direkten Umfeld der Gabionenwand existieren fünf Festpunkte der Landesstraßenbauverwaltung Sachsen-Anhalt (LSBB) (Abb. 4), die als Stützpunkte des Bezugsrahmens für die Festlegung des geodätischen Datums dienen. Des Weiteren sind durch ein Ingenieurbüro bereits tachymetrische Netzmessungen



Abb. 3:

Blick auf die Gabionenwand
aus östlicher Richtung

Sander 2015

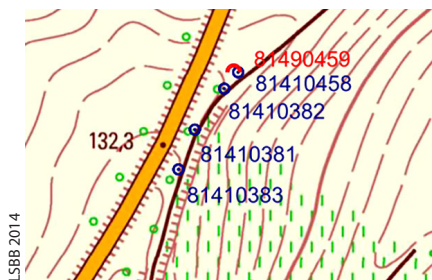


Abb. 4: Übersicht Festpunkte

Die Ergebniswerte liegen im Subzentimeter-Bereich.

3.1.1 Planung

Bei der Planung eines geodätischen Monitorings unter Verwendung des terrestrischen Laserscannings müssen eine Vielzahl von theoretischen Vorüberlegungen angestellt werden:

- Ausreichende Objektkennntnis (Objektausdehnung)
- Kenntnis über das Messumfeld, insbesondere hinsichtlich Aufstellmöglichkeiten und möglichen Sichtbehinderungen
- Maximale Messentfernung zum Objekt
- Potentiell zu erwartende Deformationen und deren Magnitude
- Geforderte Objektgenauigkeiten/-auflösung
- Lage und Genauigkeit des Festpunktfeldes
- Verteilung der Passpunkte/Zielmarken
- Festlegung des Messzeitpunktes hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Objektveränderung
- Messaufwand und Kostenrahmen

Mit den Erkenntnissen aus den theoretischen Vorüberlegungen werden die benötigten Sensoren für die Überwachungsmessung an der Gabionenwand zusammengestellt:

- Zoller+Fröhlich (ZF) Imager 5006(i) zur Objekterfassung
- Leica TS30 zur Messung des Festpunktfeldes und der TLS-Zielmarken

Zur Sicherstellung richtiger Messgrößen und um den hohen Genauigkeitsanforderungen bei Überwachungsmessungen gerecht zu werden, ist eine Überprüfung des Instrumentariums in einem festen zeitlichen Turnus oder direkt vor Messungen notwendig. Eine Überprüfung des verwendeten terrestrischen Laserscanners erfolgte im Vorfeld der örtlichen Messungen gemäß DVW-Merk-

blatt „Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern“ (Neitzel et al. 2014).

3.1.2 Durchführung

Die Gabionenwand wurde im Zeitraum von 2014 bis 2015 insgesamt in drei Messepochen beobachtet (Kröhnert 2014, Sander 2015). Das Messobjekt wird zu jeder Epoche von drei Standpunkten aus gescannt, wobei zwei Standpunkte auf den vorhandenen Anschlusspunkten des übergeordneten Festpunktfeldes sowie ein freier Standpunkt ausgewählt wurden. Zusätzlich sind zur Bestimmung der Zielmarken und zur Kontrolle der Stabilität des geodätischen Datums tachymetrische Messungen in zwei Vollsätzen ausgeführt wurden.

3.1.3 Auswertung

Im ersten Schritt der Auswertung erfolgt die Berechnung der tachymetrischen Netzmessung zur Überprüfung der Stabilität der Festpunkte. Der statistische Nachweis über die Stabilität erfolgt über eine freie Netzausgleichung mit anschließender Deformationsanalyse. Werden die Festpunkte als stabil detektiert, können anschließend die Koordinaten der Zielmarken bestimmt werden, die die Grundlage für die Registrierung/Georeferenzierung der erfassten Einzelpunktwolken bilden. Die Georeferenzierung erfolgte in der Software *Z+F LaserControl* und es konnten in den einzelnen Messepochen durchschnittliche Abweichungen im Bereich von 2 mm und Standardabweichungen im Bereich von 1 mm erreicht werden. Somit entsprechen die Genauigkeitswerte der geschätzten Transformationsparameter hinsichtlich Ihrer Restklaffungen und Standardabweichungen den Erwartungen und können als gut bewertet werden. Eine qualitativ hochwertige Datumsverfügung bildet die Grundlage, um absoluten Lageänderungen zwischen zwei Messepochen aufdecken zu können. Die gemessenen und registrierten Einzelpunktwolken werden zu einer Gesamtpunktwolke vereinigt und der relevante Bereich der Gabionenwand extrahiert.

Bevor der eigentliche Epochenvergleich mit anschließender Deformationsanalyse der Gabionenwand durchgeführt werden kann, muss die extrahierte Gesamtpunktwolke vom Rauschen und dem Bewuchs bereinigt werden. Eine erste Ausreißerdetektion ist mit einer RANSAC (engl. random sample consensus) Ebenenschätzung möglich, die aufgrund der Objektbeschaffenheit (teilweise starker Bewuchs, terrassenartige Bauweise) jedoch keine vollständige Elimination der Ausreißer erreicht. Sodass teilweise eine aufwendige manuelle Nachbereinigung notwendig ist.

Eine weitere Möglichkeit der Punktwolkensegmentierung ist die Verwendung der Software *CloudCompare* (CloudCompare 2016), die eine gute Ausrei-

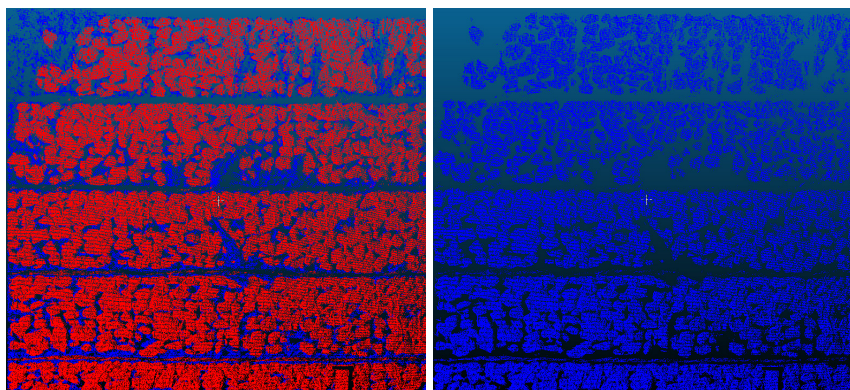


Abb. 5: Punktwolkenausschnitt unbereinigt (links) und nach Filterung (rechts)

ßerdetektion mittels Rauschfilterung sowie „Bewuchsbereinigung“ ermöglicht (Abb. 5). Erst eine „saubere“ Punktwolke ermöglicht eine qualitative und zuverlässige Deformationsbewertung.

Der Epochenvergleich zwischen der Epoche 2/2014 und 2015 der bereinigten Punktwolken für die Gabionenwand wurde mit verschiedenen flächenhaften Auswertemethoden getestet. Es kamen die in Kap. 2 kurz eingeführten Ansätze: Blockgittermodell, Formapproximation und 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke Vergleich zur Anwendung.

Bei der Auswertung mittels Methode Blockgittermodell wird der relevante Bereich der Gabionenwand in ein regelmäßiges Raster von Blöcken (quadratisch oder rechtwinklig) eingeteilt. Anschließend müssen die einzelnen Punkte der georeferenzierten 3D-Punktwolke eindeutig den Blöcken zugeordnet werden. Für jeden Block wird eine Filterung durch iterative Ebenenschätzung nach Drixler (1993) und die Bestimmung der Blockmittelpunkte durchgeführt. Zur Ableitung von Objektbewegungen werden die Distanzen zwischen den berechneten Blockmittelpunkten der einzelnen Epochen bestimmt. Zum Test der Ergebnisse bei unterschiedlichen Konfigurationen sind Blöcke verschiedener Größe (z. B. $1,0 \times 1,0 \text{ m}^2$, $1,0 \times 0,5 \text{ m}^2$) gewählt wurden.

In der Abb. 6 ist deutlich zu erkennen, dass Teilbereiche der Gabionenwand Deformationen zeigen, die keine realistischen Werte aufweisen. Ursache hierfür ist in der komplexen Struktur der Gabionenwand zu suchen, die mit dem verwendeten Blockgittermodell nicht repräsentativ dargestellt wird. Besonders in den Bereichen mit starken Bewuchs und den horizontalen Versprüngen von ca. 30 cm aufgrund der terrassenartigen Bauweise versagt diese Methode.

Sind Ebenen, wie im Blockgittermodell, nicht ausreichend um Objekte geometrisch zu beschreiben, sind Quadriken als weiterführende Formapproximation möglich. Somit wird im weiteren Testverlauf für die Gabionenwand ver-

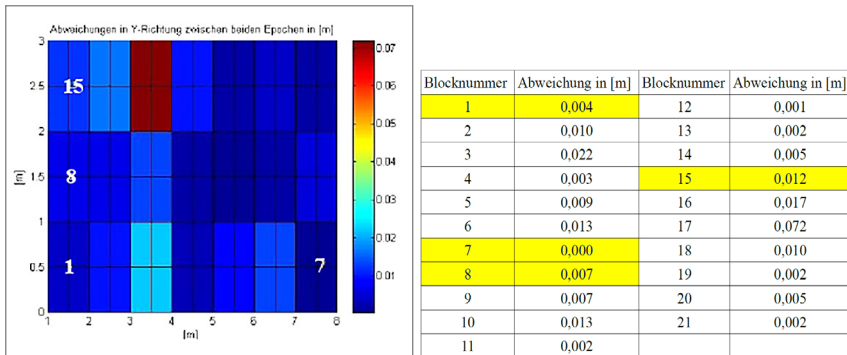


Abb. 6: Deformationsdarstellung in Y-Richtung zwischen den Messepochen 2/2014 und 2015 bei einer Blockgröße von $1,0 \times 1,0 \text{ m}^2$. Die Abweichungen ausgewählter Blöcke (1, 7, 8, 15) sind farblich hervorgehoben.

sucht eine bestangepasste Geometrieform zu ermitteln. Es wird der Ansatz nach Drixler (1993) genutzt, um die Quadrikparameter aus der Objektgeometrie zu bestimmen. Anhand der bestimmten Quadrikkoeffizienten wird mittels Hauptachsentransformation die Klassifizierung der Objektgeometrie vorgenommen. Eine eindeutige Festlegung lassen die berechneten Werte nicht zu, sodass ein elliptischer Zylinder sowie ein Ellipsoid, als beschreibende Objektform gewählt werden könnten. Es wird an dieser Stelle die mathematisch strenge Form des Ellipsoids gewählt. Für die Gabionenwand wird anschließend ein Ellipsoid mit seinen zehn Parametern anhand eines Gauß-Markov-Modells mit Restriktionen geschätzt.

Eine Lösung für das Gauß-Markov-Modells mit Restriktionen gelingt in diesem Fall nicht. Der Epochenvergleich kann mit der beschriebenen Methode der Formapproximation für die Gabionenwand nicht realisiert werden. Der Hauptgrund für das Scheitern des Ausgleichungsproblems ist die geringe räumliche Ausdehnung der Gabionenwand von ca. 500 m^2 im Vergleich zum gesuchten Ellipsoid mit einer Oberfläche von ca. 164 Mio. m^2 (Abb. 7). Für weitere Details wird auf Sander (2015) verwiesen.

Eine weitere Möglichkeit des Epochenvergleichs von 3D-Punktwolken ist durch die Verwendung der Software CloudCompare gegeben. CloudCompare bietet als OpenSource-

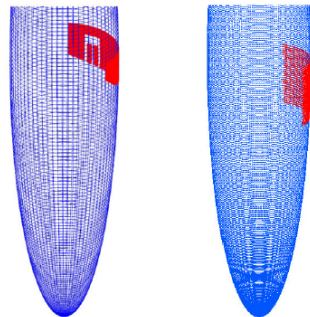


Abb. 7: Links: Gemessene Punktwolke im geschätzten Ellipsoid nach Eling (2009). Rechts: Geschätzte Punktwolke im simulierten Ellipsoid

Software eine Vielzahl von Applikationen zur Filterung, Segmentierung und Analyse von Punktwolken an. Für die Distanzberechnung von Veränderungen zwischen zwei Punktwolken stellt die Software verschiedene Methoden zur Verfügung:

- Closest point distance L_{C2C}
- Point to mesh distance L_{C2M}
- Multiscale model to model cloud comparison L_{M3C2}

Diese Methoden unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Positionsungenauigkeiten innerhalb der Punktwolke, Registrierungenauigkeiten zwischen den Punktwolken und Fehlern aufgrund der Oberflächenrauigkeit. Aufgrund der Vorteile des M3C2-Algorithmus (Lague et al. 2013) gegenüber den anderen Methoden ist er beim Epochenvergleich der Gabionenwand angewendet wurden.

Mit dieser Methode konnten realistische Ergebnisse für die Deformationswerte im Subzentimeterbereich erzielt werden, wie sie in Abb. 8 oben als 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke Differenzen dargestellt sind. Ebenfalls ge-

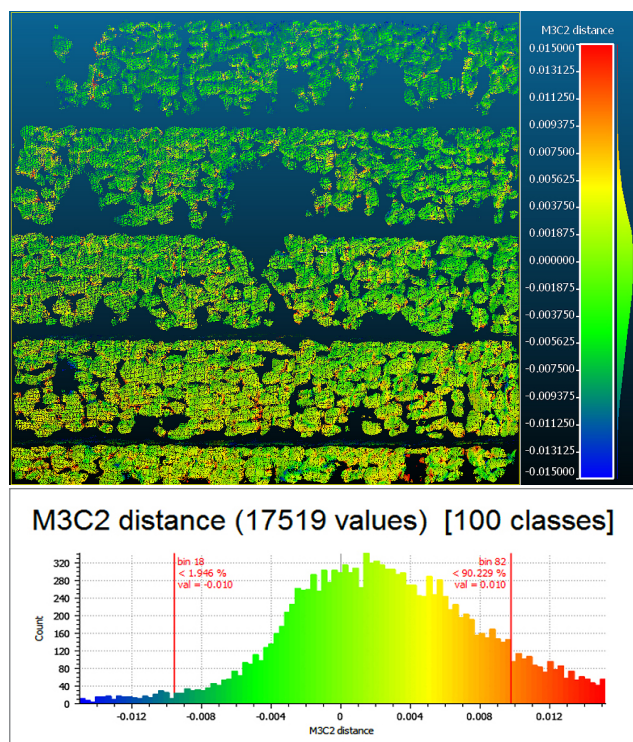


Abb. 8:

Oben: Ergebnisbild des 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke Distanzberechnung zwischen zwei Epochen (M3C2-Plugin).
Unten: Histogramm der 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke Differenzen.

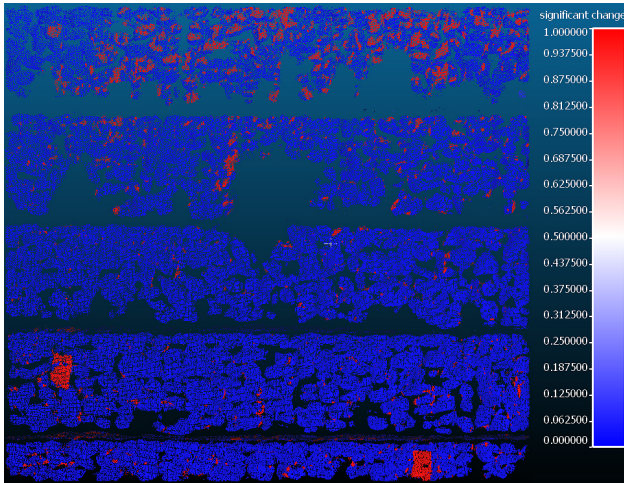


Abb. 9:
Darstellung signifi-
kante Abweichun-
gen zwischen zwei
Messepochen; die
Zielmarken aus
den verschiedenen
Messepochen wer-
den als signifikante
Veränderung richtig
erkannt.

zeigt in Abb. 8 unten ist das Histogramm der Punktwolke-zu-3D-Punktwolke Differenzen, welches eine rechtsschiefe Verteilung mit einem Maximum bei ca. 2 mm aufweist. Ca. 88 % der Differenzen haben einen Wert zwischen ± 1 mm. Die Größenordnungen der interepochalen Differenzen stimmen mit denen tachymetrischen Messungen überein.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit sich die signifikanten Lageabweichungen zwischen den beiden Punktwolken unter Berücksichtigung der Registriergenauigkeit, wie in Abb. 9, darstellen zu lassen. Diese Datenauswertung erlaubt unter Berücksichtigung etwaiger verbliebener Störpixel (z.B. Bewuchs) und entsprechender Ergebnisinterpretation eine Aussage über den tatsächlich deformierten Bereich.

4 Zusammenfassung und Fazit

Anhand der praktischen Anwendung der verschiedenen Methoden zur flächenhaften Deformationsanalyse hat sich gezeigt, dass ein 3D-Punktwolkenbasiertes Monitoring gute Ergebnisse liefern kann. Jedoch sind die Qualität und die Durchführbarkeit des Epochenvergleichs von mehreren Faktoren abhängig. Es muss je nach Objektbeschaffenheit und gemäß den vorliegenden Randbedingungen eine Methodenauswahl erfolgen. Die gesammelten Erfahrungen werden dabei sicherlich einen wichtigen Beitrag leisten.

Die Vorteile des flächenbasierten Monitoringansatzes sind vor allem in einer vollumfänglichen Betrachtungsweise der Bauwerks- bzw. Objektbewegungen zu sehen. Zudem bietet diese Vorgehensweise gegenüber dem punktuellen

Epochenvergleich eine größere Robustifizierung der Ergebniswerte z.B. aufgrund von Glättungseffekten bei der Approximation sowie bei der Elimination von Fehlmessungen. Ebenso können die flächenbasierten Auswertemethoden auf jegliche 3D-Punktwolken (UAV, Videotachymetrie, etc.) übertragen werden.

Um aussagekräftige Ergebnisse beim 3D-Punktwolkenbasierten Monitoring zu erhalten, müssen insbesondere das Punktwolkenrauschen sowie enthaltene Störpixel minimiert werden. Hiermit sind die größten Risiken im Auswerteprozess verbunden, da eine nicht ausreichende Berücksichtigung dieser Fehleinflüsse zu Fehlinterpretationen beim Epochenvergleich führen kann. Zukünftig sind noch Anpassungen an der Auswertungsdurchführung vorgesehen, um eine höheren Automatisierungsgrad zu erreichen und um allgemeingültigere Abläufe zu installieren.

Literatur

- CloudCompare (2016): CloudCompare – 3D point cloud and mesh processing software – Open Source Project. www.danielgm.net/cc, letzter Zugriff: 12.10.2016.
- Drixler, E. (1993): Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission Reihe C, Nr. 409, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- Eling, D. (2009): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission Reihe C, Nr. 641, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- Heunecke, O.; Kuhlmann, H.; Welsch, W.; Eichhorn, A.; Neuner H. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie – Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, 2. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Holst, C.; Kuhlmann, H. (2016): Challenges and Present Fields of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses. *Journal of Applied Geodesy (JAG)* 10 (1), S. 17–25.
- Kröhnert, D. (2014): Flächenhafte Deformationsanalyse von komplex strukturierten Bauwerken mittels terrestrischen Laserscanning. Bachelorarbeit (unveröffentlicht), Geodätisches Institut der Leibniz Universität Hannover.
- Lague, D.; Brodu, N.; Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner. Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82(2013), S. 10–26.
- Neitzel, F.; Gordon, B.; Wujanz, D. (2014): Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS), DVW-Merkblatt Nr. 7.
- Ohlmann-Lauber, J.; Schäfer, T. (2011): Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011 mit TLS-Challenge*. DVW-Schriftenreihe, Band 66/2011, Wißner-Verlag, Augsburg, 147–157.
- Paffenholz, J.-A. (2013): Effiziente Geo-Referenzierung von 3D Punktwolken und deren Nutzung für Monitoringaufgaben. In: Rüppel, U. (Hrsg.): *2. Darmstädter Ingenieurkongress. Bau und Umwelt. Darmstadt, 12.–13.03.2013*. Aachen: Shaker Verlag (Bauwesen), S. 581–588.

- Paffenholz, J.-A.; Neumann, I.; Holst, C.; Kuhlmann, H. (2015): Qualitätssicherung von kinematischen TLS-basierten Multi-Sensor-Systemen. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestri-sches Laserscanning 2015 (TLS 2015). DVW-Schriftenreihe, Band 81/2015, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 123–135.
- Sander, J. (2015): Ingenieurgeodätisches Monitoring anthropogener Strukturen mittels 3D Punktwolken. Masterarbeit (unveröffentlicht), Geodätisches Institut der Leibniz Universität Hannover.
- Wujanz, D. (2016): Terrestrial Laser Scanning for Geodetic Deformation Monitoring: Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission Reihe C, Nr. 775, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- Wujanz, D.; Neitzel, F.; Krueger, D.; Manthe, C. (2014): DefoScan++: Oberflächenbasier-te Registrierung terrestrischer Laserscans für die Deformationsanalyse. Allg. Verm. Nachr. (avn), 121(2014)1, S. 13–21.

Kontakt

Mario Haupt
Glückauf Vermessung GmbH
Salzstraße 10, 99706 Sondershausen
m.haupt@glueckauf-vermessung.de

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

TLS-based Deformation Monitoring of Snow Structures

Eugenio Serantoni | Andreas Wieser

1 Introduction

Terrestrial laser scanning (TLS) is already a standard technique for data acquisition in the context of 3D modelling of civil structures, and of the built and natural environment in general. TLS based monitoring of landslides (Bitelli et al. 2004) and rockfalls (Strunden et al. 2015) is already extensively put into practice since cm-level accuracy of points within the point clouds is sufficient for these applications. However, the suitability of TLS for structural monitoring is not as clear since the deformations to be detected are small compared to the accuracy of the points within the point clouds and the methods for a proper data analysis in view of such applications have not yet been developed.

In early 2016, a large igloo was built for commercial and recreational purposes near Rotenboden in Switzerland (see Fig. 1, Iglu Dorf, Zermatt). Monitoring of the igloo was required to assure safety of the visitors and exhibits. TLS was initially taken into account for this purpose but because of the lack of software



Fig. 1: The igloo, covered with non-compacted snow on the outside (laser scanner during an outside scan, two wooden spheres used for registration).

facilitating quasi-continuous, automatic monitoring, and because of missing experience with respect to the feasibility taking into account that the surfaces would consist of snow, this initial idea was dismissed. The igloo was instead monitored by a local surveying company using a single GNSS antenna on top of the dome. However, the authors were able to collect TLS measurements and carry out a deformation analysis offline in order to gain experience. We report on the measurements, analysis and the findings herein, particularly focusing on the quality of the measurements and on the benefit of areal monitoring instead of pointwise one.

Warren (1982) summarizes extensive experimental and theoretical results regarding the optical properties of snow indicating, among other findings, that snow reflects near-infrared wavelengths much less than visible light and that large grains reflect less than small grains. Painter and Dozier (2004) showed that the reflectance depends on the grain size and on the incidence angle in an anisotropic way. More application-oriented studies on the reflectivity of snow using laser scanners operating in the visible range of spectrum suggest that the type of snow has no influence on the angle-of-incidence dependence of the reflectivity but that wet snow is less suitable to be measured than dry one because of higher absorption (Prokop 2008) and deeper penetration (Anttila 2016). Outdoor measurements of snow surfaces may also be negatively affected by solar radiation, which can significantly deteriorate the signal-to-noise ratio (Prokop 2008).

TLS measurements on snow and ice may thus seem to be very unusual. However, several authors have already reported on the use of TLS for investigating the dynamics and the mass balance of glaciers and snow catchments (Egli et al. 2012, Fischer et al. 2016, Kenner et al. 2011, Kukko et al. 2013, Prokop et al. 2008). Friedli and Wieser (2016) have shown results of the deformation monitoring of a glacier using a long range laser scanner particularly adapted to measurements on snow and ice by the manufacturer. A goal similar to the one presented herein was pursued by Willi and Theiler (2013) who tried to determine the changes of a touristic ice cave located within a glacier, also near Zermatt. Using scans obtained at three epochs with a Z+F Imager 5006i they found that the cave had subsided by up to 25 cm over a period of about 200 days. Although the laser beam obviously penetrated the surface of the cave, the displacements between two epochs were identified with standard deviations of about 2 cm. The georeferencing required for datum definition was a particular challenge in that project. It was achieved by including a nearby cave within stable rock into the scans and using it as reference assuming it had not moved or rotated between the epochs.

The igloo used herein was officially certified¹ as the biggest in the world with an interior base diameter of 12.9 m and a height of approximately 9 m. The igloo

1 www.iglu-dorf.com/de/ueber-uns/firma/weltrekord, accessed on 1/9/2016.

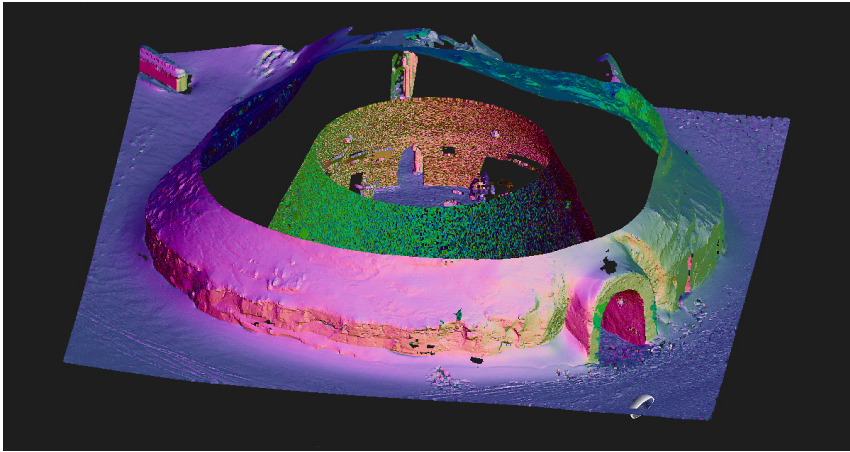


Fig. 2: Bottom part of the 3D model of the igloo at epoch 2 (1/2/2016) showing both the exterior and interior surfaces (7 scans outside, 1 inside); registered, homogenised, meshed and rendered using Autodesk ReCap. The colours represent the direction of the surface normals.

was built from a rising spiral of blocks ($60 \times 45 \times 15 \text{ cm}^3$) made of compacted artificial snow. In order to protect the snow bricks from sun radiation and thus increase the endurance of the structure, the whole dome was covered on the outside by a thick layer of non-compacted snow (see Fig. 2). The thickness of this layer varied during the lifetime of the igloo because of melting, compaction and periodical replenishment. The internal surface of the igloo remained untouched for the whole lifetime of the structure except below a height of approximately 2.5 m, where minor modifications were made in relation to the exhibition. So, the subsequent analysis of the deformation of the igloo refers almost exclusively to the interior surface and in particular to areas above a height of 2.5 m.

2 Workflow

2.1 Measurements

At the first epoch, the measurements were carried out with both a Faro Focus 3D X 330 panorama laser-scanner and a Leica MS50 multistation. While the latter operates in the visible light spectrum, the former uses a carrier wavelength of 1550 nm and thus operates in a part of the near infrared at which, according to Warren (1982), the reflectance of snow is particularly poor. Nevertheless, it turned out that both instruments yielded complete point clouds without any indication of signal quality issues. We assume that this is due to the particularly

short distances and possibly also to the type and structure of the compacted artificial snow. Taking scanning speed, size and weight of the instrument into account we subsequently only used the Faro scanner for data acquisition.

The igloo was scanned in 5 epochs over 78 days with progressively longer intervals in between (9, 17, 30, and 21 days). This was a compromise between effort (the site is remote) and amount of information taking into account that the deformations were expected (and actually found) to slow down over time. The first epoch (day 1, 24/1/2016) corresponds to a time immediately after the internal scaffoldings used during construction had been removed. This occurred 2 days after the laying of the last block.

Two kinds of plastic targets with flat surface, approximately aligned with the surface of the surrounding snow, were installed for several reasons:

- It was expected that the snow surface would eventually turn into ice because of thaw-freeze-cycles related to heat brought into the igloo by visitors and that this would possibly affect the strength of the reflected signals and could impair the laser scanner measurements beyond usability.
- It was expected that the laser beams would significantly penetrate the snow surface and that the apparent penetration depth, causing distance biases of the measurements, would change over time as a result of changing snow properties including the formation of superficial ice.
- It was expected that there would not be any stable features within the igloo allowing registration of the 3D models acquired at different points in time.

20 flat, white discs (\varnothing 120 mm) made of Polyoxymethylene (POM-C) were fixed to the snow bricks using screws typically used to hold slalom poles for skiing, and 9 smaller Fischer FID-90 fixings (\varnothing 25 mm) were directly screwed into the snow bricks in order to enable detecting and investigating the above issues if they occur. Some of the targets were additionally equipped with a cross marker printed on transparent foil in order to serve as well-defined target points for total station measurements. The targets had been distributed approximately equally over the interior surface of the igloo before the scaffolding was removed. The POM-C targets have been primarily used for the registration and for the analyses of the reflective properties of the snow because of their size; while the inexpensive FID-90 fixings were used because of their easy installation. A representative of each type is shown in Fig. 3.

Since this survey has been conducted in an unusual environment, some particular precautions have been tak-

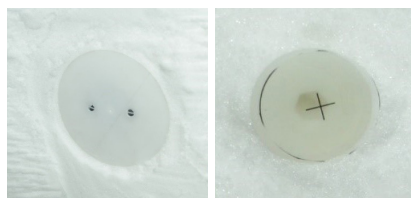


Fig. 3: POM-C target (left) and FID 90 target with printed cross marker (right)

en in order to account for the environmental conditions within and close to the igloo. So, the feet of the tripod were strongly pushed into the pressed snow on the ground and particular care was taken to avoid accidental bumps to assure firm stationing. Furthermore, the scanner was warmed up before the actual acquisition by carrying out two entire scans in a row of which the first one was discarded later on and the second one was actually used for data processing. This allowed reaching the minimum specified operation temperature of 5°C as measured by the internal thermometer.

The point clouds resulting from the scans were directly used for the subsequent analysis. No additional correction for atmospheric refraction (on top of the refractive index calculation based on temperature and pressure measured within the instrument) was applied since the distances between instrument and surfaces did not exceed 18 m such that the potential variation of the meteorological conditions along the line of sight and the deviations between outside values and values measured within the instrument are negligible for this application.

2.2 Decimation of the point clouds

On site the point clouds were acquired with an angular resolution of 19.5 mgon, corresponding to about 3 mm spacing at a distance of 10 m. Each of the scans comprised approximately 177 Mpts. While the resolution was chosen so high for data acquisition in order to ensure the identification of the center of the targets, it was not necessary to maintain this point density for the subsequent analysis. Points not belonging to the igloo were removed manually and the remaining point clouds were thinned such that the average spacing of the points was in the order of 12 mm. The point cloud was thus reduced to about 7 % of its original size.

2.3 Registration

Registration was required to (i) combine the scans obtained within and outside the igloo at the same epoch (i.e., within a few hours), and (ii) to transform the point clouds of several epochs into the same coordinate frame in order to enable deformation analysis. Feature-based registration, e.g. using the ICP algorithm (Besl and McKay 1992, Chen and Medioni 1991), was viable for only the first of these steps because of the absence or sparseness of suitable features stable in time. The registration within each epoch was carried out using Autodesk ReCap by manually selecting matching features. The ICP algorithm was then performed automatically.

The inter-epoch registration of the scans with respect to the first epoch has been carried out with two different methods, (a) using the lowest plastic targets as tie points, and (b) via GNSS-based direct georeferencing. Assuming that the

igloo would be stable close to the ground, the 4 lowest targets were selected for inter-epoch registration due to method (a). Following the placement of a car in the igloo after the 1st epoch (as part of the exhibit), the simultaneous visibility of all 4 targets from a single scanner location was not possible any more. Instead of increasing the number of scans within the igloo, the obstruction was accepted and only 3 targets were used for the registration of the following epochs. The registration was undertaken using Faro Scene. First, circle features were fitted into the points belonging to the POM-C targets, then, correspondences were set among the centers of the circles acquired in different epochs.

For the alternative method (b), three aluminum tripods were set up outside in the vicinity of the igloo and wooden spheres with 15 cm diameter were mounted on top (2 of them are visible in Fig. 1). The position of the spheres within the Swiss LV95-LHN95 coordinate frame has been measured using a Trimble R8 GNSS receiver and the virtual reference station service SWIPOS. The coordinates of the center of each sphere are then assumed to be known with standard deviations of about 1 cm for the horizontal components and 2 cm for the height. The coordinates of the centers were also identified within the respective point cloud using Faro Scene and its sphere fitting function, and the point cloud was transformed into approximate LV95 using these coordinates as identical points but keeping the scale of the TLS point clouds unmodified.

For each epoch, the part representing the interior surface of the igloo was extracted from the registered point clouds. Only those parts were subsequently analyzed.

2.4 Reference surface for deformation analysis

The remaining point cloud of the first epoch was further thinned down to 500 Kpts using Geomagic in order to generate a smooth triangulated irregular network (TIN) with no holes or spikes as reference surface. The deviations subsequently calculated and analyzed refer to this TIN.

3 Results

3.1 Geometry of the dome

Primary interest is in the deflection of the dome. This was analyzed by calculating and visualizing the vertical² distances of the points within the registered

² The reference scan was oriented in space using the data provided by the compass and the inclinometer embedded in the laser scanner.

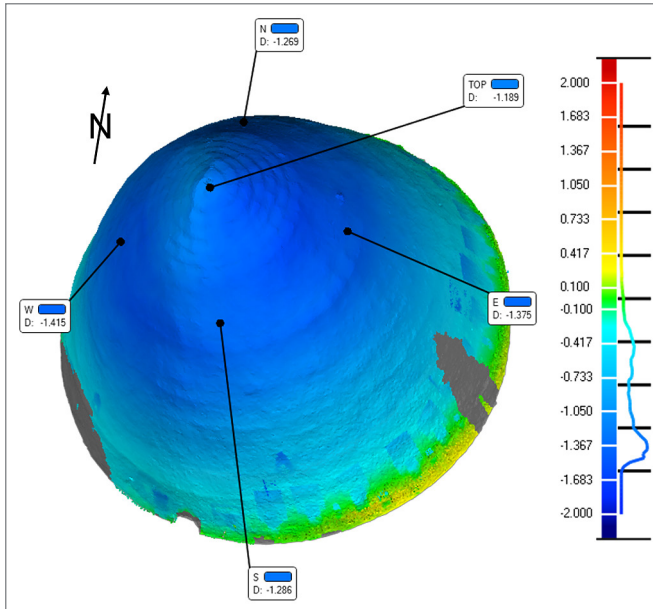


Fig. 4: 3D view of the reference mesh (epoch 1) colored according to the vertical displacements after 78 days (epoch 5) obtained with the target-based registration (displacement in meters, grey areas missing in scan of epoch 5 due to obstructions)

point clouds from the TIN used as reference surface. The result is shown in Fig. 4 for epoch 5 with the target based inter-epoch registration. This analysis indicates deflections in excess of 1.4 m over the corresponding interval (78 days). The spiral arrangement of the snow blocks is well recognizable in this plot, particularly close to the top, because of residual deviations of the registration and because the settlements are calculated from a point-to-surface comparison instead of the height difference of identical points (which cannot be extracted from the point clouds). The deflections coherently increase with height, which is an indicator that the results are plausible. In addition, they are mostly radially symmetric corresponding to the radially symmetric structure of the dome and suggesting that there are no strong radial differences in material parameters or loads.

Larger settlement of the south-facing side of the dome could have been expected because of exposure to the sun. However, such a pattern is not shown by the results, which suggests that the non-compacted snow added to the exterior actually protected the structural parts of the igloo as intended. The apparent lifting of the bottom of the dome, indicated by the yellow area in the figure, is very likely due to a superposition of residual (horizontal) registration deviations, surface melting and scraping, and possibly other effects. It has not yet been further analyzed.

A more comprehensive view of the changing geometry of the dome over time can be gained by analyzing the time evolution of cross sections. We have selected

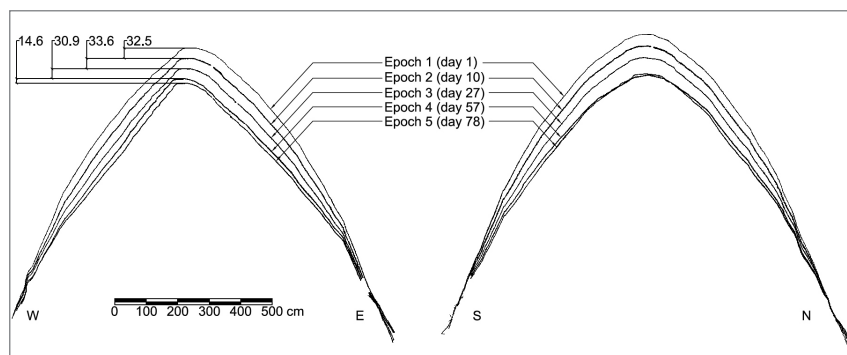


Fig. 5: East-West (left) and North-South (right) cross sections corresponding to the 5 epochs with target-based inter-epoch registration (difference of maximum height between subsequent epochs indicated in cm).

vertical cross sections within the east-west plane and the north-south plane herein. They are displayed in Fig. 5. These cross sections were obtained from the registered point clouds (target-based inter-epoch registration) using Geomagic to select the points closer than 5 cm from the section plane and using AutoCAD to overlap them. Neither filtering nor smoothing was carried out.

The cross sections indicate the progressive deflection of the top of the dome with respect to its base (note the non-equal intervals between the epochs) summing up to 1.12 m over 78 days. While the shape of the N-S cross section (Fig. 5 right) does not change strongly, the curvature of the E-W cross section (left) decreases visibly over time. The shape of the dome turns progressively into a more conical one around that cross section. The western part of the dome shows even a slightly inward curvature when scanned for the last time. This is certainly a structurally very important development that does not become clear from the height changes of the top alone. It might remain even hidden if marked points were monitored, e.g. using a total station, unless the number and spatial distribution of these points had been suitable to expose the deformation even at a location where it had not been anticipated. This brief analysis clearly shows a significant advantage of areal monitoring as opposed to point-based one in that it allows detecting deformations unaffected by any prior selection of discrete monitoring points.

The time series of the deflection of the top of the dome as obtained from the TLS measurements and from GNSS are presented in Fig. 6. The red curve shows the deflections discussed above and visible in Fig. 4 and Fig. 5; they are extracted from the TLS point clouds assuming that the base of the igloo, represented by 3 plastic targets screwed into the snow bricks, is stable. These results are therefore relative to the base of the igloo. The deflection of the top is much higher

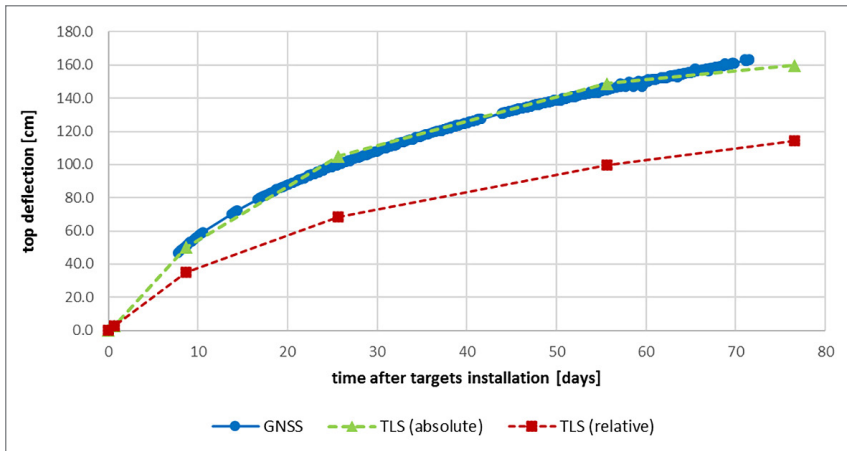


Fig. 6: Time series of the top deflection: GNSS (blue), TLS with relative target-based registration (green), TLS with absolute direct georeferencing

when extracted from the georeferenced scans (green). This shows that the base of the igloo subsides over time; the plot indicates that this subsidence is about 50 cm during the 78 days. This subsidence is due to compaction of the snow on which the igloo had been erected. The relative analysis carried out above is not sensitive with respect to this subsidence and properly reflects the deformation but not the displacement of the igloo.

The GNSS monitoring of the top of the igloo started 8 days after the first laser scanning. The coordinates of the GNSS antenna are available as daily values in a local level frame (resulting from static processing of 24 hour sessions). Only the height component is used herein. For comparison with the TLS results the GNSS height time series were shifted such as to correspond exactly to the georeferenced TLS result on the day on which the GNSS measurements were started. Fig. 6 shows that the estimated deflection of the top of the igloo evolves almost identically over time with the GNSS results and with the georeferenced TLS results. Slight differences are very likely due to (i) the fact that the antenna is mounted outside on the igloo while the TLS results refer to the interior surface, and (ii) to different systematic deviations affecting the GNSS results and the TLS measurements.

The results clearly show that the deformation of the igloo is overestimated – in the present case by about 50 % – if assuming that the vertical displacement of the GNSS antenna represents that deformation. Relative measurements within the igloo or between the top of the igloo and its base are required additionally to separate deformation and displacement.

3.2 Surface penetration of the laser beam

In order to assess whether there is a significant penetration of the snow surface and whether the relevant subsurface propagation of the laser beam changes over time, the point clouds representing the POM-C targets and their surroundings were analyzed. Fig. 7 shows the results for one of the targets and all epochs as a color-coded front view, while Fig. 8 shows vertical cross sections of the same target. For all these results the point cloud of the first epoch was decimated to an average spacing of 8 mm in order to be meshed with no holes or spikes and used as a reference. Planes were fitted to the points representing the flat surface of the

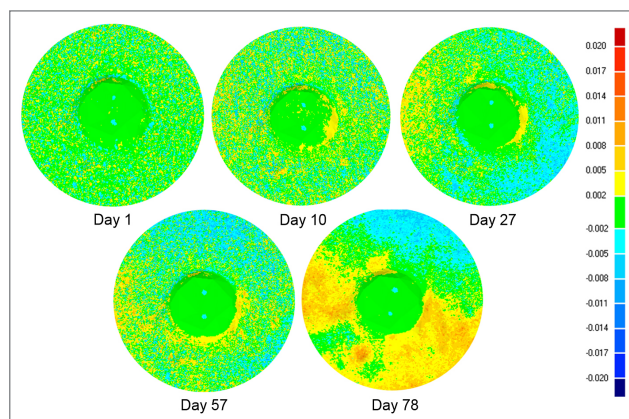


Fig. 7:
Color-coded
apparent relative
displacements (in
meters) between a
POM-C target and
the surrounding
snow surface

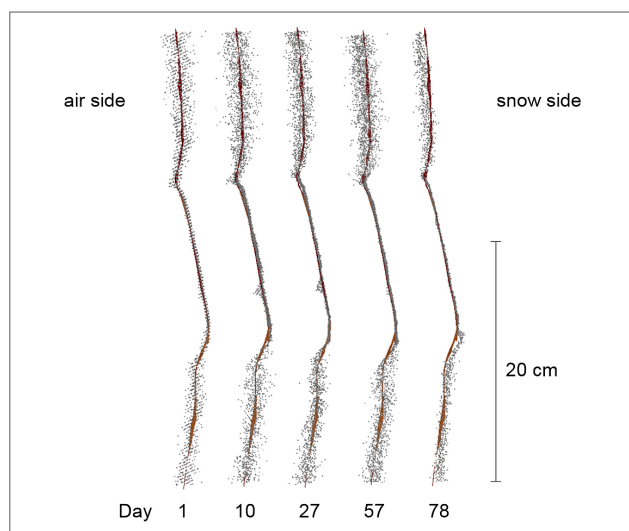


Fig. 8: Vertical
cross sections of
the point clouds
in proximity of a
POM-C target. The
reference profile
belongs to the ref-
erence mesh; shift
between epochs
inserted for better
readability

POM-C target, and the point clouds were then registered between epochs assuming that the plastic targets remained unchanged (i. e. planes and center identical). Point-to-mesh distances of the point clouds with respect to the reference mesh were then calculated perpendicular to the plane. The snow surface was compared to the first epoch instead of to the plane fitted onto the plastic target because the deviations between snow surface and target plane were large already in the beginning as compared to the potential changes over time (see Fig. 8).

The apparent distance changes with respect to the first epoch grow over time and reach about 1.5 cm at the last epoch. However, there is no clear indication that this is due to changing surface penetration of the laser beam. The relative rotation of the point cloud on the snow surface w. r. t. the surface of the POM-C target may also be an indication that the connection between target and snow was not rigid enough and the target tilted slightly over time. Concerning the noise level of the point clouds with respect to the reference mesh, it is homogeneous for all the epochs, ranging between 3 and 5 mm.

3.3 Reflectivity

Since the freezing of the snow surface was expected to affect its reflectivity, the intensity of the backscattered signal was also analyzed on the whole dome and with respect to a POM-C target whose reflectivity was assumed as a constant reference. The results are visible in Fig. 9.

The values cannot be interpreted quantitatively because there is no documentation by Faro of the physical meaning and units of the intensity values available in the raw data file with each scanned point. It is not even clear whether there is a linear relation between indicator and power or amplitude. Nevertheless, Fig. 9 shows that the backscattered intensity is quite uniform within each scan but it is

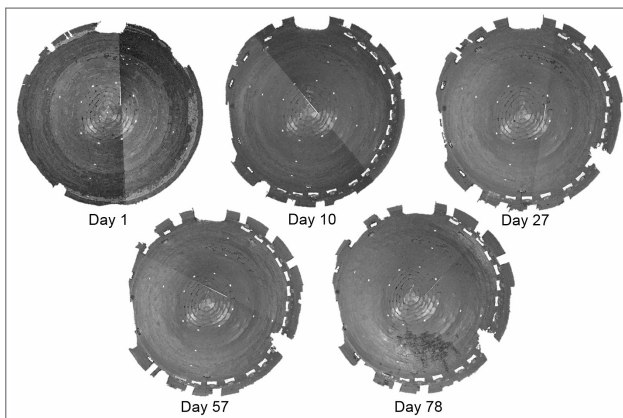


Fig. 9:
Intensity of the reflected signal (top view; bright points indicate strong intensity, dark points low one)

Tab. 1: Recorded temperatures inside the igloo during the measurements

Day	1	10	27	57	78
Temperature	−7 °C	−3 °C	−4 °C	−2 °C	−2 °C

remarkably smaller during the first two epochs than during the subsequent ones. The plastic targets are easily identifiable in all the scans because of their larger reflectivity. The abrupt change of intensity along the diameter coincides with the part of the point cloud where the scan starts/ends and suggests that there is a drift in intensity during the scan, probably due to progressive warming of the scanner during the scan which lasts approximately 15 minutes. This effect is mostly visible on day 1, which actually was the coldest one (see Tab. 1).

Since the target’s reflectivity is not constant over the 5 epochs, the difference of intensity of the signal reflected by snow and by the plastic has been analyzed over the five epochs (see Fig. 10) using histogram binning within the software package CloudCompare. There is virtually no increase of the intensity gap over time, indicating that the reflectivity of the snow did not decrease with time but rather the intensity values reported by the scanner change over time and are not directly comparable between scans, in particular with different environmental conditions.

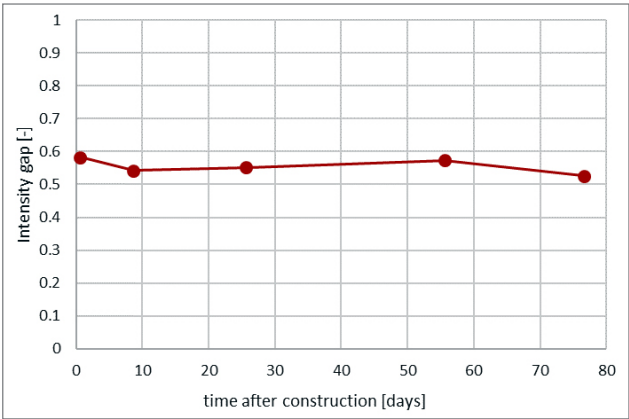


Fig. 10:
Difference of
intensity between
the snow and the
POM-C surfaces

4 Conclusions

We reported herein on experiences and results from a TLS-based monitoring of a large igloo. Despite the fact that the albedo of snow is low in the spectral range of the used scanner (Faro Focus 3D X 330) the snow surface could be measured

without difficulties. The results indicate that the noise level of the measurements, in particular of the range, was in the order of 2 to 3 mm and did not change over 78 days. The recorded signal intensities did change over time, however using spatially distributed reference surfaces we found that these changes were most likely due to variations within the scanner – probably related to changing environmental conditions and different scanner temperatures – but not to changing properties of the snow.

Inter-epoch registration was successfully achieved both using small planar targets attached to the internal surface of the igloo, and using wooden spheres set up independently for each epoch. The coordinates of the spheres were determined with RTK-GNSS at each epoch such that this second approach yielded a common datum for deformation analysis by georeferencing whereas the first approach yielded deformations relative to the base of the igloo. A comparison of the georeferenced TLS results with the time series of daily height values of a GNSS antenna mounted on top of the igloo excellent agreement with discrepancies below 5 cm most likely mainly due to residual deviations of the georeferencing and from the fact that the respective measurements could not be perfectly collocated.

Apart from indicating that conventional laser scanners may also be able to provide useful monitoring measurements on ice and snow, the results reported herein also underline an important advantage of dense areal measurements as opposed to pointwise techniques. While the derivation of deformations from point displacements requires assumptions or additional measurements, the laser scanning point clouds surface geometry and thus deformation directly. Using means for direct georeferencing in addition to mere point cloud registration, displacement can be extracted from the point clouds additionally. On the other hand, interpretation of surface changes may be difficult with 3D deformations since there is no point-to-point correspondence among the point clouds. In the present example this was not a problem since the major concern was deflection of the surfaces in the vertical direction, which can be easily calculated from the point clouds. Visual inspection of vertical cross sections yields additional information about surface curvature.

References

- Anttila, K.; Hakala, T.; Kaasalainen, S.; Kaartinen, H.; Nevalainen, O.; Krooks, A.; Kukko, A.; Jaakkola, A. (2016): Calibrating laser scanner data from snow surfaces: Correction of intensity effects. *Cold Reg Sci Technol* 121:52–59. doi: [10.1016/j.coldregions.2015.10.005](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.10.005).
- Besl, P.; McKay, N. (1992): A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 14:239–256.

- Bitelli, G.; Dubbini, M.; Zanutta, A. (2004): Terrestrial Laser Scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci* 35.B5: 246–251.
- Chen, Y.; Medioni, G. (1991): Object modeling by registration of multiple range images. *Proceedings. 1991 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* 2724–2729.
- Egli, L.; Jonas, T.; Grünwald, T.; Schirmer, M.; Burlando, P. (2012): Dynamics of snow ablation in a small Alpine catchment observed by repeated terrestrial laser scans. 26: 1574–1585. doi: [10.1002/hyp.8244](https://doi.org/10.1002/hyp.8244).
- Fischer, M.; Huss, M.; Kummert, M.; Hoelzle, M. (2016): Application and validation of long-range terrestrial laser scanning to monitor the mass balance of very small glaciers in the Swiss Alps. *Cryosph* 10:1279–1295. doi: [10.5194/tc-10-1279-2016](https://doi.org/10.5194/tc-10-1279-2016).
- Friedli, E.; Wieser, A. (2016): Identification of stable surfaces within point clouds for areal deformation monitoring. In: *Proc 3rd Joint Intl Symp Deformation Monitoring (JISDM)*, March 30 – April 1, Vienna, Austria, 7 p.
- Kenner, R.; Phillips, M.; Danioth, C.; Denier, C.; Thee, P.; Zraggen, A. (2011): Investigation of rock and ice loss in a recently deglaciated mountain rock wall using terrestrial laser scanning: Gemsstock, Swiss Alps. *Cold Reg Sci Technol* 67: 157–164. doi: [10.1016/j.coldregions.2011.04.006](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.04.006).
- Kukko, A.; Anttila, K.; Manninen, T.; Kaasalainen, S.; Kaartinen, H. (2013): Snow surface roughness from mobile laser scanning data. *Cold Reg Sci Technol* 96: 23–35. doi: [10.1016/j.coldregions.2013.09.001](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.09.001).
- Painter, TH.; Dozier, J. (2004): The effect of anisotropic reflectance on imaging spectroscopy of snow properties. *Remote Sens Environ* 89: 409–422. doi: [10.1016/j.rse.2003.09.007](https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.09.007).
- Prokop, A. (2008): Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements. *Cold Reg Sci Technol* 54: 155–163. doi: [10.1016/j.coldregions.2008.07.002](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.07.002).
- Prokop, A.; Schirmer, M.; Rub, M.; Lehning, M.; Stocker, M. (2008): A comparison of measurement methods: Terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing for the determination of the spatial snow-depth distribution on slopes. *Ann Glaciol* 49: 210–216. doi: [10.3189/172756408787814726](https://doi.org/10.3189/172756408787814726).
- Strunden, J.; Ehlers, TA.; Brehm, D.; Nettesheim, M. (2015): Spatial and temporal variations in rockfall determined from TLS measurements in a deglaciated valley, Switzerland. *J Geophys Res F Earth Surf* 120: 1251–1273. doi: [10.1002/2014JF003274](https://doi.org/10.1002/2014JF003274).
- Warren, S. (1982): Optical Properties of Snow. *Reviews Of Geophysics And Space Physics* 20: 67–89.
- Willi, D.; Theiler, PW. (2013): Terrestrisches Laserscanning im Eis: Aufnahme einer Gletschergrotte auf dem Kleinen Matterhorn. *Geomatik Schweiz* 111: 156–159.

Kontakt

Eugenio Serantoni | Andreas Wieser

ETH Zürich

Stefano-Franscini-Platz 5, 8093 Zürich, Schweiz

eugenio.serantoni@geod.baug.ethz.ch

Session 3 – Umgang mit großen Datenmengen und Praxisberichte

Effiziente Speicherung großer Punktwolken – Datenstrukturen für Algorithmen für mobile und terrestrische Laserscansysteme

Andreas Nüchter

1 Einleitung

Moderne 3D-Laserscanner tasten Umgebungen mit vielen Millionen 3D-Punkten ab. So kann beispielsweise der Velodyne HDL-64E rev. D über 2,2 Millionen, der Z+F IMAGER® 5010 bis zu 1.016 Millionen und der FARO Focus^{3D} bis zu 976.000 3D-Punkte in der Sekunde erfassen. Diese riesigen Datenmengen müssen gespeichert und verarbeitet werden. In vielen Anwendungen wird oftmals jeweils nur ein kleiner Teil der Punktwolke verwendet. Terrestrische Laserscansysteme tasten die Umgebung von einem oder mehreren Standpunkten ab. Mobile Laserscansysteme bewegen einen Profiler, d.h. ein 2D-LiDAR-System, sodass 3D-Daten durch die Systembewegung entstehen. Seit einiger Zeit existieren Mischformen, bei denen der Scanner während der Bewegung um die Stehachse gedreht wird. [Abb. 1](#) gibt Beispiele für dieses Messprinzip (Elseberg et al. 2014, Nüchter et al. 2015).

Die Datenstrukturen, die die Messpunkte verwalten und Zugriff darauf gewähren, müssen effizient sein. D.h. bezüglich des Speicherplatzes darf es gegenüber den reinen Rohdaten nur geringe Zuschläge geben, bezüglich der Laufzeit müssen die Datenstrukturen einen schnellen Zugriff auf die Rohdaten erlauben und bezüglich der Implementation sollten die Strukturen einfach sein. Die Speicherung der 3D-Punkte in einer Liste, d.h. in Form eines eindimensionalen Feldes erlaubt keinen effizienten Zugriff auf die Daten. Drei Datenstrukturen eignen sich zur Speicherung von Scandaten: 2D-Felder, beispielsweise Tiefen und Intensitätsbilder, *kD*-Bäume und Octrees (latein: *octo*, deutsch: *acht*, englisch: *tree*, deutsch: *Baum*). Dieser Beitrag stellt diese Datenstrukturen kurz vor und zeigt auf, wie und wozu diese effizient verwendet werden können.

2 Tiefen- und Intensitätsbilder

Ein terrestrischer Laserscanner tastet seine Umgebung mit Hilfe zweier Drehachsen kugelförmig ab ([Abb. 2](#)). Trägt man auf der y -Achse den Nickwinkel



Abb. 1: Links oben: Ein drehender FARO-Scanner für Produktionsanlagen. Rechts oben: MiM3D-X1-System von Measurement in Motion im Test unter Tage. Links unten: Rucksack-basiertes mobiles Scannen. Rechts unten: Geländefahrzeug FGI/Finnland

und auf der x -Achse den Gierwinkel ab, entsteht ein Panoramabild einer Equi-Rektangularprojektion. Hier lässt sich jeder 3D-Punkt als Tiefenwert speichern und das 2D-Feld wird zum Tiefenbild. Speichert man im 2D-Feld den gemessenen Intensitätswert, entsteht ein Intensitätsbild; speichert man im Feld direkt die x,y,z -Werte der Punkte, entfällt die Rechenoperation zwischen Kugel- und Kartesischen Koordinaten. Selbstverständlich kann das 2D-Feld, bzw. Bild beliebig breit und hoch sein. Sollten die Bildbreite und -höhe nicht zum Scanprozess passen, verwendet man den Pixelwert als Startpunkt einer verlinkten Liste auf die 3D-Punkte.

Abb. 3 zeigt exemplarisch die projizierte Kugel und Messdaten als Intensitätsbild. Ein Nachteil dieser Projektion ist, dass das Bild verzerrt ist. So erscheint beispielsweise der abgebildete Kran gekrümmt. Weitere mögliche Projektionen sind die Mercator-Projektion, Pannini-Projektion und die rectilineare Projek-

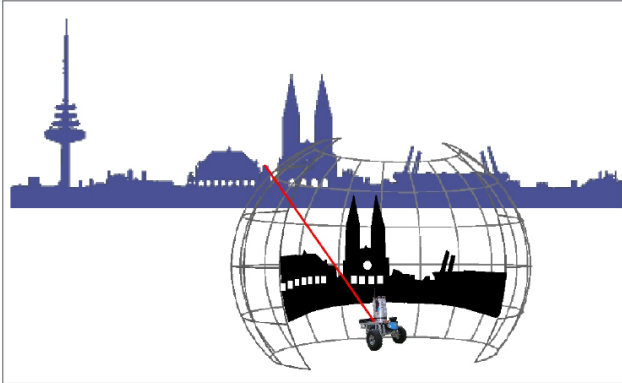


Abb. 2:
Ein terrestrischer
Laserscanner tastet
die Umgebung
kugelförmig ab.

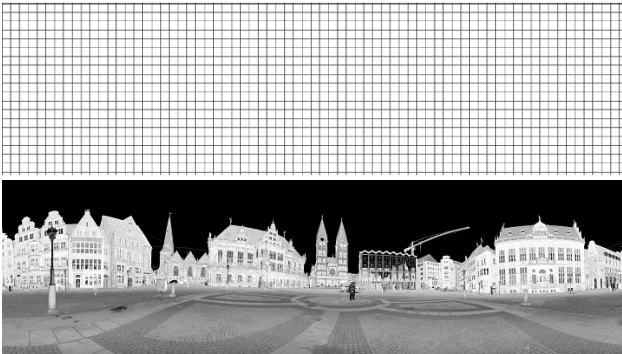


Abb. 3:
Oben: Darstellung
der Kugel aus
Abb. 2.
Unten: typische
terrestrische
Laserscandaten als
Panoramabild

tion (entspr. Lochkameramodell), die jeweils unterschiedliche Verzerrungen aufweisen und u. U. nur Teile des Panoramas dargestellt werden können.

Anwendungen der Datenstruktur Tiefen und Intensitätsbilder (Panoramabilder) sind vielfältig: Es lassen sich Panoramadarstellungen von verschiedenen Standpunkten automatisch verknüpfen (Houshiar et al. 2015), 3D-Daten lassen sich komprimieren (Houshiar und Nüchter 2015) und reduzieren (Houshiar et al. 2013).

2.1 Registrieren mit Bildmerkmalen

SIFT (scale-invariant feature transform) bezeichnet einen Algorithmus zur Detektion lokaler Merkmale, die größtenteils invariant gegenüber Rotation und Skalierung sind. In einer Pyramide von gaußverrauschten Versionen des Originalbildes werden Extrema-Pixel detektiert und besonders stabile als Schlüsselpunkte definiert. An allen Schlüsselpunkten werden lokale Intensitätsgradienten (Stärke, Orientierung) berechnet und relativ zu den Gradienten normierte

Deskriptoren der Schlüsselpunkt-Umgebungen erzeugt. Dies sind die SIFT-Merkmale. Gaußfaltung und Normierung realisieren eine gewisse Robustheit gegenüber Variationen der Umgebung, wie wechselnde Lichtverhältnisse. Die zur Codierung der SIFT-Schlüsselpunkte verwendeten Deskriptoren können sich auch, anstatt der erwähnten Schlüsselpunkte, als Container für andere Merkmalspunkte eignen und entsprechend verwendet werden.

Eine weitere Methode zur Berechnung von Merkmalen in Bildern, die sich eng an SIFT-Merkmalen orientiert, stellen SURF-Merkmale (engl. Speeded Up Robust Features) dar. Eines der Kennzeichen, die Geschwindigkeit in der Berechnung, wird erreicht, indem der Dog-Filter der SIFT-Merkmale wiederum approximiert wird. Die recht grobe Approximation geschieht durch einen Kasten-Filter (DOB, engl. Difference of Boxes). SURF-Deskriptoren werden analog SIFT-Deskriptoren berechnet.

SIFT- und SURF-Merkmale eignen sich als natürliche Landmarken zum Registrieren von 3D-Scans. Dabei werden die Merkmale auf den beschriebenen Projektionen extrahiert. Die assoziierten Deskriptoren erlauben eine automatisierte Merkmalszuordnung zwischen extrahierten Merkmalen mehrerer Bilder. Dazu wird jeweils das ähnlichste Merkmal gefunden, indem der nächste Deskriptor gesucht wird. Ein RANSAC (random sample consensus) Algorithmus filtert die Ergebnisse. Die Transformation wird analog des ICP-Algorithmus (iterative closest point) berechnet.

Abb. 4 zeigt exemplarisch zwei Scans der Bremer Innenstadt als Panoramabild und die automatisch berechneten Merkmalskorrespondenzen des SIFT-Algorithmus.

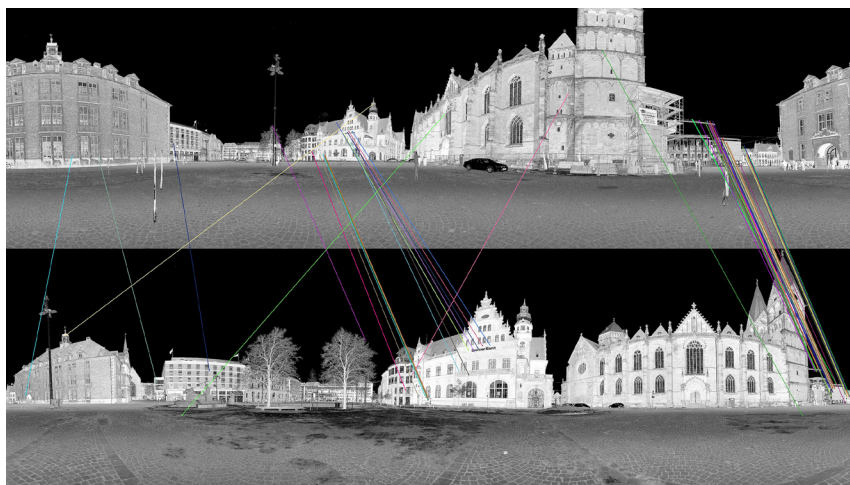


Abb. 4: Automatisch ermittelte Korrespondenzen in zwei Panoramabildern von 3D-Scans

2.2 Komprimieren von terrestrischen 3D-Scans

Speichert man die 3D-Daten als Tiefen- und Intensitätsbild, lassen sich Kompressionsverfahren, die für Bilder entwickelt wurden, für 3D-Scans einsetzen. So zum Beispiel die verlustfreien Formate *.png*, *.jpeg2000* und *.tiff*. Zu beachten ist hier, dass Laserdaten eine höhere Dynamik besitzen, die nicht in 255 Graustufen abgebildet werden können. Unter Verwendung der Farbkanäle gelingt die Kompression. Durch den Übergang zu verlustbehafteten Komprimierungsverfahren, beispielsweise *.jpeg* erreicht man noch höhere Kompressionsraten, handelt sich aber Artefakte ein, die sich unter Umständen als „3D-Wellen“ in der Punktwolke niederschlagen. Daher müssen die Ergebnisse nachbearbeitet werden, wobei Filter zur Anwendung kommen und 3D-Information verloren geht (Houshiar et al. 2015).

2.3 Datenreduktion

Durch ein Skalieren der 2D-Felder, entstehen kleine Punktwolken (Houshiar et al. 2013). Verwendet man die gleichmäßige Rektangularprojektion entspricht eine solche Skalierung dem Scannen mit einer geringeren Auflösung. Andere Projektionen führen unter Umständen zu Artefakten (Abb. 9).

3 *k*D-Bäume

Binärbäume sind eines der wichtigsten Konzepte in der Informatik. Die Speicherung von Daten erfolgt in den Blättern von binären Bäumen, wobei die Schlüssel so gewählt werden, dass jeweils eine Halbierung des Datenraums auftritt. Dies erlaubt einen Zugriff auf die Daten in *log*-Zeit. Mehrdimensionale Binärbäume (*k*D-Bäume, hier $k = 3$) verallgemeinern dieses Konzept der Halbierung des Datenraumes auf höhere Dimensionen. Die Idee dabei ist, Datenpunkte in einem Binärbaum so zu speichern, dass es während der Suche im Baum möglich ist, ganze Unterbäume abzuschneiden, die den Anfragepunkt nicht enthalten können. *k*D-Bäume werden zur Suche des nächsten Punktes zu einem Anfragepunkte, zum Beispiel innerhalb des ICP-Algorithmus, zur Bestimmung der *k* nächsten Punkte zu einem Anfragepunkte und zur Bestimmung von Punkten innerhalb eines Radius vom Anfragepunkt eingesetzt.

*k*D-Bäume sind eine Generalisierung eines einfachen binären Suchbaums. Jeder Knoten eines *k*D-Baums repräsentiert eine Aufteilung einer Punktmenge auf zwei Nachfolgerknoten. Demnach gibt die Wurzel die gesamte Punktmenge an. Die Blätter repräsentieren eine Partition der Punktmenge in kleine, disjunkte Punktmenen. Die Mengen an den Blättern werden Buckets genannt. Des Wei-

teren enthält jeder Knoten des k D-Baums die Grenzen der gespeicherten Punktmenge.

Aufbau eines k D-Baums

In k Dimensionen enthalten die Einträge k Schlüssel. Jeder dieser Schlüssel kann in einem inneren Baumknoten dazu dienen, die Datenmenge zu teilen. Diese so genannten Teiler werden im originalen k D-Baum, wie von Bentley (1975) vorgeschlagen, anhand der Tiefe der inneren Knoten gewählt: Die Teilerdimension D für jede Tiefe erhält man durch zyklische Auswahl aus den Dimensionen: $D = L \bmod k + 1$, mit der aktuellen Tiefe des Baums L . Für die Wurzel gilt: $L = 0$. Anschließend bestimmt Bentley den Teiler zufällig aus der Punktmenge. Die Teilerdimension und der Teiler definieren eine Hyperebene im k -dimensionalen Raum. Die Daten werden nun gemäß ihrer Lage zu dieser Ebene auf die beiden Söhne des Knotens aufgeteilt und es entsteht die Partitionierung. Der k D-Baum wird solange aufgebaut, bis die Punktmenge in einem Knoten ein bestimmtes Limit b unterschreitet. Die Blätter des Baums enthalten die Punkte.

Für 3D-Datenwerte ist $k = 3$. Der 3D-Baum enthält Separierungsebenen, die parallel zu der $(x,y,0)$ -, $(0,y,z)$ - oder $(x,0,z)$ -Ebene verlaufen. Datenpunkte links neben der Ebene werden im linken Teilbaum gespeichert, während Punkte rechts neben der Ebene im zweiten Teilbaum abgelegt werden.

Suche in einem k D-Baum. Der Suchalgorithmus für k D-Bäume ist eine rekursive Prozedur. Das Argument der Prozedur ist der aktuelle zu analysierende Knoten, also wird die Wurzel als Startwert übergeben. Die Suche nach dem nächsten Punkt für einen gegebenen Punkt p_q besteht aus dem Vergleich von p_q mit der Teilerdimension und dem Teiler, d. h. im Fall $k = 3$ mit der entsprechenden Separierungsebene. Dadurch bestimmt der Suchalgorithmus, in welchem Nachfolgerknoten weitergesucht werden muss und setzt die Suche dort fort. Dies wird solange wiederholt, bis ein Blatt, das den nächsten Datenpunkt p_q enthält, erreicht ist. In den Blättern muss der Algorithmus alle Punkte betrachten. Es ist allerdings möglich, dass der nächste Punkt in einem anderen Blatt liegt. Dieser Fall ist zu untersuchen, falls der Abstand zwischen p_q und der Grenze der Region des Blattes kleiner ist als der Abstand $\|p_q - p_b\|$. Es tritt Backtracking auf, bis alle Blätter analysiert wurden, die im Radius $\|p_q - p_b\|$ liegen. Diese Bedingung ist als Ball-WithinBounds bekannt (Bentley 1975).

3.1 Der optimierte k D-Baum

Das Ziel der Optimierung ist, die erwartete Anzahl von Blättern, die untersucht werden muss, zu minimieren. Die veränderbaren Parameter der inneren Knoten sind die Teilerdimension und der Teiler sowie die Anzahl der Daten in den Blättern b .

Die Lösung einer Optimierung hängt in der Regel von der Verteilung der Punkte im kD -Baum und der Anfragepunkte ab. Für gewöhnlich hat man keine Information über die Anfrage und sucht daher nach einem Verfahren, das ausschließlich die Verteilung der gegebenen Punkte berücksichtigt. Für alle möglichen Anfragen funktioniert ein solches Verfahren gut; es wird aber nicht optimal für eine spezielle Anfrage sein. Weiterhin kann man die Teilerdimension und den Teiler nur mit Hilfe des Punktmengenteiles bestimmen, der dem aktuellen Knoten zugeordnet ist. Dies ermöglicht erst den rekursiven Aufbau des kD -Baums und vermeidet eine allgemeine Optimierung des Binärbaums. Eine solche allgemeine Optimierung ist als NP-vollständig bekannt.

Unter diesen beiden Restriktionen können die Teilerdimension und der Teiler an jedem inneren Knoten bestimmt werden. Die Information für den Suchalgorithmus besteht in der Identifizierung der Punkte, die den beiden Nachfolgerknoten zugeordnet sind. Sie ist in einem binären Suchbaum maximal, falls beide Alternativen gleich wahrscheinlich sind. Daher sollte jeder Eintrag die gleiche Wahrscheinlichkeit besitzen, auf einer Seite der Partition zu sein. Dieses Kriterium impliziert, dass die Partition am Median der Punktmenge verlaufen sollte. Der Suchalgorithmus kann Teilbäume ausschließen, wenn der Ball-Within-Bounds-Test fehlschlägt, d.h. wenn die Distanz zur Partitionierungsebene größer ist als der Radius zum nächsten Punkt. Die Wahrscheinlichkeit einer Aufteilung, bei der Teilbäume ausgeschlossen werden können, ist maximal, wenn die Punktmenge parallel zu einem Schlüssel geteilt wird, der den größten Wertebereich aufweist. Abb. 5 zeigt eine Punktmenge und zwei mögliche Partitionierungen: Im Fall der Aufteilung nach (b) tritt seltener Backtracking auf, da der durchschnittliche Punkt-Trennlinie-Abstand größer ist als bei einer Teilung nach (a).

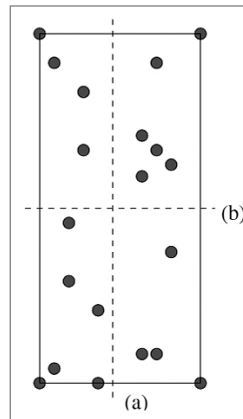


Abb. 5:
Partitionierung einer Punktmenge. Die Anwendung des Teilers (b) resultiert in einer kompakteren Aufteilung.

3.2 Approximative Bestimmung der nächsten Punkte

Greenspan und Yurick haben 2003 den approximierten kD -Baum (Apx- kD -Baum) für den ICP-Algorithmus benutzt (Greenspan und Yurick 2003). Der Aufbau des Apx- kD -Baums erfolgt genau wie jener des optimierten kD -Baums. Die Idee der Approximation ist, bei der Suche den nächsten Punkt p_a durch den

nächsten Punkt im Blatt p_b anzunähern, wo sich der Anfragepunkt p befindet. Da p_b nur durch Tiefensuche bestimmt wird, entfallen der Ball-Within-Bounds-Test und das Backtracking. Greenspan und Yurick (2003) haben gezeigt, dass der ICP-Algorithmus ein lokales Minimum erreicht, das sehr nahe von jenem liegt, das mit Backtracking erzielt wird.

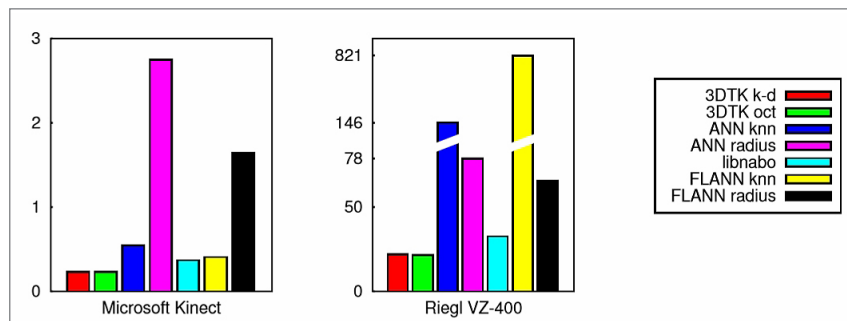


Abb. 6: Laufzeitvergleiche für den ICP-Algorithmus mit verschiedenen kD-Bäumen für die nächste Nachbar Suche

Die Untersuchung verschiedener Implementationen von kD-Bäumen bringt erstaunliche Ergebnisse (Elseberg et al. 2012). Abb. 6 zeigt die Laufzeit für das Registrieren zweier 3D-Punktwolken mittels ICP-Algorithmus, der massiven Gebrauch von der Suche nach nächsten Nachbarn macht. Während für kleine Punktmengen, wie sie beispielsweise mit einer Microsoft Kinect Kamera aufgenommen werden können, oftmals noch akzeptable Werte ermittelt werden, sind für große Punktmengen wie im terrestrischen Laserscanning, deutliche Unterschiede zu erkennen. 3DTK¹ (3DTK – The 3D Toolkit) bezieht sich auf unsere Implementation, ANN auf David Mount's *approximate nearest neighbor library*², libnabo³ auf eine Implementation der ETH Zürich und FLANN⁴ auf die Implementierung, die sich in der Point Cloud Library (PCL)⁵ befindet.

Neben dem ICP-Algorithmus, benötigen die Berechnung von Normalenvektoren und Algorithmen zur Kollisionserkennung intensiv die Berechnungen mit einem kD-Baum.

1 <http://threedtk.de>

2 www.cs.umd.edu/~mount/ANN

3 <https://github.com/ethz-asl/libnabo>

4 www.cs.ubc.ca/research/flann

5 www.pointclouds.org

4 Octrees

Ein Octree ist eine Datenstruktur für die Indizierung dreidimensionaler Daten und erweitert somit das Konzept der Binärbäume und Quadrees, die eindimensionale bzw. zweidimensionale Daten strukturieren. Jeder Knoten eines Octrees repräsentiert ein Volumen als Quader, wobei häufig die Vereinfachung gemacht wird, dass Octree-Knoten Würfel repräsentieren. Des Weiteren sind die Würfel oftmals an den Achsen des Koordinatensystems ausgerichtet. Jeder Octree-Knoten besitzt bis zu acht Kinderknoten. Ist ein Knoten ohne Kinder, bedeutet dies, dass der zugehörige Würfel uniform repräsentiert werden kann und keine weitere Unterteilung notwendig ist.

Bei der Repräsentation von volumetrischen Daten ist die weitere Unterteilung eines Knoten auch dann unnötig, wenn das abgebildete Volumen vollständig uniform besetzt ist. Da Punkte keine Ausdehnung haben, lässt sich dieses Uniformitätskriterium nicht für das Speichern von Punkten verwenden. Daher erfordert diese Anwendung ein alternatives Abbruchkriterium, wie beispielsweise die Definition einer maximalen Tiefe. Äquivalent lässt sich eine minimale Würfelgröße definieren. Würfel mit minimaler Würfelgröße enthalten eine Liste von 3D-Punkten. Abb. 7 stellt ein typisches Octree-Schema vor. Wir verwenden nicht die lehrbuchartige Octree-Repräsentation,

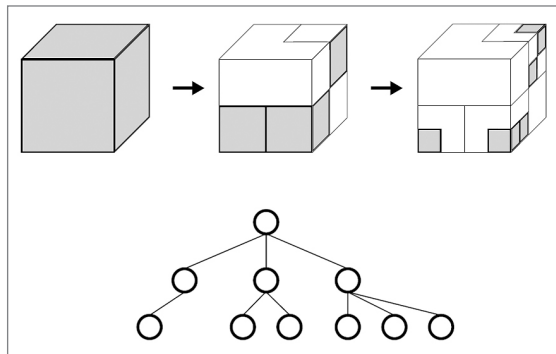


Abb. 7: Ein Octree mit Tiefe 3. Grau unterlegte Würfel müssen weiter unterteilt und mit Nachfolgerknoten repräsentiert werden. Links: Volumen. Rechts: Baumstruktur

bei der alle inneren Knoten mit gleicher Tiefe exakt 8 Kinderknoten haben, sondern weichen in zwei Merkmalen davon ab: Erstens werden leere Knoten, d. h. Würfel, die keine 3D-Punkte enthalten, sofort abgeschnitten. Fehlende Knoten repräsentieren also Freiraum. Zweitens werden Würfel, die nur einen 3D-Datenpunkt enthalten, nicht weiter unterteilt, sondern direkt zu Blättern gemacht. Da 3D-Laserscans nur Oberflächen und keine Volumina erfassen, ist zu erwarten, dass sehr viele Knoten im Octree nur sehr wenige Kinderknoten besitzen. Der Octree ist dünn besetzt.

Bei vielen Implementationen von Octrees steht nicht die Optimierung des Speicherverbrauchs im Vordergrund. Unsere Implementation zielt darauf ab,

einen Octree effizient darzustellen und dennoch sehr schnell auf die gespeicherten Daten zugreifen zu können. Daher scheidet eine serialisierte Darstellung, die frei von Zeigern ist, aus, weil diese nur den Zugriff auf die Datenpunkte in linearer Zeit erlaubt. Der Zugriff auf die Daten soll in logarithmischer Zeit geschehen.

Der größte Teil der Information in einem inneren Knoten lässt sich während des Durchlaufens des Baums berechnen. Offensichtlich ist die Tiefe eines Knotens gleich der Tiefe des Vaterknotens plus eins. Durch die Eigenschaft, dass ein Octree den Würfel regelmäßig unterteilt, ergibt sich, dass die Größe eines Würfels eine Funktion seiner Tiefe ist. Auch die Position eines Knotens lässt sich auf Grundlage der Position des Vaterknotens berechnen. Daher muss nur die Wurzel des Baumes Informationen wie Position und Größe des umspannenden Volumens enthalten. Zeiger zu Vaterknoten lassen sich berechnen, indem man sie auf einem Stapel zwischenspeichert. Es ist sogar möglich, Zeiger benachbarter Knoten durch ein Indexschema zu berechnen. Leider benötigt diese Operation Backtracking über die Vaterknoten und ist daher weniger effizient.

Um speichereffizient Knoten zu repräsentieren, lassen wir sämtliche Informationen aus Knoten weg, die online berechnet werden können. Des Weiteren vermeiden wir das Verwenden von Zeigern, die auf modernen Systemen typischerweise 8 Byte groß sind, indem man die Information, ob ein Knoten vorhanden ist oder nicht, in seinen Vaterknoten verschiebt. Durch ein Byte, bei dem jedes Bit einen Nachfolgerknoten repräsentiert, lässt sich dies erreichen. Wir speichern nur einen Zeiger zu allen Nachfolgerknoten und diesen als relativen 6-Byte-Zeiger. Zusätzlich verwenden wir ein Byte, wobei jedes Bit anzeigt, ob der Nachfolgerknoten ein innerer Knoten oder ein Blatt ist. Dadurch wird die Information über die Punkte überflüssig. Abb. 8 stellt diese Knoten-Struktur vor.

In den Blättern werden ausschließlich 3D-Punkte gespeichert und somit benötigen sie eine andere Repräsentation. In Abb. 8 ist ein Knoten mit drei Nachfolgerknoten dargestellt, wobei einer dieser Knoten ein Blatt mit einem Punkt ist. Blätter enthalten Zeiger zu Listen mit Punkten. Der erste Eintrag ist die An-

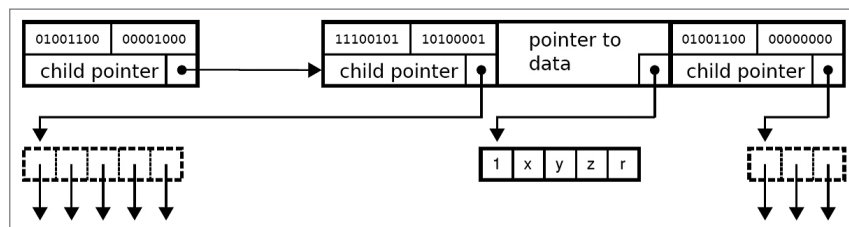


Abb. 8: Beispiel eines Octrees mit der vorgeschlagenen Kodierung. Der Knoten links besitzt 3 Kinderknoten, von denen einer ein Blatt ist. Der Zeiger auf die Nachfolger repräsentiert daher drei hintereinander gespeicherte Knoten. Der Blattknoten ist ein einfacher Zeiger auf ein Feld mit der Anzahl der Punkte und den Werten.

zahl der Punkte, gefolgt von einer Liste der Koordinaten und den Attributen. In dieser Darstellung würden Blattknoten n -Bytes größer sein, wobei n die Anzahl der Bytes ist, die für die Zahl der Punkte benötigt wird. In unserem Fall ist es ausreichend, 4 Bytes dafür zu reservieren. Eine derartige Listenrepräsentation ist bereits speichereffizienter als die übliche Darstellung in Form eines eindimensionalen Feldes (*float***), da ein Zeiger pro Punkt eingespart wird.

Der Speicherbedarf unseres Octrees ist nun so gering, dass die 3D-Punkte mit ihren Attributen den größten Platz einnehmen. Daher muss die Punktliste selbst komprimiert werden. Dabei verwenden wir 2 Bytes für jede Koordinate. 2 Bytes sind bestens geeignet, da dies der Auflösung der zusätzlichen Punktattribute wie Reflektivität der meisten terrestrischen Laserscanner entspricht. Die Auflösung der 3D-Daten darf sich jedoch durch das Verwenden von 2-Byte-Koordinaten nur unmerklich ändern. Dies geschieht folgendermaßen: Jede der 2-Byte-Koordinaten wird als $s/(2^{16})$ Inkrement von der unteren, vorderen, linken Ecke eines Blattknotens angenommen, wobei s die Seitenlänge des Octree-Würfels ist. Dadurch speichert jede Stufe des Octrees ein signifikantes Bit jeder Koordinate. Ein 4-Byte-float hat eine Auflösung von zirka 100 μm bei einer maximalen Distanz von 500 m und 1 μm bei 1,5 m Distanz. Um ebenfalls eine Genauigkeit von 1 μm zu erzielen, muss der Octree-Würfel kleiner als 6,5 cm sein. In unserer Implementation haben wir die Seitenlänge des Würfels auf 65 cm gesetzt und erzielen so Genauigkeiten von 10 μm , das ca. zwei Größenordnungen besser ist als typische Messgenauigkeiten.

4.1 Nächste Nachbarn Suche

Wie oben beschrieben, wird der $k\text{D}$ -Baum mit $k = 3$ am häufigsten zur nächsten Nachbar Suche (NNS) verwendet, da er eine effiziente Implementierung der NNS erlaubt, jedoch erlaubt auch der Octree diese Operation sehr effizient. Im Gegensatz zum $k\text{D}$ -Baum unterteilt der Octree den Raum gleichmäßig und ist daher prinzipiell noch besser als der $k\text{D}$ -Baum zur nächsten Nachbar Suche geeignet. Die Schwierigkeit besteht jedoch darin, die NNS auf einem Octree zu implementieren. Der Baum muss effizient durchlaufen werden, um das Blatt zu finden, das den nächsten Punkt enthält. Dabei spielt die Reihenfolge, in der die Kindknoten durchlaufen werden, eine große Rolle. Die Anzahl der Knoten, die betrachtet werden müssen, wird am besten durch die Anwendung der „Bester-Knoten-zuerst“-Strategie (engl.: *best bin first*) reduziert. Das bedeutet, die Reihenfolge wird abhängig von der Distanz zum Anfragepunkt gewählt. Dies lässt sich bei einem $k\text{D}$ -Baum einfach realisieren, benötigt jedoch etwas Aufwand in einem Octree, der bis zu 8 Nachfolgerknoten haben kann.

Für jeden Octreeknoten mit 8 Nachfolgern gibt es 48 mögliche Sequenzen, in denen Nachfolgerknoten durchlaufen werden können. Jeder Nachfolgerknoten

repräsentiert einen $1/8$ -Würfel des Koordinatenraums und der Anfragepunkt kann in jeden dieser 8 Würfel fallen. Zur Suche nach dem nächsten Nachbarpunkt müssen aber auch die anderen Würfel betrachtet werden. Abhängig von der Lage des Anfragepunktes zu den drei Splitebenen des Würfels lassen sich 6 Durchlaufmöglichkeiten bestimmen. Daher muss die NNS auf einem Octree Abstände des Anfragepunktes zu allen drei Ebenen berechnen, diese sortieren und die nächste Ebene auswählen. Das Auswahlkriterium ist, das nächste Blatt auszuwählen. In einem kD -Baum ist hingegen nur eine einzige Abfrage notwendig, und es werden daher keine unnötigen Operationen ausgeführt für Knoten, die nicht besucht werden.

Durch die gleichmäßigen Unterteilungen in einem Octree ist die NNS schneller erfolgreich als für einen kD -Baum. Dies könnte den beschriebenen Mehraufwand ausgleichen. Abb. 6 zeigt die Ergebnisse der NNS im Vergleich zum kD -Baum. Es wird in etwa die gleiche Größenordnung erreicht.

4.2 Datenreduktion

Der Octree eignet sich perfekt zum Reduzieren von Scandaten. Hierzu wird ein Octree bis zu einer vorgegebenen Blattgröße aufgebaut, typischerweise 10 cm. Anschließend werden zufällig einer oder mehrere 3D-Punkte aus jedem Octree-Würfel (Bucket) selektiert. Alle selektierten 3D-Punkte bilden die reduzierte Punktwolke. Da die Anzahl der Buckets von der Szenengeometrie abhängt, lässt sich bei diesem Verfahren die Größe der resultierenden Punktwolke nicht vorhersagen. Im Unterschied zur Reduktion mit Panoramabildern ist die Reduktion jedoch gleichmäßig. Oberflächen, die wie weit entfernt vom Laserscanner sind und daher mit weniger Messungen abgetastet wurden, erhalten die gleiche Anzahl von Punkte, wie Oberflächen nahe des Scanners. Lediglich die Größe der Fläche beeinflusst die resultierende Anzahl von 3D-Punkten. Abb. 9 zeigt exemplarisch eine Punktwolke und beide Reduktionsmethoden.

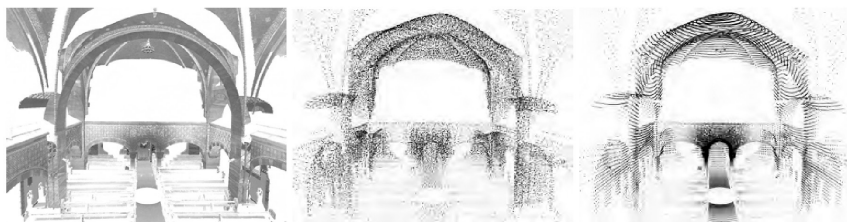


Abb. 9: Punktwolkenreduktion am Beispiel des Datensatzes St. Michael-Kirche Bremen-Grohn. Links: Originalpunktwolke. Mitte: gleichmäßige Reduktion mit Octree. Rechts: Reduktion mit Panoramabild

4.3 RANSAC zum effizienten Schätzen von Parametern

Der RANSAC-Algorithmus ist ein Ansatz zum Bestimmen von Parametern eines Modells mittels Stichproben. Dieser Algorithmus wird häufig zur Detektion von Linien und Ebenen eingesetzt, jedoch lässt er sich auf jedes parametrisierbare Modell anwenden. RANSAC ist ein iterativer Algorithmus, der wiederholt eine kleine Anzahl von Stichproben aus dem Datensatz, in dem das Modell vermutet wird, auswählt. Basierend auf dieser Auswahl werden die Modellparameter geschätzt, und anschließend wird im gesamten Datensatz überprüft, wie viele Daten mit der Schätzung übereinstimmen. Dieser Prozess wird wiederholt und das Modell mit den meisten Übereinstimmungen ist das Ergebnis.

Der aufwändigste Schritt des Algorithmus ist die Bestimmung der Punkte, die mit dem Kandidatenmodell übereinstimmen. In einer unorganisierten 3D-Punktwolke muss man dazu über alle Punkte iterieren. Wir setzen dazu jedoch unseren Octree ein und erhalten eine signifikante Beschleunigung. Wir überlagern das Kandidatenmodell rekursiv mit dem Octree und bestimmen dabei die Knoten, die Modellpunkte enthalten könnten. Dieser Prozess wird exemplarisch für die Liniendetektion im 2D-Fall in Abb. 10 dargestellt. Nachdem die Kandidatenlinie generiert worden ist, wird sie dem Octree überlagert. Alle Knoten, die von der Linie berührt werden, werden rekursiv nach jeder Unterteilung bestimmt. Dadurch wird eine große Anzahl von Punkten ausgeschlossen, die nicht gegen das Modell überprüft werden müssen.

Des Weiteren lassen sich Octrees für die Verbesserung des RANSAC einsetzen. Durch sorgfältiges Auswählen der Stichprobenpunkte in enger Nachbarschaft, kann die Anzahl der notwendigen Iterationen des RANSAC-Algorithmus zum zuverlässigen Detektieren eines Modells um etliche Größenordnungen reduziert werden. Dies gelingt durch die Auswahl eines Stichprobenpunktes in

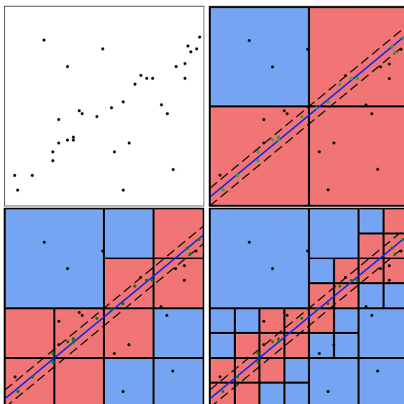


Abb. 10:

Geschwindigkeitsgewinn von RANSAC unter Verwendung eines Octrees. Oben links: Initiale Stichprobenmenge, in der eine Linie detektiert werden soll. Oben rechts: Eine Linie wurde durch eine Teilmenge geschätzt. Die gestrichelte Linie gibt den maximalen Distanzschwellwert an. Unten: Mit Hilfe des Überschneidungstests werden alle mit dem Modell überlappenden Blätter ermittelt.

einem geeigneten Blatt l . Anschließend werden weitere Stichproben nur von zufällig ausgewählten Vorgängerknoten von l ermittelt. Insgesamt werden durch den Einsatz eines Octrees Geschwindigkeitsvorteile bis zu einem Faktor von 30 erreicht (Elseberg et al. 2013).

4.4 Adaptive Visualisierung mit Frustum Culling

Frustum Culling ist eine Optimierungsmethode, bei der alle 3D-Punkte vom Zeichnen ausgeschlossen werden, die außerhalb des Sichtbereichs liegen. Es sorgt dafür, dass akzeptable Bildwiederholraten auch bei großen Szenen möglich sind, denn durch Frustum Culling werden viele der Punkte der Szene nicht gezeichnet, die man ohnehin nicht sehen kann. Ein Octree als Hierarchie von Geometriebegrenzungen von Volumina kann dazu verwendet werden, effizient 3D-Punkte anzuzeigen.

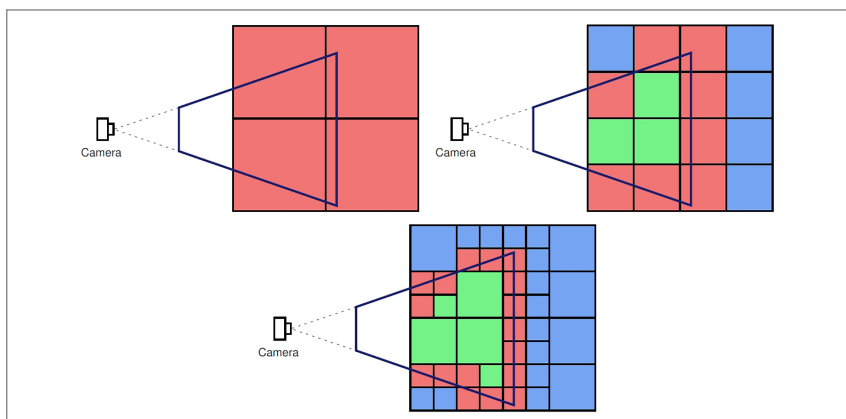


Abb. 11: Das Prinzip des Frustum Cullings mit einem Octree. Knoten in rot schneiden das Frustum partiell, so dass hier weitere Berechnungen erforderlich sind. Von grünen Knoten ist bekannt, dass sie innerhalb des Frustums liegen, so dass sie gänzlich dargestellt werden. Knoten außerhalb des Frustums sind in blau eingezeichnet und können folglich ignoriert werden.

Unser Verfahren bestimmt zunächst, welche Ebenen des Frustums (Kegelsumpf) relevant für die Nachfolgerknoten im Octree sind. Gleichzeitig wird überprüft, ob der aktuelle Würfel sichtbar ist und entsprechend terminiert. Im zweiten Schritt werden entweder die Punkte im Volumen angezeigt oder es wird Rekursion ausgeführt. Unnötiges Überprüfen lässt sich somit vermeiden. [Abb. 11](#) verdeutlicht dieses Prinzip.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Effiziente Datenstrukturen sind notwendig, um Daten von terrestrischen und mobilen Laserscannern verarbeiten zu können. Anwendungen wie mobiles Scannen in Produktionsstraßen (Elseberg et al. 2014) oder von einem Rucksack aus (Nüchter et al. 2015), basieren auf ausgefeilten SLAM-Lösungen, die den ICP-Algorithmus zu einem global konsistenten Scanmatching erweitern. Implementieren lassen sich die SLAM-Algorithmen nur, wenn die Datenstrukturen bereitstehen, die effizient die Punktwolke speichern, reduzieren und auf die Daten zuzugreifen. Das Bestimmen der nächsten Nachbarn ist essentiell für Scanmatching basierte SLAM-Verfahren.

Nicht nur der Algorithmus spielt eine entscheidende Rolle, sondern auch die Implementation. Durch geschickte Implementierungen lassen sich Laufzeiten und Speicherplätze optimieren. Des Weiteren müssen die Programme für die zum Einsatz kommenden CPUs übersetzt sein; interpretative Lösungen bieten nicht die nötige Performanz.

In zukünftigen Arbeiten werden wir u. a. die automatische Konvertierung von Laserscandaten zu BIM-Daten (building information model) untersuchen und die dazu benötigten Datenstrukturen. Für Gittermodelle (meshes) gibt es ebenfalls eine Reihe von interessanten Datenstrukturen.

Danksagung

Dieser Beitrag fasst Arbeiten zusammen, die in den letzten Jahren unter Mithilfe von Studenten und Doktoranden entstanden sind. Herzlich gedankt wird Dorit Borrmann, Dr. Jan Elseberg, und HamidReza Houshiar für die Implementation der Algorithmen in „3DTK – The 3D Toolkit“, einem OpenSource-Projekt der Informatik VII – Robotik und Telematik der Universität Würzburg.

Literatur

- Bentley, J.L. (1975): Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Communications of the ACM*, 18(9): S. 509–517, September 1975.
- Elseberg, J.; Borrmann, D.; Nüchter, A. (2013): One Billion Points in the Cloud – An Octree for Efficient Processing of 3D Laser Scans. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing (JPRS)*, Special issue on terrestrial 3D modelling, Elsevier Science, Volume 76, S. 76–88, Februar 2013.
- Elseberg, J.; Borrmann, D.; Schauer, J.; Nüchter, A.; Koriath, D.; Rautenberg, U. (2014): A sensor skid for precise 3D modeling of production lines. In: *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-5, Proceedings of ISPRS Technical Commission V Symposium “Close-range imaging, ranging and applications”, S. 117–122, Juni 2014.

- Elseberg, J.; Magnenat, S.; Siegwart, R.; Nüchter, A. (2012): Comparison of nearest-neighbor-search strategies and implementations for efficient shape registration. *Journal of Software Engineering for Robotics (JOSER)*, Volume 3, Number 1, S. 2–12.
- Greenspan, M.; Yurick, M. (2003): Approximate K-D Tree Search for Efficient ICP. In: *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Recent Advances in 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM '03)*, S. 442–448, Kanada, Oktober 2003.
- Houshiar, H.; Elseberg, J.; Borrmann, D.; Nüchter, A. (2015): A Study of Projections for Key Point Based Registration of Panoramic Terrestrial 3D Laser Scans. *Journal of Geospatial Information Science*, Volume 18, Issue 1, S. 11–31, Taylor & Francis.
- Houshiar, H.; Elseberg, J.; Borrmann, D.; Nüchter, A. (2013): Panorama Based Point Cloud Reduction and Registration. In: *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR '13)*, Montevideo, Uruguay.
- Houshiar, H.; Nüchter, A. (2015): 3D Point Cloud Compression using Conventional Image Compression for Efficient Data Transmission. In: *Proceedings of the XXV International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT '15)*, IEEE Xplore, Sarajevo, Bosnien, Oktober 2015.
- Nüchter, A.; Borrmann, D.; Koch, P.; Kühn, M.; May, S. (2015): A Man-Portable, IMU-free Mobile Mapping System. In: *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-3/W5, *Proceedings of the ISPRS Geospatial Week 2015, Laserscanning 2015*, S. 17–23, La Grande Motte, Frankreich.

Kontakt

Andreas Nüchter

Universität Würzburg, Informatik VII – Robotik und Telematik

97074 Würzburg

andreas@nuechti.de

Organisation und Verwaltung von 3D-Laserscanning Projekten mit mehr als 1.000 Standpunkten

Christof Kremer

1 Einleitung

Seit 2008 setzt Steuernagel Ingenieure Laserscanner im Unternehmen ein. Die bearbeiteten Projekte reichen dabei von solchen mit lediglich einem oder zwei Standpunkten, bis hin zu langjährigen Projekten, die es auf ein Volumen von mehreren tausend Standpunkten bringen. Bis heute wurden durch die entsprechende Fachabteilung über 100 Projekte mit mehr als 23.000 Standpunkten abgewickelt. Dieser Artikel soll die Erfahrungen zusammenfassen, die bezüglich der Organisation solch umfangreicher Projekte gesammelt wurden.

Als Beispiele sollen die drei folgenden Projekte dienen:

- Fraport AG: Flugsteig A-Plus (Soll-Ist-Vergleich Architektur und Technische Gebäude Ausstattung (TGA))
- Koelnmesse: Ermittlung der nutzbaren Halfenschienen an den Hallendecken
- Koelnmesse 3.0: Modellieren der Ausstellungsflächen und Nebenräume

2 Projekte

2.1 Fraport AG: Flugsteig A-Plus

2.1.1 Aufgabenstellung

Europas drittgrößter Airport eröffnete im Oktober 2012 den neuen Flugsteig A-Plus. Auf einer Länge von 790 m und auf sechs Ebenen verteilt beträgt seine Bruttogeschossfläche 240.000 m².

Aufgabe war die baubegleitende Erfassung des Ist-Zustandes von Architektur und der TGA zum anschließenden Vergleich mit der Planung. Die erforderlichen Daten wurden ausnahmslos durch zwei Ingenieurbüros mit 3D-Laserscannern erfasst. Steuernagel Ingenieure zeichnete für den Bereich „Finger“ verantwortlich, während das zweite Büro den Bereich der „Wurzel“, den Anschluss an das bestehende Terminal 1, betreute.

2.1.2 Rahmenbedingungen/Vorgaben

Für jeden Raum der 6 Gebäudeebenen waren bis zu 5 Scanphasen während der Bauzeit vorgesehen. Die erste nach Fertigstellung des Rohbaus, die übrigen je nach Baufortschritt, der sich teilweise über zwei Meter Höhe erstreckten TGA unter der Decke.

Insgesamt ergaben sich folgende Rahmenbedingungen:

- Einsatzzeit täglich während der gesamten Bauzeit von 2 Jahren
- Bis zu 5 Scanphasen je Raum
- Genauigkeit ± 1 cm
- Vorgegebene Scanrichtlinie (Benennung der Standpunkte, etc.)

2.1.3 Geräte- und Personaleinsatz

Im Einsatz waren:

- Scanner HDS7000, HDS6100 und C10, jeweils mit Kameras Canon EOS 450D
- 6 Mitarbeiter im Außendienst
- ca. 2.000 laminierte Targets je Ebene
- 3 PCs mit Intel Xeon i7 Prozessoren, 12 GB RAM, 1 TB interne HDD, sowie Wechselplatteneinschübe
- 3 CAD-Bearbeiter im Innendienst
- Cyclone 6.0 (32 Bit), MicroStation v8i

Über die vorgegebene Scanrichtlinie war die Benennung der einzelnen Scans definiert und wurde entsprechend in Cyclone umgesetzt (Abb. 1).

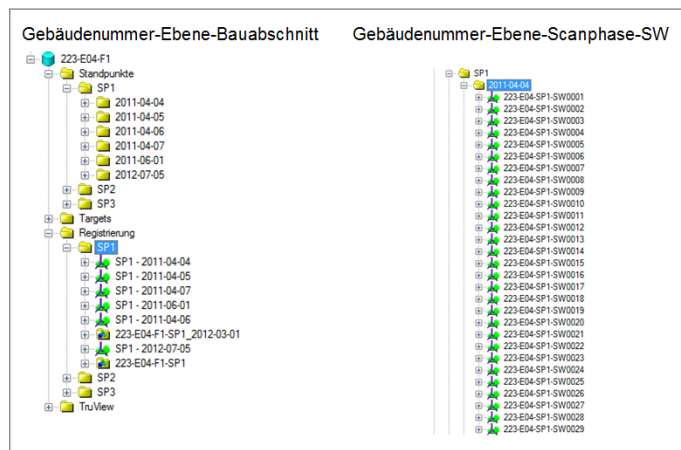


Abb. 1:
Aufbau der Cyclone Scan-datenbank: links Benennung der Datenbank, rechts Zusammensetzung des einzelnen Standpunktes

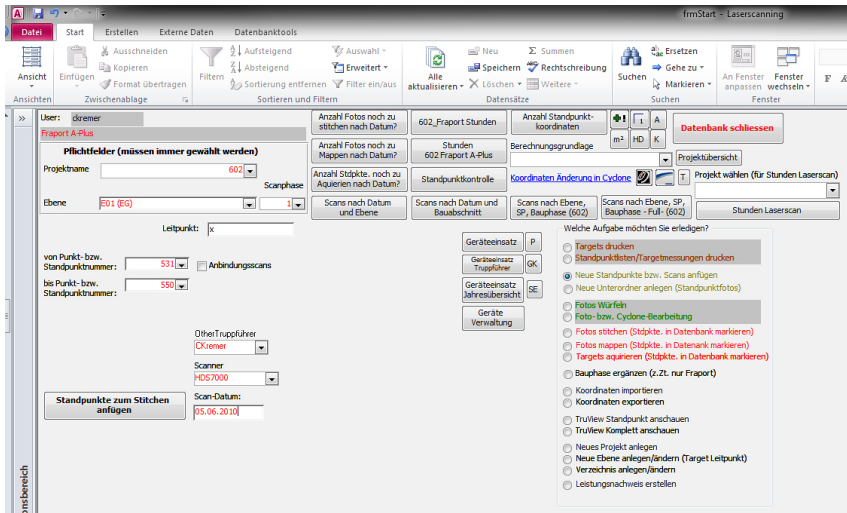


Abb. 2: Access-Datenbank A-Plus

Zur Dokumentation der Innendienstbearbeitung diene wiederum eine selbstentwickelte Access-Datenbank, in der jeder Arbeitsschritt vom Import der Scandaten über Scantag, Ebene, Scanphase und Bauabschnitt, bis hin zum verwendeten Scanner und dem Außendienstmitarbeiter abgebildet war (Abb. 2).

2.1.4 Ergebnis

Das Ergebnis in Zahlen (siehe auch Abb. 3):

- 417 Scantage
- Teilweise Einsatz von 2 Scannern gleichzeitig
- 9.300 Sandpunkte
- ca. 18 TB reine Scandaten (davon 270 GB TruView-Daten)
- Abgabe der Ergebnisse auf 30 Festplatten á 2 TB

Das Ergebnis in Bildern (Abb. 4): Die Modelle (Soll) werden hier in gelb und blau dargestellt (je nach Art des Modells). Der Scan (eingefärbte Punktwolke) dokumentiert die Ist-Lage. Zur schnelleren Orientierung im Bild, markieren die roten Pfeile hier die Soll- und Ist-Lage.

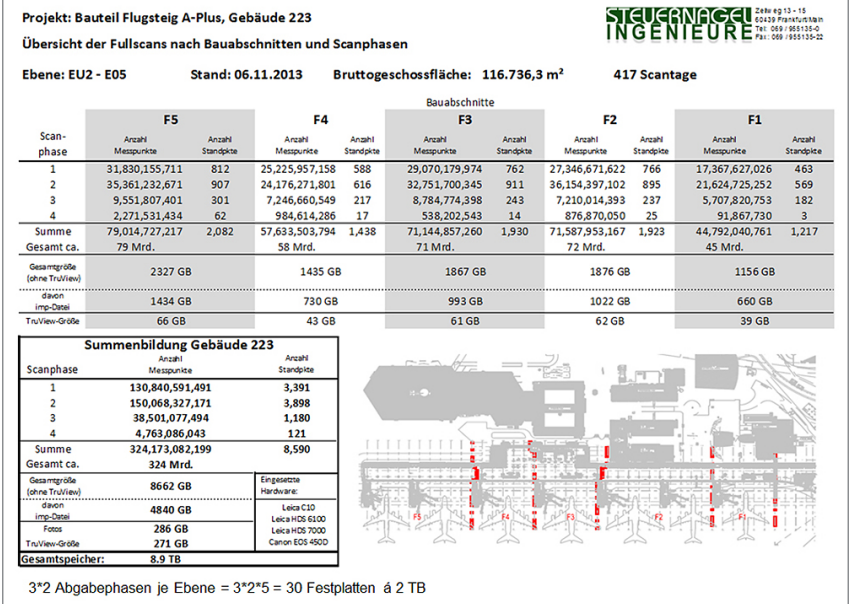


Abb. 3: Statistik A-Plus

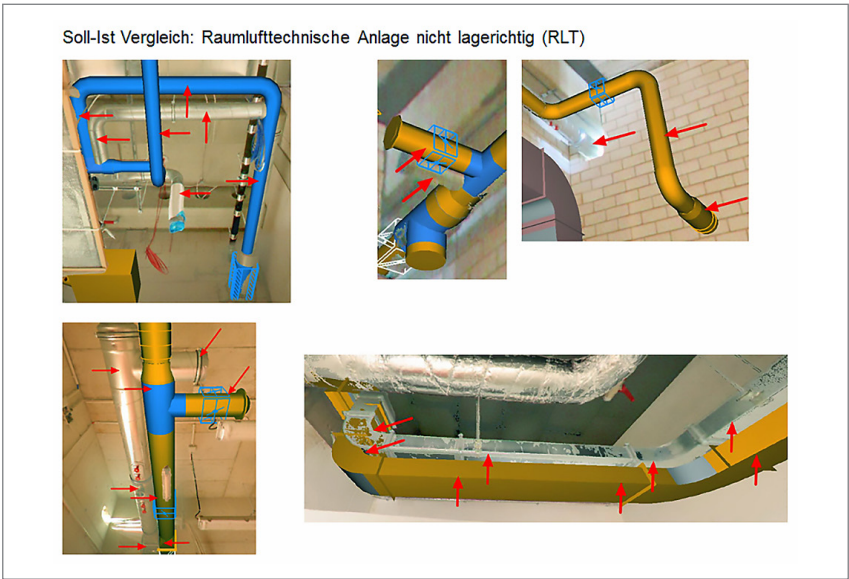


Abb. 4: Soll-Ist-Vergleich TGA

2.2 Koelnmesse: Ermittlung der nutzbaren Halfenschienen an den Hallendecken

2.2.1 Aufgabenstellung

Die Koelnmesse ist, gemessen an ihrer Ausstellungsfläche von ca. 290.000 m², die sechstgrößte Messe weltweit. In den Decken ihrer Messehallen sind Ankerschienen (sogenannte Halfenschienen) montiert, die als Anschlagpunkte für den Messebau dienen. Über die Jahre wurden die Schienen teilweise überbaut und sind nicht durchgängig nutzbar. Aufgabe war es, die **nutzbaren** Halfenschienen in 6 Meter Höhe im geschwärtzten Deckenbereich zu dokumentieren.

2.2.2 Rahmenbedingungen/Vorgaben

Insgesamt ergaben sich folgende Rahmenbedingungen:

- Außendienst nur zwischen den Messen, wenn die Hallen nicht genutzt wurden
- 7 zu bearbeitende Hallen
- Genauigkeit ± 1 cm
- Keine Scanrichtlinie bzw. Vorgaben zur Scandatenbank (Benennung der Standpunkte, etc.)

2.2.3 Geräte- und Personaleinsatz

Im Einsatz waren:

- Scanner HDS6100 und C10, jeweils mit Kameras Canon EOS 450D
- 2 Rollstative
- 4 Deckenstrahler
- 2 Mitarbeiter im Außendienst
- 3 PCs mit Intel Xeon i7 Prozessoren, 16 GB RAM, 1 TB interne SATA3 HDD
- 3 CAD-Bearbeiter im Innendienst
- Cyclone 6.0 (32 Bit) bis 7.3 (64 Bit), MicroStation v8i

Da von Seiten Koelnmesse keine Vorgaben bzgl. der Datenbank vorlagen, erfolgte die Organisation in Cyclone in einer flachen Struktur, nach Halle und Scandatum ([Abb. 5](#)).

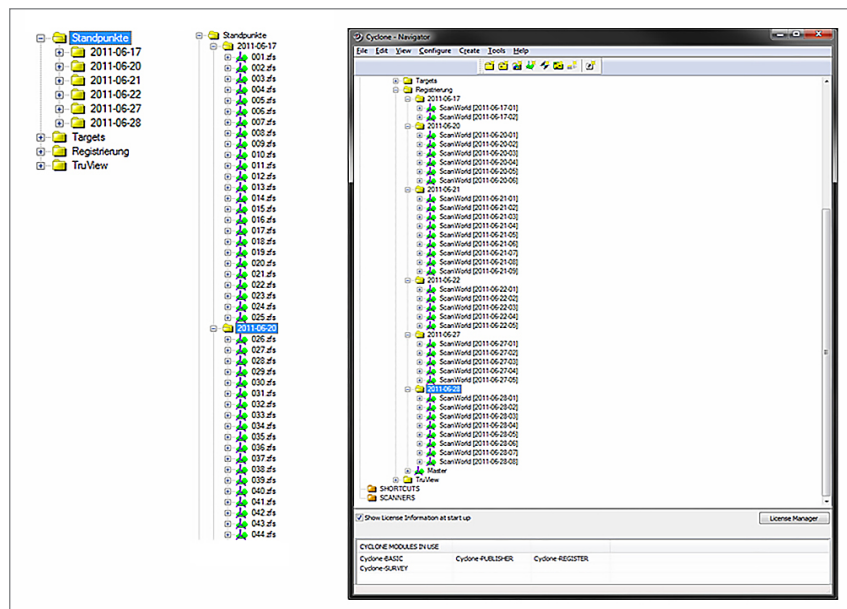


Abb. 5: Aufbau der Cyclone Scandatenbank

2.2.4 Ergebnis

Die vorhandenen Unterzüge, sowie die TGA unter der Decke, machten es notwendig, sehr engmaschig zu scannen. Teilweise lagen die Standpunkte nur zwei Meter auseinander (Abb. 6).

Das Ergebnis in Zahlen:

- 73 Scantage
- Einsatz von 2 Scannern gleichzeitig
- 4.300 Sandpunkte
- ca. 10 TB reine Scandaten (davon 180 GB TruView-Daten)
- Abgabe als DWG-Datei je Ebene (Größe ca. 2 MB)

Das Ergebnis in Bildern (Abb. 7): In Grün sind hier die Unterzüge dargestellt und schwarz dazu die nutzbaren Halfenschienen in den Unterzügen. Die Nutzbarkeit der Halfenschienen wird hier durch Lüftungsanlagen, Rohrleitungen, Kabelpritschen, etc. unterbrochen, daraus ergeben sich zum Teil sehr kurze (mind. 5 cm) nutzbare Abschnitte.



Abb. 6:
Übersicht der
Standpunkte
am Beispiel
Halle 10.1

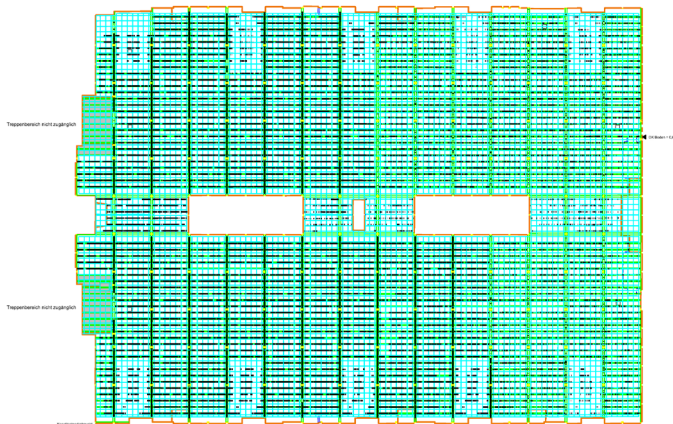


Abb. 7:
Ergebnisdar-
stellung der
nutzbaren
Halben-
schienen
am Beispiel
Halle 10.1

2.3 Koelnmesse 3.0: Modellieren der Ausstellungsflächen und Nebenräume

2.3.1 Aufgabenstellung

Unter dem Projekt „Koelnmesse 3.0“ läuft derzeit ein umfangreiches Modernisierungsprogramm, d. h. bis 2030 den Messplatz Köln nachhaltig zum attraktivsten innerstädtische Messegelände der Welt zu schaffen. Als Planungsgrundlage sollen aus den bereits vorliegenden Scandaten der Halfenschienen die Ausstellungsflächen (Architektur und TGA) in 3D modelliert werden. Weiterhin müssen die Nebenräume gescannt und ebenfalls modelliert werden.

Insgesamt ergaben sich folgende Rahmenbedingungen:

- Außendienst nur zwischen den Messen, wenn die Hallen nicht genutzt wurden, sowie zum Teil in der Nacht
- zwei zu bearbeitende Hallen (plus vier von Partnerbüro)
- Genauigkeit der Modellierung ± 5 cm

2.3.2 Geräte- und Personaleinsatz

Im Einsatz waren:

- Scanner HDS700 und P40, jeweils mit Kameras Canon EOS 450D
- 2 Rollstative
- 2 Mitarbeiter im Außendienst
- 4 PCs mit Intel Xeon E5 Prozessoren, 60 GB RAM, 1 TB interne SSD
- 4 CAD-Bearbeiter im Innendienst
- Cyclone 9, MicroStation v8i, Ravit 2017, AutoCAD 2017

2.3.3 Ergebnis

Das Ergebnis in Zahlen:

- 100 Scantage
- Einsatz von 2 Scannern gleichzeitig
- 4.000 Sandpunkte
- ca. 6 TB reine Scandaten (davon 200 GB TruView-Daten)
- Abgabe als DWG-Datei (Größe ca. 100 MB je Halle)

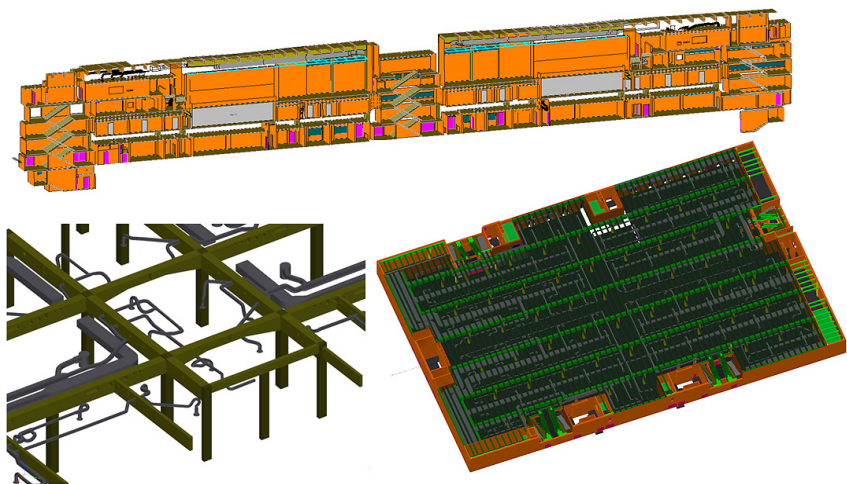


Abb. 8: Ergebnisdarstellung

Das Ergebnis in Bildern (Abb. 8): Der obere Bildbereich zeigt einen Querschnitt durch eine Messehalle mit Treppenhaus und Nebenräumen. Hierbei wurden nur die Architektur (Stützen, Unterzüge, Decken, Böden, Wände, Türen) und Lüftungsanlagen modelliert. Der Bildbereich unten rechts zeigt einen Blick in die Ausstellungsfläche einer Messehalle mit den Lüftungsanlagen und der Architektur. Der Bildbereich links unten zeigt eine Vergrößerung der Komplexität der Lüftungsanlagen und Unterzügen mit Durchbrüchen.

3 Erfahrungen

Auch umfangreiche Projekte lassen sich mit entsprechender Planung erfolgreich umsetzen. Wichtig ist die Koordinierung und Steuerung der Abläufe durch einen qualifizierten Projektleiter, der den Überblick über den Projektstand behält. Dafür unabdingbar ist eine gepflegte Datenbank und der Einsatz möglichst leistungsfähiger Hard- und Software. Die Punktwolkenbearbeitung mit Hilfe von Leica JetStream führte zu einem massiven Zugewinn an Komfort und Geschwindigkeit (Abb. 9).

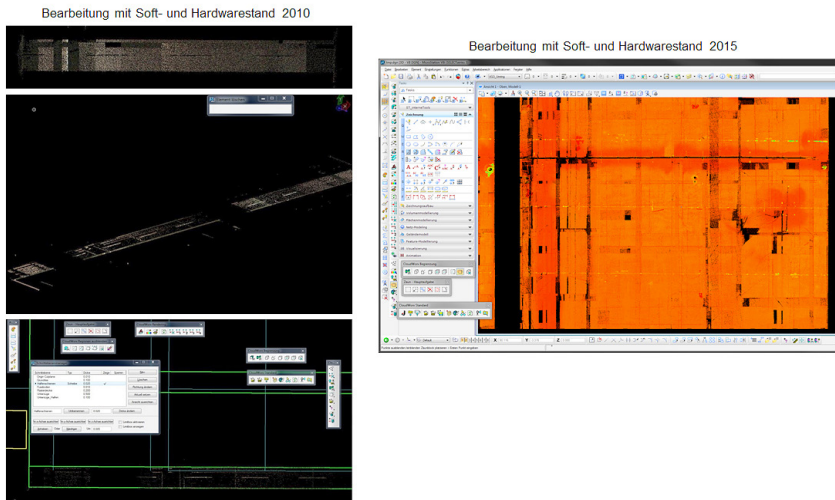


Abb. 9: Punktwolkenbearbeitung 2010 und 2015

Mit dem Kunden müssen vor Beginn die entsprechenden Parameter der Bearbeitung abgestimmt werden:

- Datenbankstruktur (Cyclone)
- Abzugebende Festplattenformate (USB 2.0, USB 3.0, SATA, SSD, etc.)

- Die zu liefernden Datenbestände (Rohdaten, georeferenzierte Punktwolke, eingefärbte Punktwolke, etc.)
- Die Targetgestaltung (Papier, laminiert, etc.)
- Die Visualisierung der Daten (welche Komponenten werden ggf. von der IT gesperrt; z. B. TruView-Plugin)

Danach steht einer erfolgreichen Projektbearbeitung nichts mehr im Wege, allerdings wartet die nächst leistungsfähigere Hardware-Generation bereits auf ihre Anschaffung.

Kontakt

Christof Kremer
Steuernagel Ingenieure GmbH
Zeilweg 13–15, 60439 Frankfurt am Main
christof.kremer@steuernagel-ing.de

Hochpräzises Mobile Mapping im Ingenieur- und Verkehrswegebau

Christian Hesse | Kay Weltzien | Andreas Stromhardt

1 Einleitung

1.1 Evolution der mobilen Datenerfassung

Die mobile Datenerfassung mit Hilfe Scanner basierter Sensoren und Sensorsysteme hat inzwischen einen festen Platz im geodätischen Werkzeugkasten eingenommen, wie eine inzwischen breite Palette an Kfz- und Trolley-basierten sowie Rucksack- und Indoor-Mapping-Lösungen zeigt (Neitzel und Neumann 2013).

Ähnlich wie bei Tachymetern und GNSS-Receivern, waren auch Lasermessverfahren zur Umgebungserfassung zunächst nur als rein statische Verfahren in Form des terrestrischen Laserscannings verfügbar; die „Mobilisierung“ von Scannern und die Entwicklung kinematischer oder mobiler Messverfahren folgte im Abstand von einigen Jahren.

Es ist zu beobachten, dass mobile Messsysteme, die mit Genauigkeiten zwischen 20 mm und mehreren Dezimetern aber mit großen Erfassungsvolumina operieren, am Markt vornehmlich mit dem Terminus „Mapping“ bezeichnet werden.

Demgegenüber werden Systeme, die vergleichsweise hohe Genauigkeiten bei einer gleichzeitig geringeren Erfassungseffizienz liefern, vielfach als „Scanner“ bezeichnet, obwohl grundsätzlich beide Technologien berührungslose 3D-Lasersmesstechnik in scannender Form als bildgebende Komponente einsetzen.

Für Scansysteme mit gleichzeitig hoher Genauigkeit und Produktivität, wie beispielsweise das ProScan System von Leica, wird häufig auch das Präfix „kinematisch“ in Verbindung mit „Scanning“ zur Abgrenzung von Mobile-Mapping-Systemen verwendet (Hesse und Vennegeerts 2014).

Abb. 1 zeigt die verschiedenen Klassen der aktuell am Markt verfügbaren scanbasierten Messsysteme, die überwiegend im Bereich des Bauwesens, der Architektur und des Facility Managements zum Einsatz kommen. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass auch Messsysteme aus dem industriellen Umfeld (Ehm und Hesse 2012) oder der Fernerkundung gewisse Schnittmengen mit den hier gezeigten Systemen besitzen.

Für jede in der Produktivitäts-Matrix abgebildete Systemklasse existieren spezielle Marktsegmente, in welchen die Parameter Leistungsfähigkeit, Genau-

Produktivität

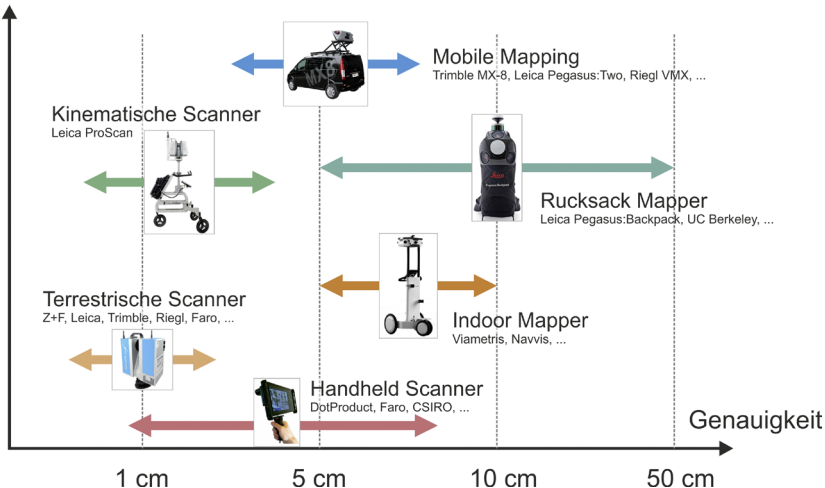


Abb. 1: Produktivitäts-Matrix scanbasierter Messsysteme

igkeit und Anschaffungskosten des jeweiligen Messsystems optimal zur Geltung kommen.

Während das Genauigkeitsniveau in aller Regel durch die Messaufgabe vorgegeben wird, hängt die Wahl des Messsystems und somit die mögliche Produktivität meist von der Projektgröße und dem zur Verfügung stehenden Kostenrahmen ab.

1.2 Einsatzgebiete und Sensorsysteme

Die Einsatzgebiete, in denen mobile 3D-Lasermesstechnik inzwischen Verwendung findet, sind ebenso wie die Anzahl der zur Verfügung stehenden Systeme äußerst vielfältig (Kutterer et al. 2008).

Für die Innenaufnahme von Gebäuden werden insbesondere Trolley-Systeme wie die Produkte von Viametris oder Navvis genutzt, die mit Hilfe von Profilsclannern Objektgenauigkeiten von wenigen Zentimetern erreichen. Für verformungsgetreue Aufmaße ist die Genauigkeit dieser auf SLAM beruhenden Verfahren jedoch in aller Regel nicht ausreichend, so dass hierbei üblicherweise terrestrische Laserscanner und Handscanner zum Einsatz kommen.

Die Bestandsdatenerfassung im Straßen- und Verkehrswegebau wird überwiegend von hochproduktiven aber sehr kostenintensiven Mobile-Mapping-Systemen (MMS) dominiert, die auf Kfz-Plattformen im fließenden Verkehr entlang des Objektes bewegt werden. Aufgrund verschiedener systembedingter Restriktionen liefern diese Systeme je nach Verfügbarkeit externer Passpunkte

Genauigkeiten von wenigen bis mehreren Zentimetern. Zusätzlich zur reinen oberirdischen Geometrie kommen neuerdings auch Systeme mit Bodenradar zum Einsatz (Stricker 2015).

Ein deutlich kostengünstigerer Ansatz, der ausschließlich über GNSS-Positionierung realisiert wurde und somit auf die Verfügbarkeit von Satellitensignalen angewiesen ist, wird in Hesse (2008) beschrieben.

Für Einsatzgebiete abseits befahrbarer Straßen ist das von Leica im Jahr 2014 vorgestellte Rucksack-Mapping konzipiert, welches neben zwei Profilsclannern auch mehrere Kameras zur Dokumentation verwendet und mit verringerter Genauigkeit auch in Innenräumen einsetzbar ist. Ähnlich wie bei Indoor-Mapping-Systemen, ist die Genauigkeit jedoch auch hier auf einige Zentimeter bis mehrere Dezimeter beschränkt.

Für Anwendungen im Ingenieur- und Verkehrswegebau werden jedoch häufig Genauigkeiten von einem Zentimeter oder besser vorausgesetzt, so dass die zuvor beschriebenen Systeme hier nicht zum Tragen kommen.

In dieser Genauigkeitsklasse haben sich neben statischen, also vom Stativ aus eingesetzten, terrestrischen Lasersclannern und von KfZ aus lokal scannenden Systemen für die Bestimmung von Spurrillen (Reiterer et al. 2013) vor allem sogenannte kinematische Scansysteme, wie das ProScan System von Leica Geosystems (Saal 2015), durchgesetzt (Hesse und Vennegeerts 2014).

Diese können nicht nur mit Hilfe von GNSS (Kersten et al. 2016), sondern vor allem mit trackenden Totalstationen referenziert werden und liefern Genauigkeiten von wenigen Millimetern bei gleichzeitig sehr hoher Produktivität (Hesse et al. 2016).

Noch höhere Genauigkeiten von besser als 1 mm liefert das in Dorndorf et al. (2015) beschriebene Scansystem, bei welchem ein bewegter terrestrischer Laserscanner über einen 6-DOF Lasertracker referenziert wird. Dieses System ist allerdings eher in einer Schnittmenge mit industriellen Scansystemen zu sehen.

2 Referenzierung mobiler Laserscansysteme

2.1 Anforderungen an die Sensorik

Zur Referenzierung mobil beziehungsweise kinematisch erfasster Scandaten müssen nicht nur sechs Freiheitsgrade (drei Koordinaten und drei Raumwinkel) bestimmt, sondern auch die Zeitskalen der einzelnen Sensoren gegeneinander synchronisiert werden.

Üblicherweise kommen bei mobilen Systemen zur Erfassung von Bestandsdaten hierfür inertielle Sensoren wie Kreisel, Beschleunigungssensoren oder be-

reits vollständig integrierte Inertialnavigationssysteme, im englischen Terminus Inertial Measurement Unit (IMU) genannt, zum Einsatz.

Je nach Genauigkeitsanforderungen verwenden Inertialmesssysteme dieses Typs Ringlaser-, faseroptische oder MEMS-Kreisel für die Richtungsbestimmung.

Selbst hochwertige faseroptische Systeme, die in einem mittleren fünfstelligen Euro-Bereich liegen, können Raumwinkel und Positionen zwar über kurze Zeiträume überaus genau bestimmen, unterliegen jedoch über längere Messzeiträume einer sogenannten Drift, die weder vollständig prädictierbar noch linear ist und nach einigen Minuten schon Abweichungen von mehreren Dezimetern erreichen kann.

Auf diese Weise treten zum Teil starke systematische Verfälschungen der Position und räumlichen Orientierung, insbesondere des Azimutes, auf. Die Gründe einer solchen Drift sind vielfältig und können der einschlägigen Fachliteratur entnommen werden.

Kommt auf einem mobilen oder kinematischen Messsystem nun ausschließlich eine solche IMU zum Einsatz, können die in Abb. 2 dargestellten Effekte beobachtet werden, bei denen das Fahrzeug eine von den Sensoren angezeigte Scheinbewegung vollzieht, die von der realen Trajektorie abweicht.

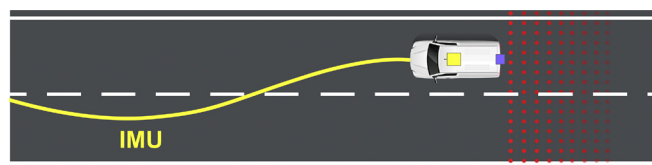


Abb. 2:
Referenzierung
mit Inertialmess-
einheit (IMU)

Da diese Drift nahezu ausschließlich von der Messdauer abhängig ist, besteht ein gewisser Konflikt zwischen hohen Fahrtgeschwindigkeiten der Sensorplattform und einer möglichst hochauflösenden Punktwolke. Je schneller die zu erfassende Strecke mit dem mobilen oder kinematischen System befahren wird, desto geringer sind die Drifteffekte, allerdings sinkt mit zunehmender Geschwindigkeit ebenso die realisierbare Punktdichte.

Zur Verringerung dieser Driften werden seit langer Zeit die Messwerte von GNSS-Sensoren als langzeitstabile Stützinformationen in die Trajektorienberechnung von Mobile-Mapping-Systemen eingeführt. Hierdurch können die Vorteile von kurzfristig genauen IMU-Messungen mit den über längere Zeiträume stabilen GNSS-Messungen kombiniert werden. Es ergeben sich absolute Objektgenauigkeiten, die denen von kinematischen GNSS-Messungen im Bereich von 3 bis 5 cm entsprechen, wobei die relativen Genauigkeiten benachbarter Teile der Punktwolke bedingt durch den dominierenden Anteil der IMU-Messungen deutlich genauer sein können. Abb. 3 zeigt die Elimination der Sensor-

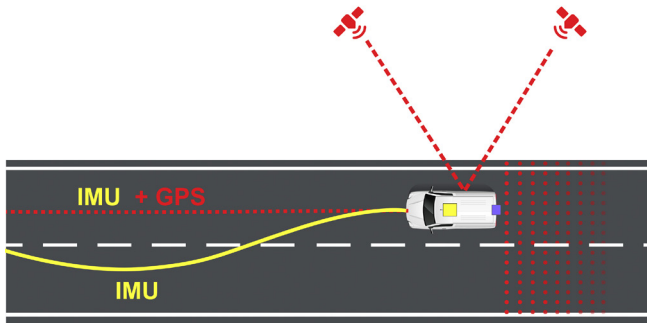


Abb. 3:
Stützung der
Inertialmessun-
gen mit GNSS-
Messungen

drift von Inertialmesssystemen durch Integration von kinematischen GNSS-Beobachtungen.

2.2 Genauigkeitssteigerung der Referenzierung

Da die in [Kap. 2.1](#) beschriebenen Genauigkeiten insbesondere für die Höhenkomponente für Anwendungen im Ingenieur-, Straßen- und Verkehrswegebau nicht ausreichend sind, werden zusätzliche genauigkeitssteigernde Maßnahmen erforderlich.

Hierzu werden üblicherweise sogenannte Nullgeschwindigkeits- (ZUPT) oder Koordinatenupdates (CUPT) eingesetzt. Im Falle von CUPTs wird das Fahrzeug zum Stillstand gebracht, um die vorhandenen Drifteffekte während der Stillstandzeiten zu bestimmen und rechnerisch zu eliminieren. Da diese Methode im fließenden Verkehr und auf Autobahnen nicht praktikabel ist, wird in aller Regel auf die Auslegung von Passpunkten (zum Beispiel gesprühten Messmarken) am Straßen- oder Objektrand zurückgegriffen (CUPT), deren Koordinaten mit Hilfe von Polygonzügen und Feinnivellements Lage- und Höhenmäßig an ein vorhandenes übergeordnetes Festpunktfeld angeschlossen werden.

Diese Punkte werden von der vorbeifahrenden Scanplattform im Rahmen der möglichen Scangenaugigkeit mit erfasst und in Form einer Rückwärtsrechnung als bekannte Koordinaten (CUPT) in die Auswertung eingeführt.

Nachteilig wirkt sich hierbei aus, dass die auf der rauen Fahrbahnoberfläche applizierten Passpunkte als weiteres Element in die Varianzfortpflanzung eingehen und die Anzahl der Passpunkte aufgrund des hohen Messaufwandes üblicherweise auf Abstände zwischen 50 m und 200 m begrenzt ist ([Abb. 4](#)).

Sowohl das notwendige Einscannen als auch der große Abstand der Punkte tragen dazu bei, dass diese nicht mit der gleichen Genauigkeit in die Positionierung des Mobile Mapping Systems eingehen, mit der sie eingemessen wurden.

Im Gegensatz dazu machen sich kinematisch getrackte Scansysteme die Möglichkeit zu Nutze, bereits während der Messung des Polygonzuges die Positio-

nierung der scannenden Sensorplattform durch das Tachymeter selbst vorzunehmen. Hierzu wird ein direkt auf der Plattform befindliches und relativ zum Body-Koordinatensystem eingemessenes Prisma angezielt und kontinuierlich entlang der befahrenen Trajektorie verfolgt. Die Referenzierung der Plattform erfolgt auf diese Weise direkt durch das Tachymeter.

Der Schritt der Auslegung, Einmessung und erneuten scanbasierten Erfassung der Passpunkte wird hierdurch eingespart, wodurch sich eine signifikante Erhöhung der Objektpunktgenauigkeit ergibt, wie in verschiedenen Praxisprojekten nachgewiesen werden konnte (Hesse et al. 2016, Saal 2015).

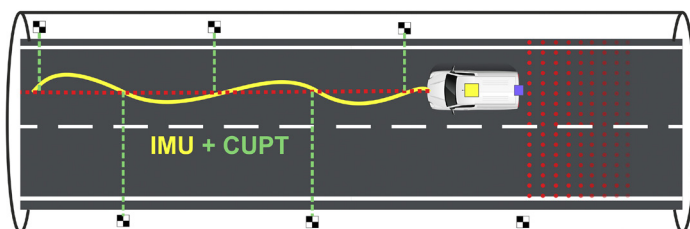


Abb. 4:
Steigerung der
Genauigkeit
durch Koordinatenupdates

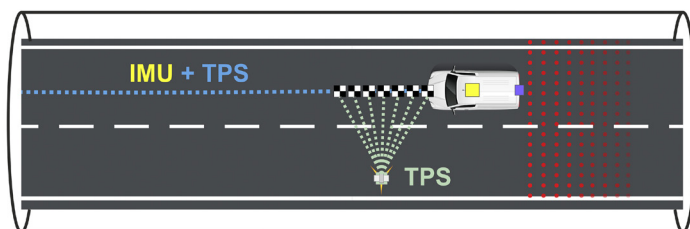


Abb. 5:
Hochfrequente
Koordinatenupdates

Neben dem fehlertheoretischen Vorteil verbessert sich die Positionierung der Sensorplattform zudem allein durch die massive Erhöhung der Anzahl an Passpunkten, was sich an folgendem Beispiel illustrieren lässt: Bei einer angenommenen Geschwindigkeit von 8 km/h für eine manuell bewegte kinematische Scanplattform und einer Messfrequenz des Tachymeters im Trackingmodus von 5 Hz, die von allen aktuellen Totalstationen erreicht wird, besitzen die Messpunkte der Spur des Prismas einen räumlichen Abstand von 40 cm. Abb. 5 zeigt das Prinzip von kinematisch getrackten Sensorplattformen und die daraus resultierende Passpunktdichte.

Die Passpunkte sind somit nicht nur genauer bestimmt sondern liegen zudem um den Faktor 250 enger als die auf der Straßenoberfläche ausgelegten und wieder eingescannten Marken im Abstand von 100 m.

Aus diesen Vergleichszahlen wird deutlich, dass kinematisch scannende Systeme für Anwendungen mit schlechtem GNSS-Empfang oder für Projekte prädestiniert sind, bei denen sehr hohe Objektgenauigkeiten erforderlich sind.

Neben der Genauigkeit der Punktbestimmung eröffnet sich zudem die Möglichkeit, auch die Objektauflösung in erheblichem Maße zu steigern, da die zeitabhängige Drift durch die hohe Passpunktzahl einen wesentlich geringeren Einfluss auf das Messergebnis hat, als bei von IMUs dominierten Lösungen.

3 Anwendungen für hochpräzises Mobile Mapping

3.1 Asphaltdeckenmessung

Die Messung von Asphaltdecken gehört zu den anspruchsvolleren Aufgaben im Bereich der kinematischen Bestandsdatenerfassung (Abb. 6), da die geforderten



Abb. 6: Asphaltdeckenmessung im Straßenbau

Genauigkeiten von bis zu 3 mm auf tiefschwarze und wenig reflektierende Asphaltdecken selbst für statische Scans als hoch zu betrachten sind.

Kinematische Verfahren besitzen jedoch im Vergleich zu statischen Scans den erheblichen Vorteil, dass die Auftreffwinkel des Lasers auf die Straßenoberfläche durch

die Bewegung des Scanners entlang der Gradienten und einer orthogonal zur Bewegung ausgerichteten Scanebene in einem günstigen Verhältnis zur Objektentfernung stehen. Zu dieser Thematik sei auch auf Schäfer (2011) verwiesen.

Hierdurch können zum einen kurze Objektentfernungen und zum anderen weitgehend senkrechte Auftreffwinkel realisiert werden. Abb. 7 und Abb. 8 zeigen die Überlagerung von insgesamt drei Befahrungen in der isometrischen Ansicht.

Bei dem hier vorgestellten Projekt waren die Einbauvolumina und somit die Dicke von Asphaltdecken beider Richtungsfahrbahnen einer zweispurigen Autobahn mit Hilfe eines schnell und hochgenau messenden Scansystems zu bestimmen. Die Anforderungen an die Messgenauigkeit lagen in einem Bereich, der von Kfz-basierten Mobile-Mapping-Systemen mit vertretbarem Aufwand momentan nicht erreichbar ist. Zudem bestand die Schwierigkeit darin, dass eine Befahrung mit Fahrzeugen jeglicher Art vom Auftraggeber nicht zugelassen wurde, um die neu eingebaute Asphaltdecke nicht zu beschädigen.

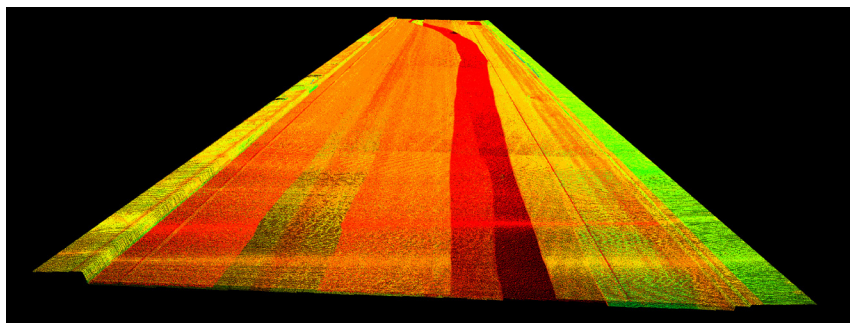


Abb. 7: Punktwolke aus drei Befahrungen

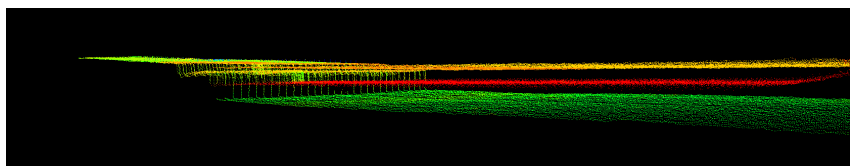


Abb. 8: Tragschicht, Binderschicht, Deckschicht

Aus diesem Grund wurde das ProScan System von Leica in Verbindung mit einer trackenden Totalstation vom Typ TS30 für diese Aufgabe als Erfassungssystem ausgewählt. Die mit diesem Verfahren erfasste Punktwolke aller drei Schichten des Straßenoberbaus ist in [Abb. 7](#) zu sehen.

Gut zu erkennen ist die Abtastlücke des aufrecht auf dem ProScan adaptierten Scanners, die linear entlang der befahrenen Trajektorie verläuft und durch die hier vorgenommene Befahrung der gesamten Strecke im Hin- und Rückweg eliminiert werden kann.

Besonders anspruchsvoll ist die Erfassung der Binderschicht ([Abb. 9](#)), da diese im neu eingebauten Zustand eine tiefschwarze und glänzende Oberfläche besitzt, welche sehr wenig Messsignal des Lasers reflektiert. Diese Eigenschaft zeigt sich in dem um den Faktor zwei erhöhten Messrauschen der kinematisch erfassten Scans.

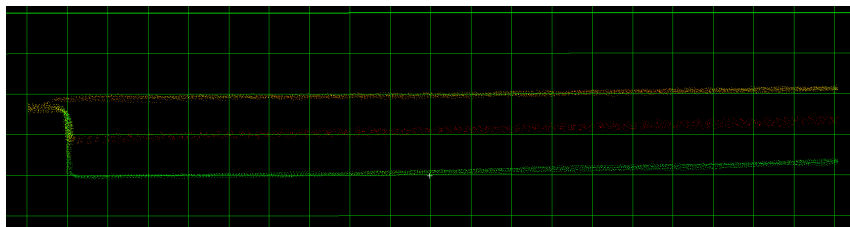


Abb. 9: Straßenoberbau im Querschnitt

Die Referenzierung des ProScan Systems erfolgte in diesem Fall durch eine automatisch zielverfolgende Totalstation vom Typ Leica TS30 mit einer Abtast-rate von 8 Hz, die ein auf dem ProScan befindliches Prisma kontinuierlich verfolgte. Für die Stationierung des Tachymeters und die Referenzierung in einem einheitlichen Koordinatensystem konnte das trassennah vorhandene Festpunktfeld verwendet werden.

Die Bestimmung der Dicke der eingebauten Asphaltsschicht erfolgte wie oben erwähnt im Hin- und Rückweg, um eine lückenlose Punktwolke zu erfassen. Der Zeitbedarf pro Doppelkilometer betrug je Fahrtrichtung 4 Stunden für die zwei Fahrstreifen breite Autobahn, was einer Fläche von etwa 15.000 qm entspricht.

Hierzu wurde die Fahrbahn in jeweils 200 m langen Abschnitten erfasst, um die Zielweiten des Tachymeters auf maximal 100 m zu begrenzen. Die gesamte Vermessung konnte mit einem Team bestehend aus zwei Personen durchgeführt werden, wobei die zweite Person lediglich für die Stationierung und den Umbau des trackenden Tachymeters verantwortlich war.

3.2 Deformationsmessungen von Kaimauern

In einem zweiten Projekt bestand die Aufgabe darin, die Kaimauer sowie das Flussbett entlang des Flusses Ilmenau, der durch die historische Altstadt von Lüneburg fließt, mit hoher Genauigkeit zu erfassen. Zur Messung der 1,7 km langen Strecke stand nur ein kurzer Zeitraum zur Verfügung, in dem der Fluss trockengelegt wurde, so dass eine Erfassung mit Hilfe von statischen Scans ausgeschlossen war.

Aufgrund des sehr weichen Bodens und der teilweise noch vorhandenen Restwasserflächen wurde ein spezieller Wagen entwickelt, der mit Ballonreifen ausgestattet war, um eine Traglast von bis zu 100 kg selbst bei der Überquerung von flachen Wasserflächen standsicher zu ermöglichen (Abb. 10). Da das Pro

Scan System inklusive Leica P15 Scanner sowie Akkus nur etwa 25 kg wiegt, waren ausreichend Nutzlastreserven vorhanden.

Bedingt durch die Lage des Flusses und der sehr engen historischen Bebauung war der Empfang von GNSS-Signalen stark eingeschränkt, so dass eine Positionierung



Abb. 10: Mobile-Mapping-Plattform mit Leica ProScan

nur mit zielverfolgendem Tachymeter in Frage kam. Zunächst wurde mit Hilfe eines Polygonzuges ein flussnahes Festpunktfeld ausgelegt, in dem sich die Totalstation während der späteren Messung stationieren konnte.

Das Tracking erfolgte aufgrund der engen räumlichen Gegebenheiten in Abschnitten von bis zu 100 m Länge. Da die Messingenieure aufgrund des weichen



Abb. 11: Datenerfassung im trockengelegten Flussbett

Bodens im Flussbett zum Teil bis zu 50 cm tief einsanken, waren regelmäßige Personalwechsel zur Erholung notwendig. Abb. 11 zeigt die Messung im Flussbett sowie das trackende Tachymeter Leica TS15i auf der Kaimauer.

Die Datenerfassung selbst wurde innerhalb von 10 Stunden abgeschlossen. Dieser vergleichsweise große Zeitraum war wesentlich durch den Transport des Systems in das Flussbett und aus dem Flussbett heraus sowie die bodenbedingte langsame Fortbewegung bestimmt. Im Rückblick auf alle bisher mit diesem System durchgeführten Projekte war bei dieser Messung der größte Zeitbedarf pro Kilometer zu verzeichnen.

Abb. 12 zeigt einen Ausschnitt der mit dem kinematischen ProScan erfassten Natursteinmauer sowie die Kaimaueroberkante in der Orthogonalansicht.

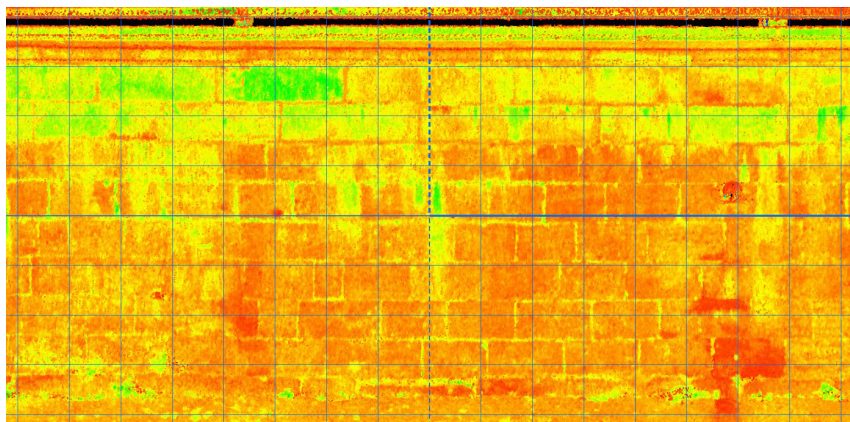


Abb. 12: Punktwolke der gescannten Natursteinmauer

Es ist gut zu erkennen, dass trotz des sehr unebenen Untergrundes keinerlei Verzerrungen in der Punktwolke zu verzeichnen sind und die Auflösung nicht von der eines statischen Scans zu unterscheiden ist. Aufgrund der linienhaften Erfassung des Objektes, wie sie bei kinematischen Scansystemen üblich ist, besitzt die erfasste Punktwolke sogar eine deutlich gleichmäßigere Auflösung als sie mit standpunktgebundenen Scans möglich ist.

Die Auswertung der Daten erfolgte nach bekanntem Schema, indem die Scandaten zunächst vermascht und anschließend gegen eine Referenzfläche verglichen wurden, die parallel zur Kaimauer aufgespannt wurde. Hierzu kam die Software 3DReshaper zum Einsatz, die große Datenmengen, wie sie mit terrestrischen Scannern erzeugt werden, effizient verarbeiten kann.

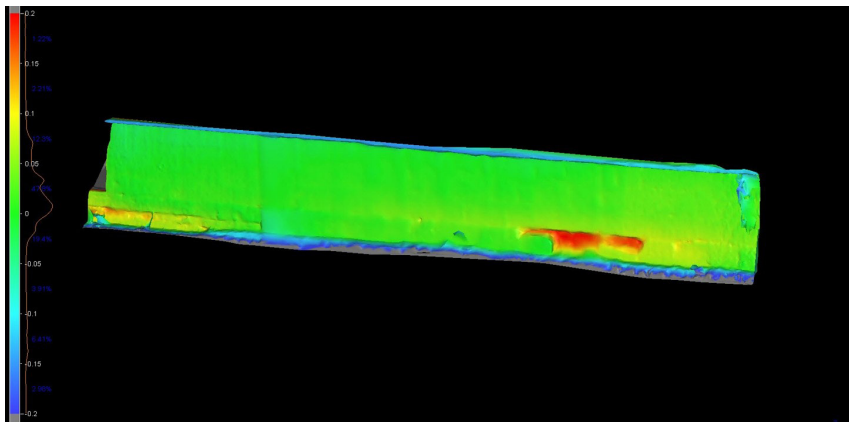


Abb. 13: Differenzbild zur ebenen Wand

Das Resultat eines auf diese Weise durchgeführten Soll-Ist-Vergleiches ist in Abb. 13 zu sehen. Auf Grundlage dieser einfachen Auswertung können bereits das Ausbruchvolumen berechnet sowie erste Sanierungen der Kaimauer geplant und die relevanten Wandflächen ermittelt werden.

In nachfolgenden Epochen soll dann das während dieser Nullmessung erfasste Oberflächenmodell als Referenz für Veränderungen zum Einsatz kommen. Vorteilhaft wirkt sich hierbei das nun vorhandene Festpunktfeld aus, welches das Datum auch für zukünftige Epochen liefert.

Testmessungen, die durch das vor Ort vorhandene Tachymeter reflektorlos durchgeführt wurden, ergaben, dass das Leica ProScan System in der Lage ist, selbst unter sehr schwierigen Randbedingungen Punktwolken mit einer inneren Genauigkeit von deutlich besser als 10 mm zu erfassen.

4 Zusammenfassung

Die Entwicklung des modernen Laserscannings zeigt wie schon bei den Technologien Tachymetrie und GNSS in Richtung bewegter – sprich kinematischer – Sensoren und Sensorsysteme.

Unter Berücksichtigung verschiedener Rahmenbedingungen können kinematische Messsysteme mit Hilfe trackender Totalstationen reale Scangenaugigkeiten am Objekt in einer Bandbreite zwischen 3 mm und 10 mm erzielen.

Im Gegensatz zum terrestrischen Scanning, bei dem die Genauigkeit der Punktwolke durch die Wahl der Scannerstandorte und Positionierung der Zielmarken nicht unerheblich vom Fachwissen des Messingenieurs vor Ort abhängt, gelingt die Messung mit kinematischen Systemen selbst Mitarbeitern mit geringem Vorwissen.

Hinsichtlich der Auflösung besitzen Mobilsysteme ohnehin deutliche Vorteile gegenüber statischen Scannern, da der linienhafte Erfassungsvorgang für eine gleichmäßige Verteilung der Punkte entlang des gesamten Objektes sorgt. Die longitudinale Auflösung kann bei kinematischen Scansystemen direkt vom Benutzer vor Ort durch die Bewegungsgeschwindigkeit des Systems beeinflusst werden.

Es bleibt festzustellen, dass Anwendungsbereiche, die bisher als ausschließliche Domäne statischer Scanner galten, inzwischen auch problemlos mit Hilfe von hochproduktiven kinematischen Scansystemen erfasst werden können.

Ob der Einsatz eines solchen Systems finanziell lukrativ ist, hängt wesentlich von den durch den Auftraggeber vorgegebenen zeitlichen Restriktionen und der Größe und Struktur des zu erfassenden Objektes ab.

Literatur

- Dorndorf, A.; Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I.; Hesse, C.: Validierung und Kalibrierung eines TLS-basierten Multi-Sensor-Systems. In: Luhmann/Müller (Hrsg.), Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D Tage 2015, Wichmann Verlag, Berlin, 2015, S. 85–98.
- Ehm, M.; Hesse, C.: Entwicklung eines kinematischen Laserscansystems für Anwendungen im Schiffbau. In: Tagungsband der Go-3D-Konferenz 2012 in Rostock, S. 31–36.
- Hesse, C.: Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. Dissertation. Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, Nr. 608, München, 2008.
- Hesse, C.; Cieslik, B.; Weltzien, K.: Hochpräzise Bestandsdatenerfassung des A7 Elbtunnels. In: Luhmann/Müller (Hrsg.), Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D Tage 2016, Wichmann Verlag, Berlin, 2016, S. 42–49.

- Hesse, C.; Vennegeerts, H.: Referenzierung kinematischer Laserscansysteme mit IMU und Tachymeter. In: DVW e. V. (Hrsg.): Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunftsfelder. DVW-Schriftenreihe, Band 75/2014, Wißner-Verlag, Augsburg, 2014.
- Kersten, T.; Lindstaedt, M.; Mechelke, K.; Omelanowsky, D.; Prenting, J.: Low-Cost- vs. High-End-Systeme im Vergleich – 3D Aufnahmen der Ringwallanlage Lembecksburg auf der Nordseeinsel Föhr. In: Luhmann/Müller (Hrsg.), Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D Tage 2016, Wichmann Verlag, Berlin, 2016, S. 150–161.
- Kutterer, H.; Paffenholz, J.-A.; Vennegeerts, H.: Kinematisches terrestrisches Laserscanning. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008). DVW-Schriftenreihe, Band 54/2008, Wißner-Verlag, Augsburg, 2008.
- Neitzel, F.; Neumann, I.: Scanning in Motion – Kinematisches TLS mittels mobiler Plattformen. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning (TLS 2013). DVW-Schriftenreihe, Band 72/2013, Wißner-Verlag, Augsburg, 2013, S. 89–106.
- Reiterer, A.; Dambacher, M.; Maindorfer, I.; Höfler, H.; Ebersbach, D.; Frey, C.; Scheller, S.; Klose, D.: Straßenzustandserfassung in Submillimeter. In: Luhmann/Müller (Hrsg.), Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D Tage 2013, Wichmann Verlag, Berlin, 2013, S. 78–85.
- Saal, K.: High-End Laserscanning unter der Elbe. In: Leica Reporter 72, The Global Magazine of Leica Geosystems. Leica Geosystems, Heerbrugg, 2015, S. 22–25.
- Schäfer, T.: Flächenhafte Deformationsmessungen an Betonoberflächen unter Berücksichtigung der Interaktion Laserstrahl/Objektoberfläche. In: Luhmann/Müller (Hrsg.), Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D Tage 2011, Wichmann Verlag, Berlin, 2011, S. 160–167.
- Stricker, M.: Mobile Mapping – Erfassung des Fahrbahnaufbaus durch Bodenradar. In: Luhmann/Müller (Hrsg.), Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D Tage 2015, Wichmann Verlag, Berlin, 2015, S. 113–120.

Kontakt

Christian Hesse | Kay Weltzien | Andreas Stromhardt
 Dr. Hesse und Partner Ingenieure
 Veritaskai 6, 21079 Hamburg
christian.hesse@dhpi.com
kay.weltzien@dhpi.com
andreas.stromhardt@dhpi.com

Session 4 – Anwendungen und Zukunftsfelder

Vermessung und Visualisierung von Tatorten zur Verifizierung von Zeugenaussagen

Benjamin Kleppe

1 Organisation und Aufbau

Das Sachgebiet (SG) 45.2 – Tatortvermessung – des LKA NRW ist die zentrale Einsatzunterstützungsstelle zur Vermessung und Visualisierung von Tat- und Einsatzorten. Spezielle Technik ermöglicht Messungen und digitale Tatortsicherungen, die über die regelmäßigen Möglichkeiten der örtlichen Polizeibehörden hinausgehen.

Angefordert wird die Tatortvermessung insbesondere bei schwerwiegenden Delikten und Großschadenslagen zur optischen und messtechnischen Sicherung der Tat-/Ereignisortsituation, z. B. durch Schussrichtungsbestimmungen, Sichtfeldbestimmungen, Darstellungsgrößenberechnungen fotografierter/videografierter Tatverdächtiger.

1.1 Eingesetzte Technik

Die vorgehaltene Technik des SG 45.2 besteht im Wesentlichen aus einem Z+F 5010C Laserscanner (Abb. 1), einer Spheron Scenecam Panoramakamera (Abb. 2), sowie kalibrierten Digitalkameras (Canon 5D und Nikon D3s) und entsprechender Auswertesoftware für Punktwolken (Leica Cyclone und Z+F Laser Control) und Photogrammetrie (Elcovision 10).

Darüber hinaus wird eine Reihe von speziellem Zubehör vorgehalten, um das Einsatzspektrum der o.g. Geräte so breit wie möglich zu streuen. So kann die beschriebeneameratechnik beispielsweise über einen pneumatischen Teleskopmast im Einsatzfahrzeug bis zu einer Höhe von sieben Metern eingesetzt werden (Abb. 3).

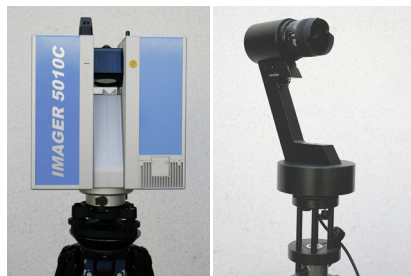


Abb. 1: Laserscanner Z+F 5010C Abb. 2: 360°-Panoramakamera

1.2 Arbeitsablauf

Auf Anforderung der örtlichen Polizeibehörden werden in Abstimmung mit den ermittelnden Dienststellen verschiedene Produkte erstellt. Die eingesetzte Technik richtet sich nach dem zu erstellenden Produkt, der örtlichen Situation und den Besonderheiten des Deliktes. So wird i. d. R. bei Innentatorten und Vermessungsprodukten der Laserscanner bevorzugt eingesetzt und ggf. durch photogrammetrische Aufnahmen ergänzt. Bei Außentatorten, insbesondere mit großer Ausdehnung, findet die Photogrammetrie Einsatz – ggf. aus dem Hub-schrauber oder einem UAS (Unmanned Aerial System).



Abb. 3: Scanner auf Mast

Geht es darum die optischen Eindrücke im Rahmen der Verfahrens mit Personen zu teilen, die sich keinen Eindruck am Tatort machen konnten (Mitglieder der Ermittlungskommission, Staatsanwaltschaft, Richter, Verteidigung) oder Umstände zu bewerten, so wird das 360°-Panoramasystem eingesetzt.

2 Sachverhaltsbeispiel

- Eine Streifenwagenbesatzung erhält einen Einsatz. Frau X gibt an, dass der von ihr getrennt lebende Ehemann Y ihre Wohnung nicht verlassen will (Einsatzstichwort „Hausfriedensbruch“).
- Beim Eintreffen stellen die Polizeibeamten fest, dass die Wohnungstür offen steht.
- Während Polizeikommissar A die Wohnung betritt, steht Polizeikommissar B noch vor dem Gebäude und funkt mit der Einsatzleitstelle.
- Plötzlich sind zwei Schüsse zu hören.
- Die Person Y liegt tot im Küchenbereich der Wohnung.
- Weitere Kräfte werden herangezogen, der Tatort und vorhandene Spuren gesichert (u. a. Fingerabdruck-, serologische, Fußabdruck- und Eindruckspuren, verschiedene Arten von Auf-/Abrieb, sonstige aufgefundenen Stoffe, etc.).
- Die Kriminalpolizei beginnt mit den Ermittlungen.
- Die Tatortvermessung des LKA NRW wird angefordert.
- Nach Absprachen mit den zuständigen Ermittlern vor Ort ist der Tatablauf zunächst nicht zweifelsfrei zu erkennen. Der Tatort soll vermessen werden.

Der Laserscanner wird eingesetzt. Es werden 27 Einzelscans in Farbe angefertigt.

- Insgesamt dauert der Einsatz des Laserscanners am Tatort etwa fünf Stunden. Der Laserscanner braucht mit der Einstellung Auflösung High, Qualität Low und Kolorierung etwa zehn Minuten pro Standort. Der Rest der Zeit wird benötigt zum Standortwechsel, zur Vorregistrierung und zum erneuten Starten.
- Die Vorregistrierung am Gerät durch Verschiebung der einzelnen Scans auf dem Display des Scanners an die richtige Position hat den Vorteil, dass später im Büro die Beziehung und Position der Einzelscans nicht aufwendig und ohne direkten Bezug zum Tatort rekonstruiert werden muss. Die tatsächliche Registrierung kann sofort durchgeführt werden. Auch das Fertigen einer sonst erforderlichen Handskizze ist entbehrlich.
- Die benötigte Zeit pro Scanstandort richtet sich bei farbigen Scans stark nach den Lichtverhältnissen. Bei Sonnenschein im Außenbereich reichen oft fünf Minuten, wobei in einer wenig beleuchteten Wohnung bis zu zehn Minuten eingeplant werden müssen.
- Zurück im Büro werden die Scans registriert, gefiltert und gefärbt.
- Die Art der Registrierung richtet sich nach den örtlichen Verhältnissen und der Arbeitsweise. Bei einer Vielzahl von Scans mit großer Überlappung lässt sich oft eine Punktwolke-zu-Punktwolke- („Cloud to Cloud“) Registrierung durchführen, bei der die Position der Scans zueinander durch den Vergleich von Gemeinsamkeiten der jeweiligen Punktwolken festgestellt wird.
- Ebenfalls findet in der Praxis die Nutzung von Zielmarken statt, da auch hier ein exaktes und verlässliches Registrieren möglich ist.
- Neben automatischen Filterprozessen ist auch ein manueller Filterungsprozess notwendig, da an jedem Tatort durch spiegelnde Flächen Fehlpunkte entstehen. Gegenstände wie Spiegel, Fernseher, Fenster und Glasflächen und auch feuchte/nasse Flächen erzeugen durch die Reflektion Fehlmessungen.
- Diese Spiegelungen können mit verschiedenen Filterfunktionen bearbeitet werden. Es ist zum einen möglich diese Punkte zu löschen oder auch mit einer speziellen Funktion auf die spiegelnde Fläche zu übertragen.
- Die Kolorierungsfunktion ist ein hauptsächlich automatisch ablaufender Prozess, bei dem ein Panoramabild erzeugt wird und jeder Messpunkt die entsprechende Farbe des Panoramabildes an der richtigen Stelle bekommt.
- Der ermittelnden Behörde wird zeitnah ein Orthofoto ([Abb. 4](#)) sowohl elektronisch wie auch in Papierform zur Verfügung gestellt.
- Bei dem Orthofoto handelt es sich um eine perspektivfreie, maßstabsgetreue Projektion der Messpunkte auf eine bestimmte Ebene. In unserem Fall wird i. d. R. auf die Fußbodenebene projiziert.
- Das gesamte Scanprojekt wird der Behörde im Original zur Verfügung gestellt, inklusive einer Software zur Betrachtung und zur Durchführung



Abb. 4: Orthofoto des Tatortes

einfacher Messungen, so dass die ermittelnde Behörde auch selbstständig mit den Scandaten arbeiten kann.

- In Rahmen der Ermittlungen wird der Polizeikommissar A vernommen. Er gibt an, die Wohnung durch die offene Tür betreten zu haben, seine Aufmerksamkeit sei direkt in Richtung Schlafzimmer gelenkt worden. Dort auf dem Bett befand sich die Anruferin und sagte ihm mit lauter Stimme, er solle den Kerl gefälligst rausschmeißen.
- Unmittelbar darauf habe er von links jemanden schreien hören: „Hau hier ab, sonst mach ich dich fertig.“ Als er sich umdrehte, habe er einen Mann gesehen, der eine Waffe in der Hand hält und auf ihn zielt. Er habe daraufhin die Dienstwaffe gezogen und zweimal geschossen.
- Der Mann sei zu Boden gegangen. Gleich danach sei Polizeikommissar B hereingekommen. Nachdem man sich davon überzeugt habe, dass keine Gefahr mehr besteht, habe man Maßnahmen zur Ersten Hilfe/Wiederbelebung erfolglos eingeleitet. Der Mann sei bereits tot gewesen.
- Die Ermittlungen ergaben, dass sich zum Zeitpunkt der Schussabgabe insgesamt vier Personen in der Wohnung befanden. Die Anruferin X, der getrennt lebende Ehemann Y, ein Freund des Ehemannes Z sowie der Polizeibeamte A.
- Der Getötete Y wies eine Schussverletzung im Bereich des Oberkörpers auf. Auf dem Boden befand sich eine größere Menge Blut. In der Wand hinter dem Getöteten befand sich ein Einschussloch, im Fernsehgerät ist ein Durchschussdefekt zu erkennen.
- Zunächst wird eine Schussrichtungsbestimmung auf Basis des Einschusses in der Wand und des Durchschusses im Fernseher erstellt, um den Standort des Polizeibeamten während der Schussabgabe rekonstruieren zu können.
- Die Auswertesoftware *Z+F Laser Control Forensic Tools* des Laserscanner verfügt über eine zusätzliche Möglichkeit der Auswertung von Laserdaten. Es handelt sich um ein Tool zur Schussrichtungsbestimmung und ein Tool zur Blickwinkelbestimmung.
- Zunächst werden in den registrierten Laserscans die Punkte für den Einschuss und den Durchschuss markiert. Mit Hilfe des Tools kann jetzt eine Linie mit variabler Länge und Durchmesser erzeugt werden ([Abb. 5](#)).
- Die Zeugenvernehmung der Ehefrau sowie des Freundes der getöteten Person belasten den Polizeibeamten.
- Die Ehefrau gibt an, ihr getrennt lebender Mann habe gar keine Waffe in der Hand gehalten, der Polizist habe auf einen Unbewaffneten geschossen. Sie habe gesehen, wie er seine Pistole gezogen hat und zweimal auf ihren Mann schoss.
- Der Freund des Getöteten gibt an, von seinem Sitzplatz auf dem Sofa keine direkte Sicht auf den Getöteten gehabt zu haben. Er könne nicht gesehen haben, ob dieser eine Schusswaffe hatte oder nicht.

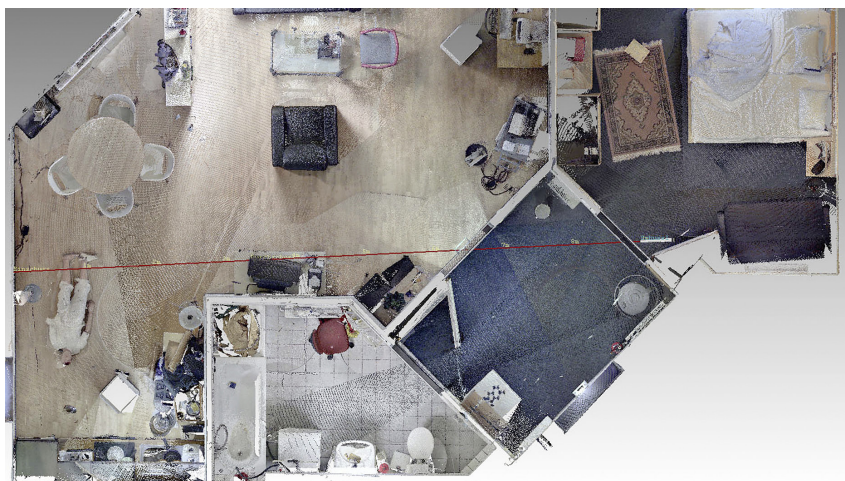


Abb. 5: Laserscan mit Schusslinie

- Die Tatortvermessung wird nun beauftragt, die Blickwinkel der beiden Zeugen zu rekonstruieren, um deren Aussagen zu überprüfen. Der Auftrag ergeht nach Durchführung der Zeugenvernehmung Tage nach der Tat.
- Mit Hilfe der Forensic Tools werden Dummys an den jeweiligen Aufenthaltsorten der Personen zur Tatzeit platziert. Für die Rekonstruktion der Blickrichtung ist es erforderlich, dass die Blickhöhe, also die Höhe der Augen in der jeweiligen Situation, bekannt ist.
- Die entstandene Schusslinie gibt in Verbindung mit der Aussage der Polizeikommissare A und B einen Hinweis auf den Standort des Polizeibeamten zum Zeitpunkt der Schussabgabe. Dieser befand sich etwa im Flurbereich der Wohnung zwischen der Tür zum Wohnzimmer und der Tür zum Schlafzimmer (Abb. 6).
- Die Auswertung der Blickrichtung der Ehefrau lässt Zweifel an ihrer Aussage zu, da sie den Polizeibeamten zum Zeitpunkt der Schussabgabe gesehen haben kann, jedoch eine Sicht auf den im Küchenbereich befindlichen Ehemann nicht möglich war (Abb. 7 und Abb. 8). Eine Angabe, ob dieser bewaffnet war oder nicht, war ihr nicht möglich.
- Die Aussage des Freundes, er habe von seiner sitzenden Position auf dem Sofa nicht sehen können, ob der Freund eine Waffe hatte oder nicht, kann auch bezweifelt werden (Abb. 9 und Abb. 10).
- Auch eine vereinfachte Ausarbeitung auf Basis des Orthofotos, aus der die Blickrichtungen der einzelnen Personen hervorgehen, ist möglich (Abb. 11).
- Nach dem Abschluss der Ermittlungen entscheidet nun die Staatsanwaltschaft, ob es zu einer Anklageerhebung kommt oder nicht. In solchen Verfah-



Abb. 6: Schusslinie und Dummy am Standort des Polizeibeamten



Abb. 7: Blickwinkel der Ehefrau im Orthofoto eingefärbt



Abb. 8: Blickwinkel aus der Perspektive des konstruierten Dummy



Abb. 9: Blickwinkel des Freundes im Orthofoto eingefärbt



Abb. 10: Blickwinkel aus der Perspektive des konstruierten Dummy

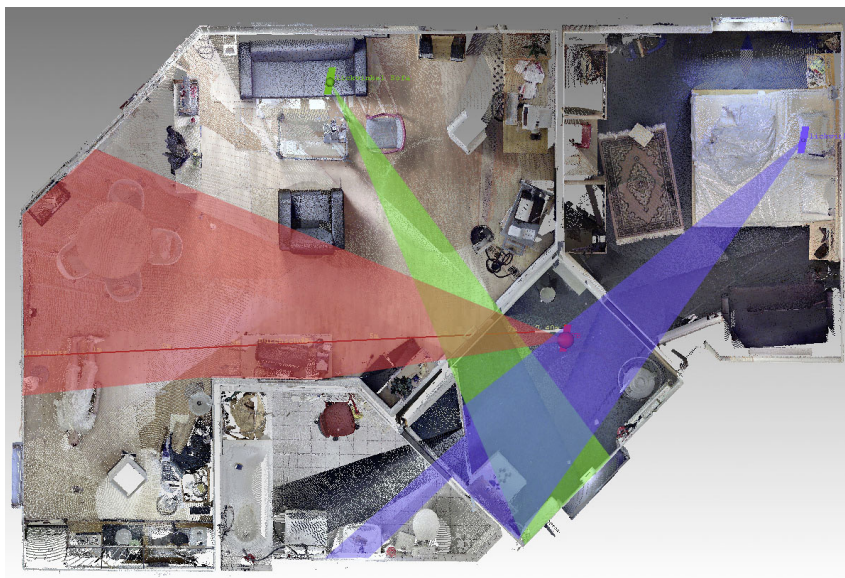


Abb. 11: Durch Einföhrung verdeutlichte Sichtbereiche der anwesenden Personen

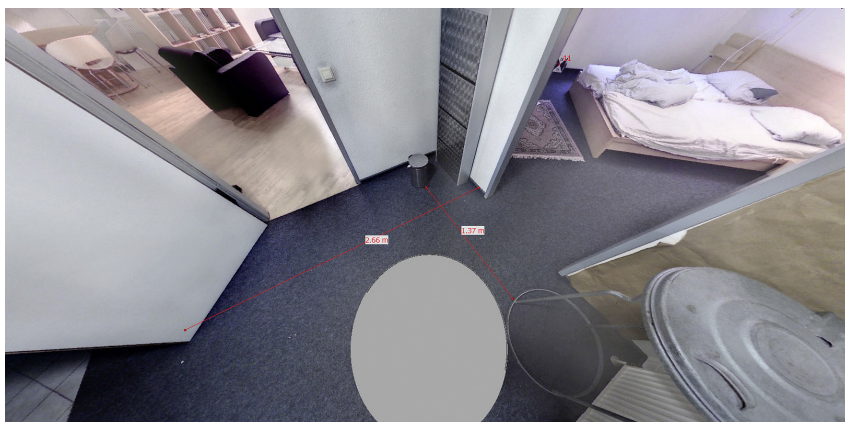


Abb. 12: Perspektivische Darstellung mit Messlinien

ren spielen die örtlichen Verhältnisse nicht selten eine Rolle. So kommt oft die Frage auf, ob es zum Einsatz der Schusswaffe eine Alternative gegeben hätte. Mit Hilfe des Laserscans kann z. B. die Frage, ob eine Distanz- oder Standortveränderung die Bedrohung für den Polizeibeamten beendet hätte u. U. noch im Gerichtssaal beantwortet werden.

- Durch die Betrachtungssoftware und das Projekt können Distanzen im Scan direkt gemessen werden (Abb. 12), so dass eine Tatortbegehung nicht notwendig wird, die zwangsläufig zu einer Verlängerung des Gerichtsverfahrens im Ganzen führen würde.

3 Fazit

Die Messergebnisse und Darstellungen der Tatortvermessung des LKA NRW haben der sachbearbeitenden Dienststelle wesentlich geholfen, sowohl Personal als auch Sachbeweise im Zuge von Vernehmungen zu verifizieren. Diese Daten finden regelmäßig Verwendung im Rahmen der durchgeführten Strafverfahren vor Gerichten.

Kontakt

Benjamin Kleppe
Stellv. Sachgebietsleiter, Kriminalhauptkommissar
Landeskriminalamt NRW, SG 45.2
Völklinger Straße 49, 40221 Düsseldorf

Einsatz von Laserscannern in der Hochdurchsatzphänotypisierung

Stefan Paulus | Tino Dornbusch

1 Einführung in die sensorgestützte Phänotypisierung von Pflanzen

Die Entwicklung neuer, hochertragreicher Nutzpflanzen ist von hoher Priorität, da einerseits verfügbare Anbauflächen weltweit zurückgehen, andererseits die Weltbevölkerung steigt. Zudem ändert sich das Klima weltweit, dies stellt einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor für die landwirtschaftliche Primärproduktion dar.

Traditionell dauert die Entwicklung neuer Kulturpflanzensorten bis zur Marktreife mehrere Jahre bis Jahrzehnte. Ein wichtiger Schritt dabei ist die Bewertung und Selektion potentiell interessanter Genotypen, die weitestgehend von geschultem Fachpersonal durchgeführt werden. Dieser Prozess ist sehr aufwendig und wird daher auch als „phänotypischer Flaschenhals“ bezeichnet. Gelingt es, den Einsatz sensorgestützter Messsysteme für die züchterische Selektion weiter voranzutreiben, kann speziell in frühen Selektionsphasen mit höherem Durchsatz geprüft und vielversprechende Linien züchterisch weiterbearbeitet werden.

Bei der sensorgestützten Phänotypisierung liegt ein besonderes Augenmerk auf der hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung, mit der Pflanzen aufgenommen werden, da die frühzeitige Erkennung negativer bzw. positiver Effekte Arbeit, Zeit und Geld spart. Auf Labor-, Gewächshaus- und Feldebene kommen hochauflösende Sensoren bereits zum Einsatz, die täglich große Datenmengen produzieren. Die Speicherung und Verarbeitung dieser Daten stellt einen weiteren und wichtigen Aspekt des phänotypischen Flaschenhalses dar. Große Datenmengen von mehreren Gigabytes müssen täglich automatisiert analysiert und evaluiert werden, um aus den aufgenommenen Rohdaten züchtungs- und phänotypisch relevante Parameter (z. B. Biomasse, Pflanzenhöhe) zu berechnen.

So lassen sich die technischen Ziele der Pflanzenvermessung auf eine hochauflösende und sensorübergreifende Abbildung der pflanzlichen Struktur, automatisierte Analyse und die Fusion verschiedener Sensoren zu einem vielschichtigem Abbild von Geometrie, Funktion und zeitlicher Entwicklung zusammenfassen. In den letzten Jahren haben dreidimensionale (3D) Messverfahren verstärkt Einzug in die sensorgestützte Phänotypisierung gehalten. Hier

wollen wir einige Praxisbeispiele von Multi-Sensorsystemen beschreiben und die Herausforderungen an die Datenverarbeitung herausarbeiten und bewerten.

2 3D-Phänotypisierung auf Labor- und Feldebene

2.1 3D-Technologien

Obgleich Messverfahren, die Objektoberflächen dreidimensional vermessen und im Computer abbilden können, in der Industrie schon seit den 90iger Jahren eingesetzt werden, sind Anwendungen im Bereich der Pflanzenphänotypisierung erst in den letzten zehn Jahren entwickelt und in wissenschaftlichen Studien eingesetzt worden. Dabei sollte man beachten, dass Pflanzen im Gegensatz zu technischen Objekten eine komplexe, fragile Geometrie haben, die sich auch dynamisch durch Wachstumsvorgänge verändert. Dies erschwert die Anwendung von 3D-Messverfahren.

Im Labormaßstab haben Kaminuma et al. (2004) zum ersten Mal beschrieben, wie man die Oberflächenstruktur von *Arabidopsis* dreidimensional vermessen und daraus relevante Blattphänotypen ableiten kann. Dabei kam das Lasertriangulationsverfahren zum Einsatz. Dornbusch et al. (2012) haben dieses Verfahren und die damit verbundene Auswertung für Hochdurchsatz optimiert und angewendet, um Blattstreckungswachstum und -bewegung von einzelnen *Arabidopsis*blättern mit hoher räumlicher ($<0,1$ mm) zeitlicher (10 min) Auflösung zu vermessen (Abb. 1). Mit einem handgeführten Triangulationslaserscanner haben Paulus et al. (2014a) erstmals Getreidepflanzen gemessen. Die Handführung mittels eines Gelenkarmes ermöglicht eine weitestgehend verdeckungsfreie Abbildung der Oberfläche und eine Analyse der Einzelorgane,

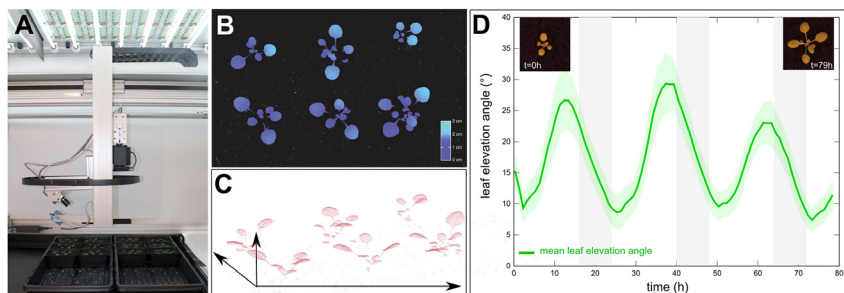


Abb. 1: (A) Laserscanner in LemnaTec Scanalyzer HTS; (B) Höhenskaliertes Bild von *Arabidopsis* als primärer Output des Laserscanners; (C) aus Höhenbild berechnete 3D-Punktwolke; (D) Blattbewegung im 24-h-Rhythmus von *Arabidopsis* aus 3D-Primärdaten von Dornbusch et al. (2014) mit LemnaGrid berechnet.

wie Blatt, Stängel und Ähre. Diese Scans besitzen Auflösungen von weniger als 0,5 mm und dienen als Referenz für Messungen mit niedriger aufgelösten Sensoren z. B. Structure-from-Motion Ansätzen (Rose et al. 2015).

Auf Gewächshausebene haben Sirault et al. (2013) am High Resolution Plant Phenomics Centre in Canberra, Australien, ein innovatives Verfahren etabliert, mit dem sich auch größere und komplexere Pflanzen dreidimensional vermessen lassen. Dabei kommen 3D-Laserscanner und die Fusion mit 2D-Bilddaten zum Einsatz. Dieses Messsystem ist an ein Gewächshaus angeschlossen, aus dem man automatisiert viele 100 Pflanzen pro Tag vermessen und auswerten kann.

Mit dem Schritt von kontrollierten Bedingungen im Labor ins Gewächshaus kommt man den natürlichen Wachstumsbedingungen näher. Jedoch müssen für ein ganzheitliches Verständnis von Pflanzenwachstum und Ableitung von Phänotypen für züchterische Selektion Erkenntnisse auf Feldebene gesammelt werden. In den letzten Jahren sind verschiedene mobile und stationäre Systeme etabliert worden (z. B. Drohnen, Traktoren und Kräne), die Pflanzenoberflächen dreidimensional vermessen können.

2.2 Analyse

Wie schon gezeigt, ist die Ableitung von relevanten geometrischen Parametern/Phänotypen aus 3D-Primärdaten ein wichtiger Aspekt für die züchterische Bewertung von Sorten. Eine solche Analyse kann man sowohl auf 2D- als auch auf 3D-Daten aufsetzen. Der primäre Output von Lasertriangulationsverfahren ist eine 3D-Punktwolke (Abb. 1c). Eine typische Darstellung dieser Punktwolke ist ein 2D-höhenskaliertes Bild (Abb. 1b). Die Höheninformation ist im Bild durch die Farbinformation kodiert. Abb. 1d zeigt als Ergebnis, wie aus den 2D-Daten ein Winkel berechnet werden kann und wie sich dieser im Tagesverlauf ändert. Anhand dieser Methode konnten die Daten von Dornbusch et al. (2014) mittels 2D-Algorithmen in LemnaGrid berechnet werden (Abb. 1d).

Auswertungsmethoden auf 3D-Punktwolken basieren immer auf den gleichen Verarbeitungsschritten (Abb. 2). Je nach Sensor werden die Punktwolken zusammengesetzt, reduziert bzw. Ausreißer detektiert und gelöscht, Einzelteile segmentiert und die Organe dann je nach Form parametrisiert. Diese Parameter können dann in ihrem zeitlichen Verlauf beobachtet werden. Die Segmentierung

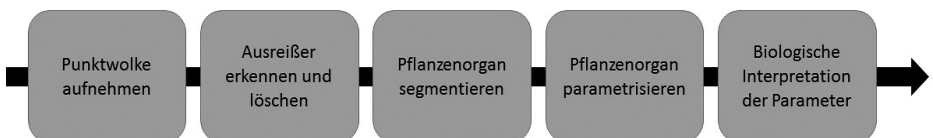


Abb. 2: Typische Verarbeitungsschritte für 3D-Pflanzendaten. Fokus der aktuellen Forschung ist die Automatisierung der Schritte „Segmentierung“ und „Parametrisierung“.

kann hierbei manuell geschehen, sowie durch Trennung anhand oberflächenbeschreibender Eigenschaften (Paulus et al. 2013) oder Zusatzinformationen wie rückgestrahlter Intensität oder Farbe. Die Parametrisierung erfolgt abhängig vom segmentierten Organ. Stängel können durch Approximation von Zylindern beschrieben werden, Blätter durch Dreiecksvermaschung und Ähren durch Berechnung der konvexen Hülle oder des Alpha Shape Volumen.

3 Integration in Multi-Sensorsysteme auf Feldebene

Wie erwähnt, ist eine der großen Herausforderungen die Übertragung der Erkenntnisse aus dem Labor und Gewächshaus auf die Feldebene. Dazu bedarf es geeigneter Trägersysteme, die verschiedenste Sensoren mit hoher Genauigkeit über dem Feld positionieren und die Struktur und Funktion der Pflanzen innerhalb der sich überlappenden Struktur aufnehmen. Solche Trägersysteme können



Abb. 3: Links und Mitte: Fotos der 100 m × 10 m Anlage in Rothamstadt UK. Zu sehen ist das Kransystem mit Sensorbox und die Feldaufteilung in Miniplots. Rechts: Sensorbox mit verschiedenen Sensoren, wie z.B. Laserscanner, RGB Kamera, Fluoreszenzkamera, IR Kamera und anderen Sensoren

Kranplattformen sein, wie sie in Rothamstadt (UK) erstmalig aufgebaut wurden (Abb. 3). Diese können komplexe Sensorkombinationen tragen, hochgenau positionieren, erlauben einen Betrieb unabhängig von klimatischen Bedingungen, sind weltweit verfügbar und verlässlich einsetzbar.

Aktuelle Systeme befahren Feldgrößen zwischen 100 und 200 m Länge und 10 bis 20 m Breite und tragen bis zu 750 kg Nutzlast. Typisch sind die Nutzung verschiedener Hyperspektralkameras (Wellenlängenbereiche: 380–1.000 nm und 900–2.500 nm), RGB-Kamerasysteme (Auflösung bis zu 28,8 MPixel), Laserscanner und Fluoreszenzsensoren, deren Daten mit Metainformationen aus diversen Umweltsensoren angereichert werden. Große Datenmengen von ca. einem Terabyte sind dabei typisch und stoßen mit Vergrößerung der Felder und Erhöhung der zeitlichen Auflösung oft an die Grenzen der verfügbaren Bandbreite und Speicherkapazität für die produzierten Daten (Abb. 4).

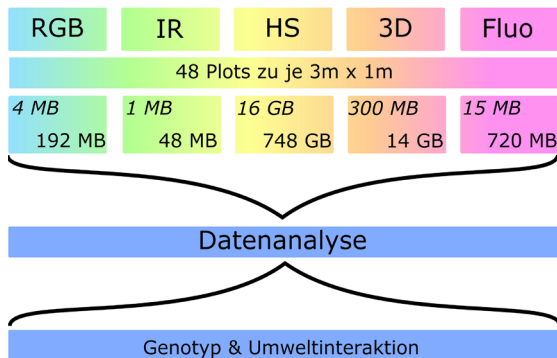


Abb. 4:

Datenaufkommen eines 100 m × 10 m Feldsystems. Das Feld ist dabei in 48 Plots zu je 3 m × 1 m eingeteilt. Den größten Anteil der Daten nimmt die Hyper-spektralkamera (748 GB) auf, gefolgt vom 3D-Laserscanner (14 GB) und der Fluoreszenzkamera (0,7 GB).

Für die Laserscanner eines solchen Systems gelten besondere Anforderungen, denn es ist neben einem großen Messbereich von bis zu einem Meter auch eine sehr hohe Auflösung von bis zu 0,25 mm gefordert. Nur so können z. B. die Ähren von Getreidepflanzen aufgenommen und parametrisiert werden, um Ernteprognosen der Neuzüchtungen zu erstellen. Marktübliche Laserscanner nutzen zudem oft rote Laser (~660 nm), deren Wellenlänge im photosynthetisch aktiven Bereich der Pflanzen bzw. des Chlorophylls liegen und demzufolge stark absorbiert werden. Spezielle Laserscanner für die Vermessung von Pflanzen nutzen nahinfrarot (NIR) Laser (~800 nm), deren Wellenlänge gut von der pflanzlichen Oberfläche reflektiert wird.

4 Anforderungen an die Analyse von 3D Felddaten

3D-Laserscans auf Feldebene bergen große Herausforderungen an Messbereich und Auflösung der Sensoren. Aber auch die Analyse der 3D-Felddaten ist nicht vergleichbar mit 3D-Aufnahmen aus dem Labor.

Während einzelne Pflanzen sich recht leicht manuell trennen lassen, um Trainingsdaten, z. B. für Machine Learning, zu generieren, lassen die großen Punktwolken eines Feldes dies nicht zu (Abb. 5). Weiterhin ist die Generierung von Referenzdaten zur Evaluierung geeigneter Analyseverfahren sehr aufwendig. Referenzkörper für Pflanzen lassen sich aufgrund der radiometrischen Eigenschaften des pflanzlichen Gewebes nur schwer erzeugen (Paulus et al. 2014b).

Maschinelles Lernen beschreibt die Nutzung von Wissen aus Erfahrung und beinhaltet Algorithmen zur Klassifikation, wie z. B. Support Vector Machines (SVM), Neuronale Netze (NN), Regression oder Boosted Trees. Die Algorithmen gliedern sich in überwachte Lernmethoden und unüberwachte Methoden. Erstere nutzen einen Lernprozess durch Trainingsdaten, um die Gesetzmäßigkeit von Klassenunterschieden zu erkennen (Abb. 6). Unüberwachte Methoden

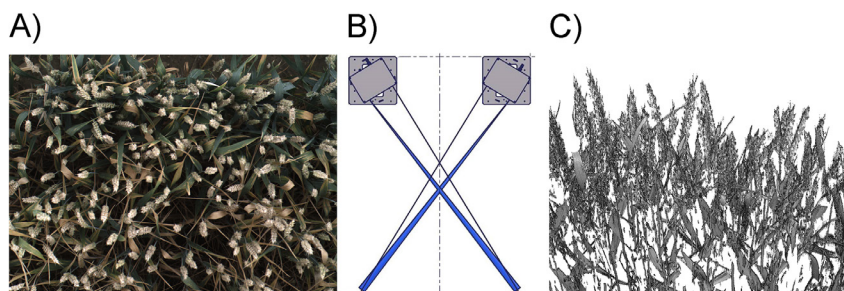


Abb. 5: (A) Winterweizen im Stadium der Milchreife, (B) Setup der 3D-Laserscanner im Stereoverbund, (C) 3D-Punktwolke der Laserscannerdaten mit X, Y, Z und Intensitätswerten.

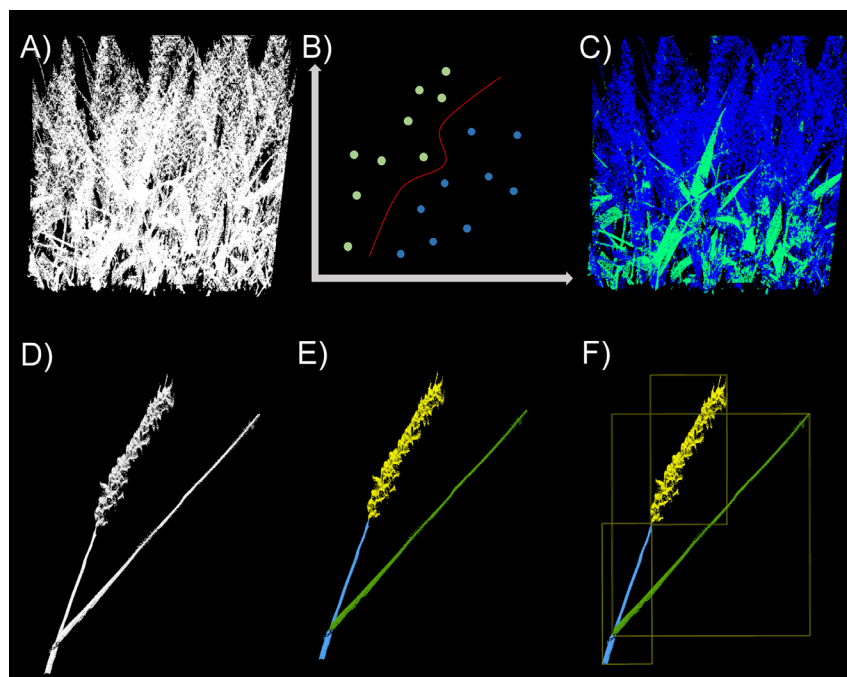


Abb. 6: Klassifikation von Pflanzendaten: (A) zeigt die XYZ-Punktwolke eines Weizenscans. Durch Nutzung von Algorithmen aus dem Bereich des Maschinellen Lernens (B) wird eine Trennfunktion für die Unterscheidung zwischen Blatt und Stängel/Ähreeneigenschaften gelernt. Das Ergebnis dieser Trennung ist in (C) abgebildet. Das gleiche Verfahren kann auf der Einzelpflanzenskala angewendet werden und zeigt in (D-E) die Klassifikation von Ähre/Stängel und Blattpunkten. (F) zeigt die Abmessungen der Einzelklassen zur abschließenden Parametrisierung.

suchen Muster in den Daten, um daraus eine Zugehörigkeit abzuleiten. Eine gängige Methode ist das Clustern der Daten. Hier kann die Nutzereingabe auf die Eingabe der Klassenanzahl reduziert werden.

In der Datenanalyse für Pflanzen wurden SVM zur Erkennung von Klassen in hyperspektralen Daten mit dem Ziel eingesetzt, Trockenstress zu erkennen, bevor es im sichtbaren Bereich der Daten zu erkennbaren Schäden kommt (Behmann 2015). Clustering wurde von Wahabzada et al. (2015) benutzt, um die Organe einer Weinrebe innerhalb einer Punktwolke zu identifizieren.

Die Algorithmen arbeiten dabei nicht auf den reinen Daten, sondern auf daraus abgeleiteten Features. Ein Feature (Eigenschaft) kann dabei ein Vegetationsindex oder eine andere aussagekräftige Eigenschaft sein. Auf Laserdaten werden Oberflächeneigenschaften wie Krümmung und Ebenheit berechnet. Wichtige und oft genutzte Features sind dabei Surface Feature Histogramme (Paulus et al. 2013). Eine Anwendung auf Feldebene ist in [Abb. 6](#) gezeigt.

5 Schlussfolgerung

3D-Messsysteme sind in den vergangenen Jahren zur Messung der Geometrie auf Feldebene etabliert worden. Neben der Nutzung einfacher robuster Parameter, wie des Volumens eines Pflanzenbestandes oder Höhenkarten, lassen sich aufgrund der hohen zeitlichen Messauflösung geeignete Wachstumskinetiken abbilden. Wie im Fall von Weizenpflanzen, lassen sich unter der Voraussetzung, dass zu analysierende Objekte sichtbar sind, auch die Organe der Pflanze auf Feldebene vermessen. Hierbei kann man auf Methoden aus dem Bereich des Maschinellen Lernens zurückgreifen, um so die verschiedenen Teile der Pflanze effizient zu segmentieren. Diese Segmente können z. B. durch eine Vermaschung approximiert werden. Daraus lassen sich Parameter ableiten, die Eigenschaften der Pflanze bzw. des Organs, z. B. Volumen oder Ausdehnung, mit hoher Genauigkeit wiedergeben.

Die Entwicklung der 3D-Auswertung steht aktuell noch am Anfang, ist nun aber mit der Verfügbarkeit von hochpräzisen Messplattformen möglich. Es ist demzufolge bald mit dem breiten Einsatz hochauflösender 3D-Sensoren und der Verfügbarkeit von effizienten Analysemethoden mit großen Erfolgen in der feldbasierten Überwachung von Wachstumsvorgängen auf Feldebene zu rechnen. Somit werden sich in Zukunft die Auswahlverfahren für Feldzuchtanwendungen beschleunigen und Know-How aus dem Forschungsbereich in die breite Anwendung fließen.

Literatur

- Behmann, J. (2015): Detektion von Pflanzenstress in hyperspektralen Bildern im Nahbereich. In: DGPF Jahrestagung, Vol. 24, Köln.
- Dornbusch, T.; Lorrain, S.; Kuznetsov, D.; Fortier, A.; Liechti, R.; Xenarios, I.; Fankhauser, C. (2012): Measuring the diurnal pattern of leaf hyponasty and growth in *Arabidopsis* – a novel phenotyping approach using laser scanning. *Functional Plant Biology*, 39: 860–869.
- Dornbusch, T.; Michaud, O.; Xenarios, I.; Fankhauser, C. (2014): Differentially Phased Leaf Growth and Movements in *Arabidopsis* Depend on coordinated Circadian and Light Regulation. *Plant Cell*, 26: 3911–3921.
- Kaminuma, E.; Heida, N.; Tsumoto, Y.; Yamamoto, N.; Goto, N.; Okamoto, N.; Konagaya, A.; Matsui, M.; Toyoda, T. (2004): Automatic quantification of morphological traits via three-dimensional measurement of *Arabidopsis*. *The Plant Journal*, 38: 358–365.
- Paulus, S.; Dupuis, J.; Mahlein, A.-K.; Kuhlmann, H. (2013): Surface feature based classification of plant organs from 3D laserscanned point clouds for plant phenotyping. *BMC Bioinformatics* 14:238.
- Paulus, S.; Eichert, T.; Goldbach, H.E.; Kuhlmann, H. (2014b): Limits of Active Laser Triangulation as an Instrument for High Precision Plant Imaging. In: *Sensors*, 14: 2489–2509.
- Paulus, S.; Schumann, H.; Kuhlmann, H.; Léon, J. (2014a): High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analysing growth of cereal plants. *Bio-systems Engineering*, 121: 1–11.
- Rose, J.C.; Paulus, S.; Kuhlmann, H. (2015): Accuracy Analysis of a Multi-View Stereo Approach for Phenotyping of Tomato Plants at the Organ Level. In: *Sensors*, 15: 9651–9665.
- Sirault, X.; Fripp, J.; Paproki, A.; Guo, J.; Kuffner, P.; Daily, H.; Li, R.; Furbank, R. (2013): PlantScan: a three-dimensional phenotyping platform for capturing the structural dynamic of plant development and growth. In: 7th International Conference on Functional–Structural Plant Models, 75.
- Wahabzada, M.; Paulus, S.; Kersting, K.; Mahlein, A.-K. (2015) Automated interpretation of 3D laserscanned point clouds for plant organ segmentation. In: *BMC Bioinformatics* 16:248.

Kontakt

Stefan Paulus | Tino Dornbusch
LemnaTec GmbH
Pascalstraße 59, 52076 Aachen
stefan.paulus@lemnatec.de
tino.dornbusch@lemnatec.de

„3D marine surveying“ – Laserscanning beim Bau und Refit von Superyachten

Markus Schäfer

1 Einführung

3D marine surveying ist eine Arbeitsgemeinschaft der Unternehmen Hanack und Partner sowie der Wrede Consulting GmbH mit dem Ziel, größtmögliche Synergieeffekte für die Kunden beim Bau und Refit von Superyachten zu erzielen.

Hanack und Partner hat als großes Vermessungsbüro langjährige Erfahrungen im Bereich 3D-Laserscanning und der Modellierung und Wrede Consulting als Paint Consultant und Dienstleister rund um den Neubau und das Refit von Superyachten (Abb. 1).

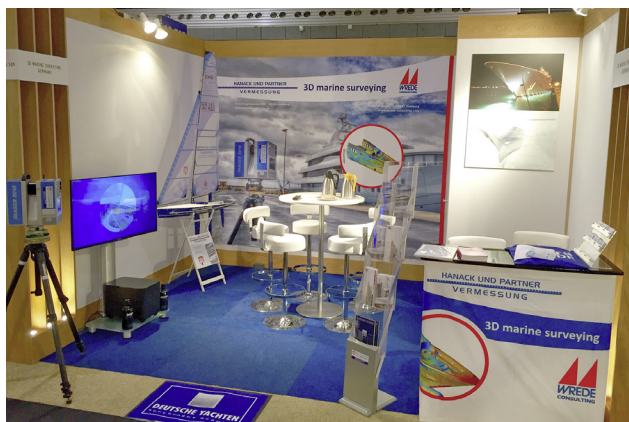


Abb. 1:
3D marine surveying – Messeauftritt
Mets Trade Amsterdam

Egal wie gut das Design ist, wie sorgfältig Schiffsbauer arbeiten, Realität bedeutet Veränderungen im eigentlichen Prozess des Bauens. Dies sind z. B. Verzerrungen durch unvorhergesehenen Verzug beim Schweißen mit Ausdehnen oder Zusammenziehen des ganzen Rumpfes von mehreren Zentimetern.

Während des Baus ändert sich die Geometrie des Schiffes ständig. Einmal abgeschlossen, unterscheiden sich alle seine Dimensionen von denen in der Konstruktionszeichnung. Die Außenhaut kann Beulen zeigen und die Grundlagen für die Schalentüren oder „GFK bulwarks“ entsprechen nur vage den Abmessungen

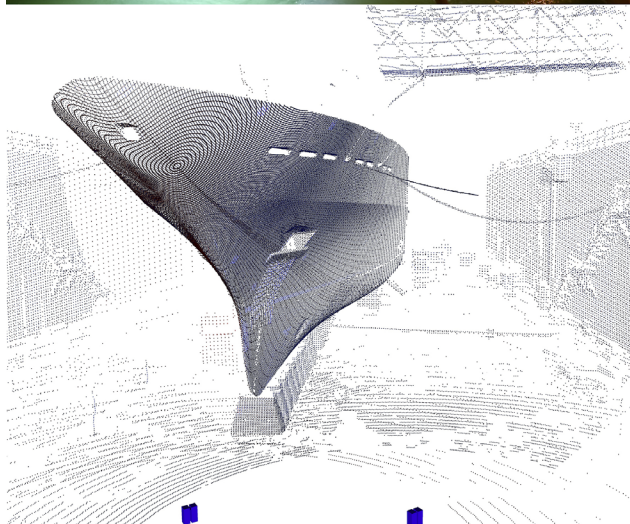


Abb. 2:
3D-Laserscan einer
Superyacht-Punkt-
wolke

wie im Computerdesign angegeben. Die Stärken des terrestrischen Laserscanings bestehen vor allem darin, schnell ein sehr detailliertes und vollständiges Abbild der Wirklichkeit zu erstellen (Abb. 2).

Der Mehrwert der Laserscannerinformation kann bei der Erfassung von Schiffsrümpfen und Ausbauten klar herausgestellt werden:

- Vollflächige Beweissicherung
- Schnelle Ableitung von Soll-Ist-Vergleichen
- Grundlage für ein Ist-Modell des Schiffes zur weiteren Verwendung für Fahr-simulationen oder Energieverbrauchsberechnungen

Bei der Kontrolle von Superyachten geht es neben der Qualität auch um eine schnellstmögliche Datenerfassung, da es bei etwaigen Abweichungen vom Design um eine zeitnahe Klärung der Dimensionen dieser Abweichungen geht. Ein langer Baustillstand ist für die Werften unter allen Umständen zu vermeiden.

Für kommerzielle Schiffe stellt dies in der Regel keine Probleme dar und ist relativ unbedeutend. Für Yachten jedoch können die Auswirkungen solcher Fehler verheerend sein. Überschreiten die Abweichungen vom Design das Spiel der genau spezifizierten Bauteile, so sind oft teure Nacharbeiten die Folge.

Der Einsatz moderner 3D-Messtechnik und die daraus resultierende passgenaue Herstellung von Bauteilen und Sonderkonstruktionen im Schiffsbau kann die Optimierung des Bauablaufes auf den Werften unterstützen.

2 Superyachten

Wann ist eine Yacht eigentlich eine Superyacht? Als gängige Größe kann man sagen: Mit einer Länge von über 60 Metern und einer besonders luxuriösen Ausstattung, wie beispielsweise Kino, Pool und Hubschrauberlandeplatz, wird eine Yacht zur Superyacht (Abb. 3). Bei den Herstellern stehen einige deutsche Werften ganz vorne. Sowohl „Azzam“ als auch „Eclipse“ wurden in deutschen Werften gebaut: erstere bei der Bremer Firma Lürssen, letztere bei Blohm + Voss aus Hamburg. Der Lürssen Konzern ist dabei Weltmarktführer für den Bau zivil genutzter Superyachten. Laut einer Internetausgabe der New York Post beliefen sich die Baukosten der Azzam auf 490 Millionen Euro.



Abb. 3:
Superyachten im
Hafen von Monaco

3 Leistungsspektrum

Wir sind in der Lage, mit dem 3D-Scan eine präzise Oberflächenbestimmung während der Bauphase und nach Fertigstellung des Rohbaus anzubieten. Dies beinhaltet die Beratung mit uns und unseren Partnern, sowie qualifizierten Gutachtern.

Der 3D-Scan (Abb. 4) ermöglicht auch eine präzise Analyse von Oberflächen vor der Beschichtung. Zusammen mit Lieferanten und Gutachtern kann der Materialeinsatz hinsichtlich Schichtdicke und Materialauswahl optimiert werden.



Abb. 4: Aufnahme, Punktwolke und NURBS-Oberfläche

Der Vergleich von Planungsdaten mit dem as-built Status ermöglicht es, spezifische strukturelle Korrekturen vor der Fertigstellung der Stahl- und Schweißarbeiten zu realisieren.

Dies bedeutet letztendlich eine geringere Schichtdicke, ein optimiertes Gewicht und geringere Kosten. Unser Leistungsspektrum umfasst:

- Durchführung von genauen Oberflächenüberprüfungen
- Grundlage für die Überwachung der Subunternehmer
- Vergleich von Planungsdaten mit dem as-built Status
- Analyse von Anbauteilen an Rumpf und Aufbauten
- Erstellung von 3D-Modellen für ältere Schiffe
- Bestimmung der idealen Dicke der Beschichtung
- Überprüfung von Sektionen und Komponenten vor der Montage
- 3D-Modelle von Maschinenräumen

3.1 Grundlagen und Erfassungsmethoden

Die Aufgaben im Schiffsbau sind vielfältig und unterscheiden sich oft in den Anforderungen und Genauigkeiten. Dies hat zur Folge, dass man neben den klassischen terrestrischen Laserscannern auch Lasertracker sowie für die Detailerfassung Handyscans oder auch mal ein UAV vorhalten muss und diese unterschiedlichen Messsysteme müssen oftmals in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden (Abb. 5). Hierfür gilt es, geeignete Messabläufe und Softwaretools bereitzuhalten.

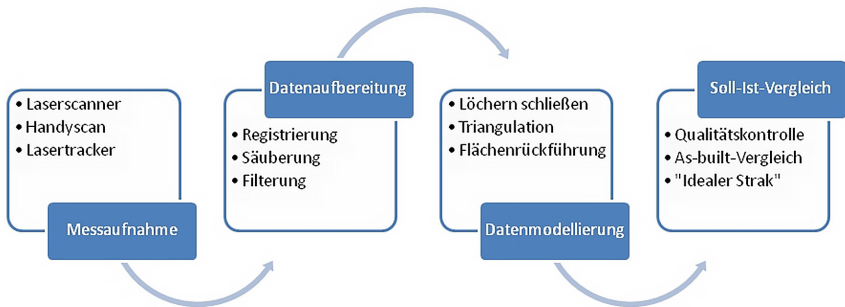


Abb. 5: Workflow 3D-Schiffsvermessung

Grundlage der Schiffsvermessung ist ein schiffsfestes Koordinatensystem nach DIN 81 209-1. Hierbei befindet sich der Ursprung des Achssystems lotrecht in der Mitte des Schiffes am Kielende (Abb. 6). Die Achsen verlaufen wie folgt:

- Die x-Achse verläuft entlang der Längsachse des Schiffes. Die positiven Koordinatenwerte verlaufen in Richtung des Bugs, die negativen zum Heck.
- Die y-Achse verläuft entlang der Querachse des Schiffes. Die positiven Koordinatenwerte zeigen Richtung Backbord, die negativen nach Steuerbord.
- Die z-Achse verläuft entlang der Hochachse des Schiffes. Die positiven Koordinatenwerte verlaufen nach oben.

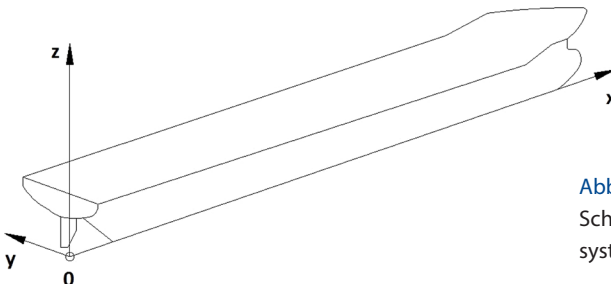


Abb. 6:
Schiffsfestes Koordinatensystem nach DIN 81 209-1

3.2 Datenverarbeitung im CAD

Die Realisierung der jeweiligen Auswertung ist zurzeit noch sehr personalintensiv. Die Vorverarbeitung besteht im logischen Ausdünnen der Daten und Schließen von Lücken. Dieses ist mit der derzeit verfügbaren Software zwar möglich, allerdings nur mit entsprechendem Aufwand. Bei der weiteren Verarbeitung wird z.B. ein 3D-Modell generiert, welches dann mit einem entsprechenden Soll-Modell verschnitten wird. Da wir beim Laserscanning von einer rasterförmigen Abtastung der Oberfläche ausgehen, werden entsprechende Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsaussagen nicht aus den Messungen selbst, sondern aus den abgeleiteten Flächenmodellen gewonnen.

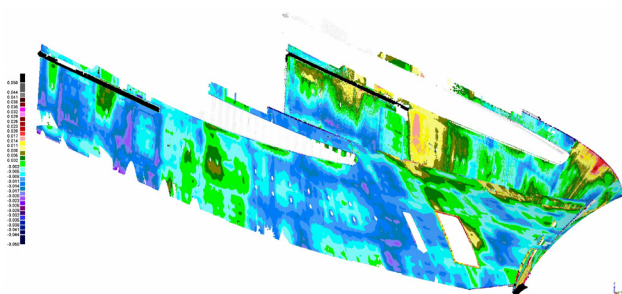


Abb. 7:
3D-Rumpf, Soll-
Ist-Vergleich als
3D-PDF

Diese Genauigkeitsbetrachtung spielt bei der weiteren Verarbeitung der Laserscannerdaten eine große Rolle. D.h. die Qualität des Flächenmodells gibt die Größenordnung für den späteren 3D-Vergleich wieder. Als Ergebnis erhält man ein 3D-PDF Dokument, welches im folgenden Beispiel die Abweichung vom „idealen Strak“ widerspiegelt (Abb. 7).

4 Anwendungsbeispiele

Bei der Aufnahme hat man immer wieder mit widrigen Bedingungen zu kämpfen. Aufgrund von starken Sichtbehinderungen durch Gerüste, Anbauten, Versorgungsteile, Abdeckungen, Folien, Baustoffe usw. kommt es zu geringen Aufnahmeentfernungen (Abb. 8). Dies hat zur Folge, dass in der Praxis mehr Standpunkte existieren als theoretisch benötigt werden. Die zusätzlichen Standpunkte führen zu einer größeren Datenmenge, was sich später beim Postprocessing zeitlich bemerkbar macht.

Neben der Erfassung von gesamten Rumpfflächen kommen immer wieder auch Fragestellungen zum Unterwasserschiff mit den Anbauteilen wie Ruder, Schraube, Stabilisatoren oder auch die genaue Vermessung der Tiefgangslinien

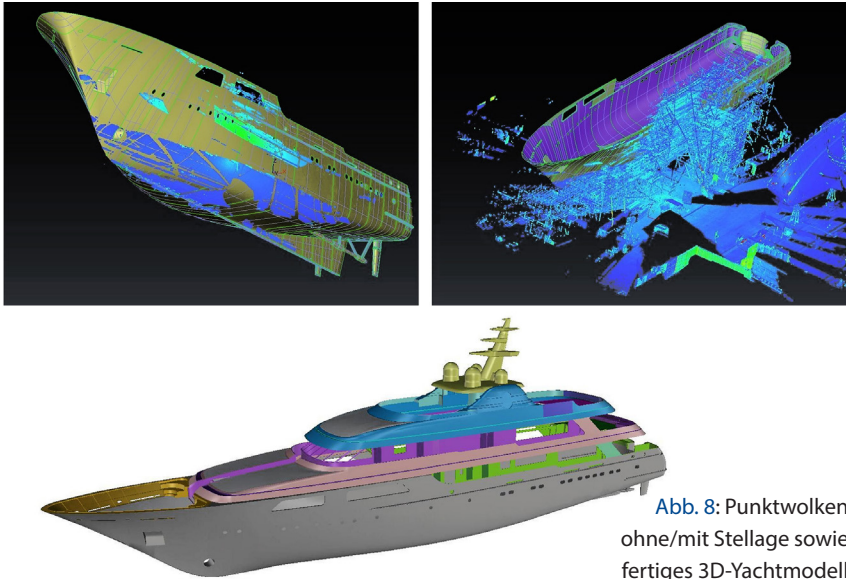


Abb. 8: Punktwolken
ohne/mit Stelage sowie
fertiges 3D-Yachtmodell

auf. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Ermittlung von Flächeninformationen der Schiffsaufbauten zur genauen Spachtelabrechnung.

Für die hochpräzise Erfassung von Rumpfoffnungen oder Fensterkonturen bei mehrfach gekrümmten Flächen sind spezielle Messabläufe entwickelt worden. Neben dem klassischen terrestrischen Laserscan mit höchsten Anforderungen an die Flächengenauigkeit kommt der „Handyscan 700“ zum Einsatz. Für die Datenverarbeitung stehen diverse kommerzielle Softwareprodukte zur Verfügung.

Nicht nur bei der Erfassung, auch an die Auswertung werden höchste Ansprüche gestellt. Die effiziente und sorgfältige Zusammenführung der einzelnen Arbeitsschritte garantiert ein hochwertiges Ergebnis mit einer geforderten Genauigkeit von ± 1 mm.

5 Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeigt, dass die 3D-Geometrierfassung und Modellierung einen wichtigen Platz in der Konstruktion und im Refit von Superyachten eingenommen hat. Trotz der teilweise widrigen Bedingungen bei der Erfassung überwiegen die Vorteile für die weiterführenden analytischen Auswertungen, wie z. B. strömungsdynamische Berechnungen oder Qualitätskontrollen (Abb. 9 und Abb. 10). Die intelligente Aufbereitung der aufgenommenen Informationen steht dabei immer im Vordergrund.

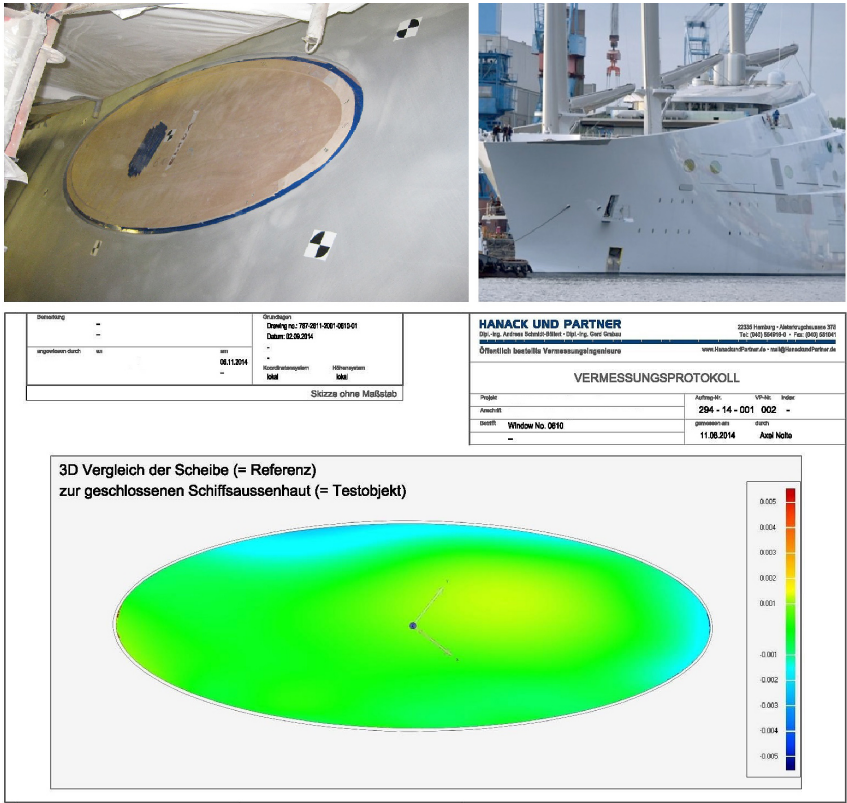


Abb. 9: Qualitäts- und Fertigungskontrolle Schiffsscheibe

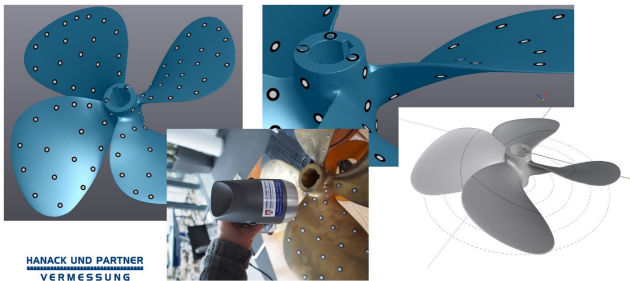


Abb. 10:
Beispiel Propeller-
bogenschnitte
mit vordefinierten
Radien

Kontakt
Markus Schäfer
Hanack und Partner, Öffentlich bestellte Vermessungsingenieure
Alsterkrugchaussee 378, 22335 Hamburg
m.schaefer@hanackundpartner.de

Comparison of 3D Model derived from UAV and TLS – The Experience at Ridracoli Dam, Italy

Giulia Buffi | Silvia Grassi | Piergiorgio Manciola | Wolfgang Niemeier

1 Introduction

Dams, bridges, viaducts, chimneys are complex shape structures and their inspection and maintenance are not simple. The identification of the state of conservation of materials is preliminary to the works of maintenance and/or of securing. It is a basic operation but that, at the same time, must not require an excessive expense of energy in term of economic and time costs. The predominant vertical nature of this type of structures does not facilitate of course the direct visual inspection of this type of structures that requires the intervention of experienced staff in climbing.

The use of the new UAV technology (Unmanned Aerial Vehicle) fits well at the photographic and video survey of complex geometry structures and with difficulty of inspection. The detection of potential ongoing process in the variation of materials mechanic characteristics is immediately and allows the accurate collocation in order to provide to the restore of the initial conditions. The non-conventional photogrammetry realizable by UAV survey allows then the three-dimensional reconstruction of the geometry of strategic structures that is of fundamental importance in the finite element modelling of this type of works. Modelling of characteristic elements – that could be possible accumulation locations of strain and stress states – is allowed only by the real reconstruction of the effective geometry. Very often in fact the executive documents differ from that has been done in the reality or sometime project documents of ancillary works are not even available. The three-dimensional reconstruction is therefore complex and it has necessary to be dependent by an ex-novo acquisition of existing structure.

The reconstruction techniques currently employ in survey of this type of structures are Laser Scanner, Total Station and GPS Station. The survey operations with this type of instruments require that the operator reaches physically every location from which it is possible the full visibility of the structure and of interest details. The transfers are difficult and they require a time expense. However the UAV survey cannot yet prescind from a valid to photographic con-

firmation by ground that allows the correct georeferencing of the model and the overlapping of the different portions of the Dense Point Cloud. Some work has employed UAV to complete the Laser Scanner survey to acquire difficult access parts [1]. Others instead have mired to the comparison of the two methods on case study of historical buildings [2] or on infrastructures like heart dams [3].

In this second field the present work wants analyse the two technologies on the case study of Ridracoli dam survey, Santa Sofia (FC), Italy. It is an arch-gravity restraint structure in simple concrete. The predominant vertical nature of the dam, the wide analysed surfaces and the contemporaneity of UAV/Laser Scanner surveys make the realized technological experience one of a kind. The survey of the totality of the structure has been done simultaneously by Laser Scanner and by UAV during two days of acquisition. The georeference of the models has been based on the acquisition of coordinates by Total Station of a redundant numbers of markers. They were applied in a stable way to the structure and to surrounding rock mass. The three-dimensional survey by Laser Scanner serves as “Reference” for the “Compared” Dense Point Cloud by UAV. The comparison by surfaces analyses characteristic elements that can represent the accuracy level of the entire model: joints zones, pulvino foundation-dam body discontinuity, rapid curvature changes, vertical surfaces and spillways.

2 Ridracoli Dam

The Ridracoli dam is an arch-gravity dam in simple concrete (height 101 m and crest length 432 m) that closes a very wide U-shaped valley in the Tuscan-Romagna Apennines in Italy [4, 5] (Fig. 1 and Fig. 2). The water supply is the reservoir primary used for 48 communities in the Ravenna, Forlì-Cesena and Rimini Provinces, and from 1989 also the San Marino Republic [6, 7]. The dam was completed in 1982 and it was filled completely for the first time in 1986 [4]. The body dam is a double curvature structure, symmetric respect to the key section, it rests on a “pulvino”, a foundation saddle [8], which extends along the entire perimeter of the excavation [9]. The body dam is made up of 27 ashlar, with an independent static operation in order to avoid the deformations of the structure as a result of increase of hydrostatic level or of temperature variation or of other actions and to avoid fissuring of the structure. The connection of the ashlar is been realized by the insertion of neoprene elements that are disposed around all the outer perimeter of the cross section and of the tunnels that cross longitudinally the dam and the foundation. They have the dual function of preventing infiltration of the water and spillage of the cement grout, used for the suture of the joint, injected radially and in subsequent times from tunnels during the construction phase.



Fig. 1: Geographical collocation of Ridracoli dam [11]

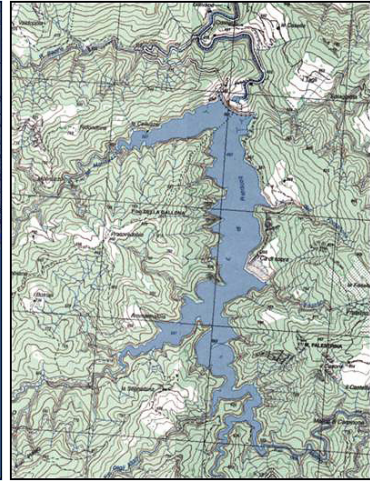


Fig. 2: Basin subtended by Ridracoli dam [10]

3 Integrated Survey System

The Ridracoli dam has been the location where an awesome comparison between traditional topographic instruments and the unconventional photogrammetry by UAV took place. The employed topographic tools have been, Total Station (TS30 Leica Geosystems), GPS Satellite Station (1230 Leica Geosystems) and Laser Scanner (Z+F 5010 Zoller Fröhlich) [12]. Two drones have flown simultaneously reducing the time of flight operations and concentrating the acquisition in a short time [13]. The drone with four helices HIGHONE 4HSEPRO has an autonomy of 18 to 30 minutes and has a Gimbal system with camera SONY Alpha 7R, 36.4 Mpix full frame, video images were acquired instead with camera LUMIX GH4 full frame (video FullHD, 1920×1080 pixels, 29 fps) [10, 13]. The application and the acquisition of a total of 226 marker of 40×40 cm² have allowed the correct georeferenced reconstruction of the structure. The markers have been placed in a stable and not invasive way on the structure, on the ancillary works and on the surrounding land.



Fig. 3: Application of marker on the upstream face



Fig. 4: Marker near a joint

The placement has followed criteria of common sense in terms of uniformity of distribution, of visibility and of identification of significant points and lines for the subsequent modeling (Fig. 3 and Fig. 4).

3.1 Terrestrial Topographic Survey

In order to georeference and validate the UAV survey the Ridracoli dam was object also of a terrestrial topographic survey. From a first topographic network marked by GPS Station and based on the pillars currently used for periodic monitoring of the dam, a secondary network has been defined on materialized points with nails driven to the ground. It has been connected to the primary network through topographic measurements. On the two networks a total of 417 points between markers and natural points of the structure and of the surrounding land were detected by Total Station TS30 in order to determine East (E), North (N) and Altitude (A) coordinates and in order to correctly georeference, then, the UAV model. The 3D model of the structure has been reconstructed by the use of Terrestrial Laser Scanner (Fig. 5). The acquiring has involved a total of 9 acquisition workstations detecting the most part of the structure surface, in Fig. 6 the areas of analysis from the acquisition positions are visible. The scans were recorded using the same marker for the georeference of the photogrammetric model by UAV in order to ensure the perfect matching of the two compared data. 53 markers have been employed to record the scans whose topographic coordinates are characterized by an average standard deviation of less than 1 cm. The results of recording scans are showed in the Tab. 1, the average values residues of targets are in all cases less than 1 cm as well as the correspondent standard deviations that do not exceed 5 mm. These values are of the same magnitude order of the accuracies and standard deviations of the topographic coordinates and therefore scans are suitable to be taken as a reference scans. Furthermore the following table shows that the maximum and minimum differences in absolute value are less than 15 mm in the three components of E, N and A, and therefore it is possible to attribute an overall accuracy to the laser scanner model of approximately 15 mm in the three components E, N and A. The laser scanner



Fig. 5: Laser Scanner 3D Model

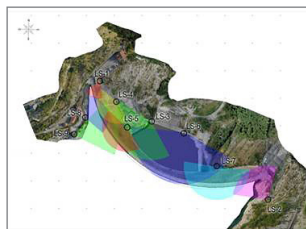


Fig. 6: Laser Scanner acquisition points

Tab. 1: Recorded residuals of scans

Laser Scan- ning	n° points (Ml)	n° georef. target	Residuals							
			Avg. value (mm)	Std. Dev. (mm)	ΔE max (mm)	ΔN max (mm)	ΔA max (mm)	ΔE min (mm)	ΔN min (mm)	ΔA min (mm)
LS-1	16	4	5	2	2	2	5	-3	-5	-3
LS-2	192	7	9	3	4	11	7	-8	-5	-8
LS-3	268	23	8	4	11	13	10	-8	-10	-14
LS-4	340	7	9	4	11	10	13	-14	-8	-4
LS-5	392	6	9	4	6	12	5	-8	-6	-9
LS-6	256	25	8	4	12	14	10	-10	-10	-11
LS-7	320	5	7	5	14	6	2	-5	-6	-3
LS-8	208	7	5	2	6	6	3	-5	-6	-4
LS-9	124	4	9	2	8	7	7	4	-2	-7

survey has been employed as a comparison and verification element of the drone analysis.

3.2 UAV Survey

Flight operations by UAV were concentrated in a single day and have aimed to cover with frames the downstream face, the upstream face until the hydrostatic level, the crowning, the dissipation basin, the right and left side including the weight blocks, the picnic area, the guard house and part of the surrounding land. 19 flights lasting 15 min/flight were altogether performed making a total of 4600 frames of 36 Mpix [14]. The shooting operations were performed remotely by a second flight attendant who evaluated the entity of overlapping frames. The post-processing of the acquired data surely occupies most of the time necessary

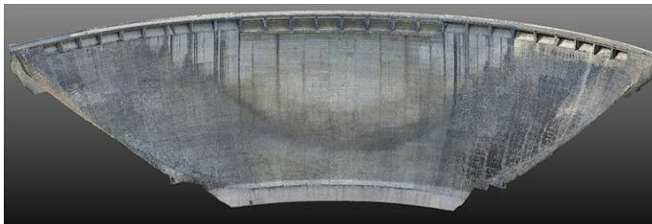


Fig. 7:
UAV 3D model

to the whole procedure. The 3D model has been realized by the technique of structure from motion (SfM), a calculation technique that allows the reconstruction of objects geometry through the automatic collimation of points from a series of photos. The reconstruction of the Dense Point Cloud in *.las* format has been made inside a SfM processing software for subsequent stages (Fig. 7). The 36 Mpix images have been included in the software and have been analyzed in order to identify the targets and their numbering.

4 Dense Point Clouds Comparison

The Dense Point Cloud model obtained by UAV has been validated on the base of the Laser Scanner survey. The Dense Point Cloud has been object of punctual analysis, on the base of the coordinates of marker and natural points acquired by Total Station, and of linear analysis, on the base of the correspondence of level curves acquired always by Laser Scanner and UAV technique. The present work explains the comparison by surfaces of the Laser Scanner scans and the

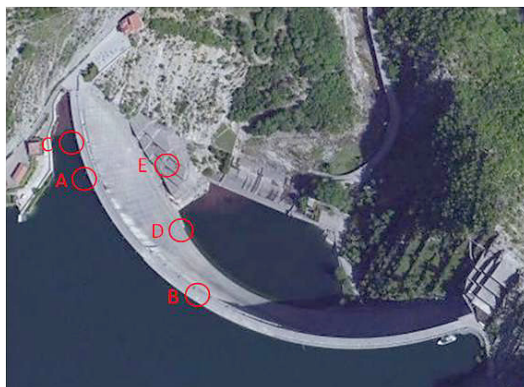


Fig. 8: Analysed specimens

Dense Point Cloud by UAV. The analysis has been place on different representative portions, vertical development zones, spillways, fast curvature changes like joints, connection of pulvino foundation-dam body and weight blocks (Fig. 8). CloudCompare® has been the work environment for the management and the evaluation of the validity of the Point Clouds. At first the interest portions have

been extracted from the Laser Scanner point cloud. From these, interpolating triangular meshes have been built. The average variances and the standard deviations between the two entities have been evaluated employing the points as Reference entities and the mesh as Compared through the Distance computation. This operation has evaluated the substantial absence of variances assigning therefore to the mesh surfaces an accuracy equal to that of Laser Scanner points of 1.5 cm (Tab. 2 columns A and B). The mesh surfaces by Laser Scanner have been then employed as, this time, Reference for the Compared Dense Point Cloud by UAV. The real comparison in fact has been the evaluation of the distances

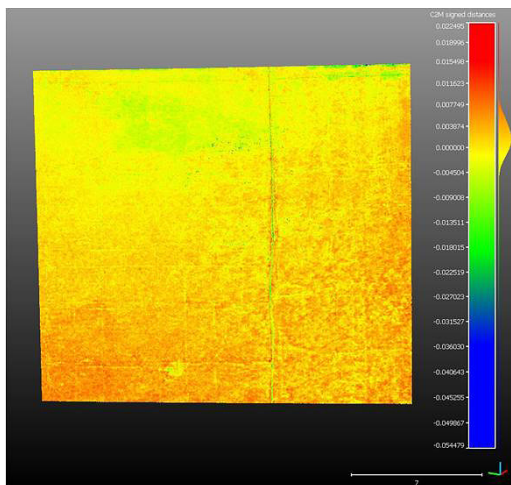
Tab. 2: Laser Scanner (points and mesh) and UAV (points) comparison

Specimen	Surface (m ²)	n° points Laser Scanner	n° points by UAV	Gap Laser Scanner Point Cloud – Laser Scanner mesh		Gap UAV Point Cloud – Laser Scanner mesh	
				(A)	(B)	(C)	(D)
				Mean (m)	Stand. Dev (m)	Mean (m)	Stand. Dev (m)
A	1186.2	3 906 276	2 569 690	0.0000	0.0001	0.0016	0.0032
B	402.3	196 006	1 240 047	0.0000	0.0001	0.0322	0.1171
C	9.5	70 048	65 306	0.0000	0.0001	0.0021	0.0048
D	23.3	46 874	122 421	0.0000	0.0001	0.0116	0.0162
E	263.8	2 260 559	611 289	0.0000	0.0001	0.0004	0.0069

between the mesh surfaces by Laser Scanner and the Dense Point Cloud by UAV. Below the analysis of different specimens taken into account are reported.

4.1 Specimen A

The A specimen presents a particularly extended surface (1186.2 m²) on the upstream face (Fig. 8) and with a prevalent vertical development, the average gap by the reference laser scanner mesh is of 0.0016 m and the standard deviation is of 0.0032 m (Tab. 2, Fig. 9 and Fig. 10).



← Fig. 9: A – Difference map:
Laser Scanner mesh – UAV
Dense Point Cloud

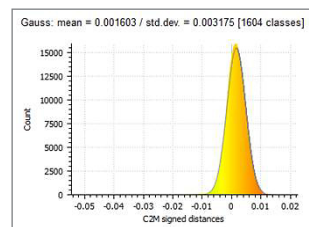
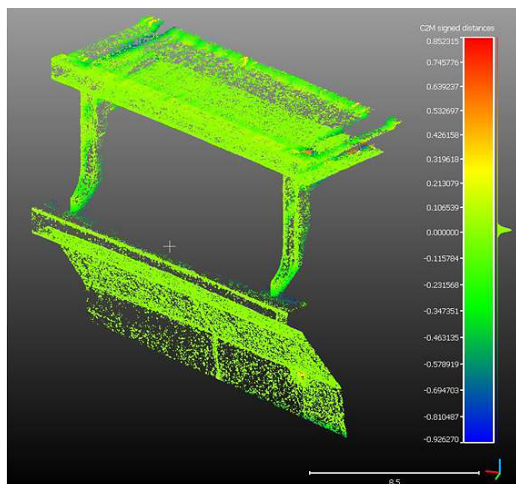


Fig. 10: A – Statistical Parameter

4.2 Specimen B

The B specimen presents a portion of the spillways light (Fig. 8). In this zone the deviation between Dense Point Cloud and the Laser Scanner mesh is slightly more evident (Fig. 11 and Fig. 12). The average gap is of -0.0322 m and the standard deviation is of 0.1171 m (Tab. 2). The points by UAV appear more disperse respect to that measured by Laser Scanner. The complex geometry analysed determinates some grey zones that reduce the Laser Scanner acquire capability.



← Fig. 11: B – Difference map:
Laser Scanner mesh – UAV
Dense Point Cloud

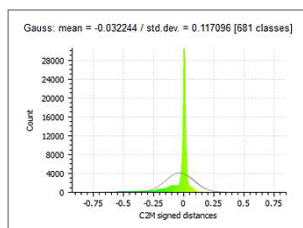


Fig. 12: B – Statistical Parameter

Therefore the less of reference information compromises in part the comparison, in fact, in this case, the UAV information is more complete. Moreover the temperature and humidity conditions of the analyzed element could have conditioned the UAV acquisition. In view of all these factors the accuracy is slightly lower respect to the other analysed portions although they are always inside the accuracy required range of the survey of this type of structures.

4.3 Specimen C

The C specimen analyses a joint zone between adjacent ashlar of the structure on the upstream face. The average gap and the standard deviation are respectively of -0.0021 m and of 0.0048 m (cf. Tab. 2 and Fig. 14 and Fig. 15). This portion explains as the UAV survey has a lower accuracy in the acquiring elements with small dimensions and characterized by curvature change in reduced spaces. However these trends are available by the detail RGB information related to the points that, in this way, allow in every case the visual individuation of charac-

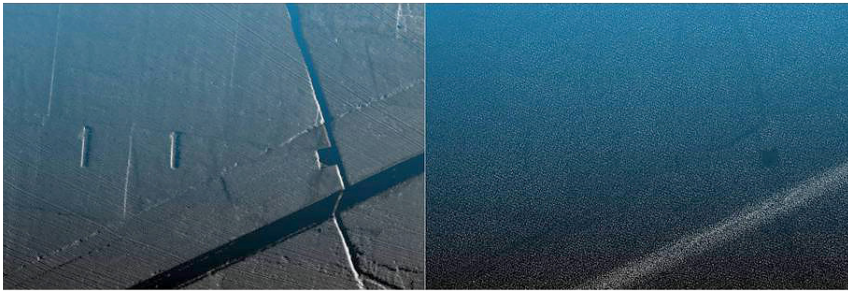
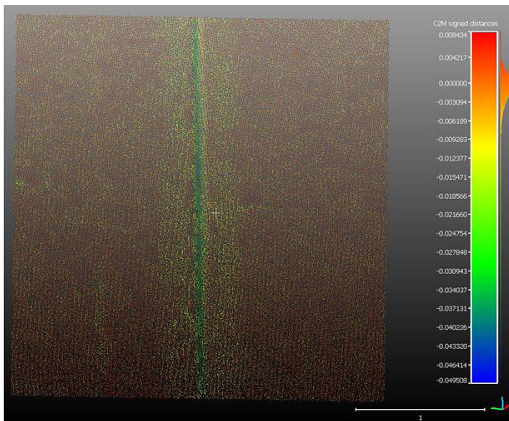


Fig. 13: RGB comparison Laser Scanner and UAV respectively



← Fig. 14: C – Difference map:
Laser Scanner mesh – UAV
Dense Point Cloud

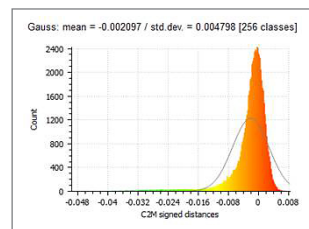
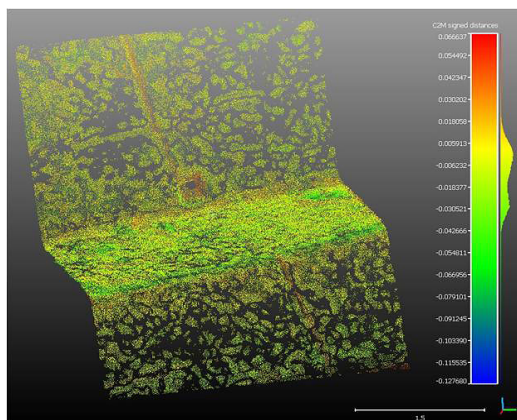


Fig. 15: C – Statistical Parameter

teristic and structural important elements. The problem is related to the average density of the Dense Point Cloud, 1 point every 9 cm^2 , that does not allow the individuation of elements that have a variations lower than the dimension of the “grid” provided by UAV. The joints shape is in every case visible by the curvatures map, having an extension of 10 cm, other than perfectly identifiable by the RGB information of the points (Fig. 13).

4.4 Specimen D

The D specimen presents the analysis of the construction joint between pulvino foundation and dam body (Fig. 8). The average gap of -0.0116 m and the standard deviation of 0.0162 m are in line with the expected values although locally, near small asperity, they differ slightly (Fig. 16 and Fig. 17). Also in this case some gray zones (pulvino foundation horizontal surfaces) reduce the acquire capability of Laser Scanner.



← Fig. 16: D – Difference map:
Laser Scanner mesh – UAV
Dense Point Cloud

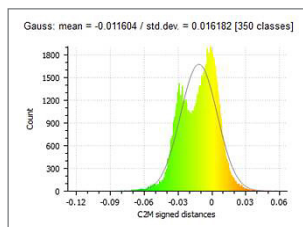
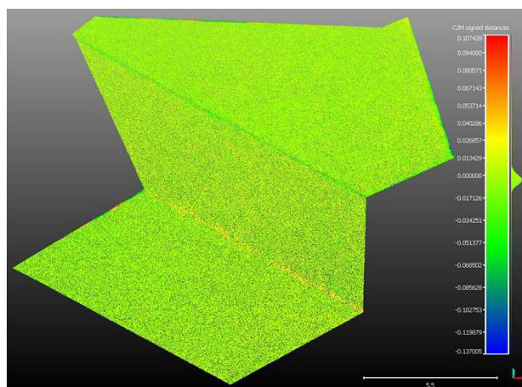


Fig. 17: D – Statistical Parameter

4.5 Specimen E

Finally the E specimen presents the analysis of a piece of the weight blocks in the left side (Fig. 8). The values of the average gap and standard deviation, respectively of -0.004 m and of 0.0069 m, in line with the expected values, attest that the UAV acquisition is performing also in the survey of ancillary works (Fig. 18 and Fig. 19). They are often portions missing of graphic drawings and therefore need of a geometry reconstruction close to reality.



← Fig. 18: E – Difference map:
Laser Scanner mesh – UAV
Dense Point Cloud

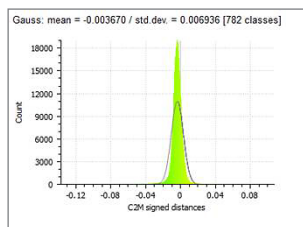


Fig. 19: E – Statistical Parameter

5 Conclusions

The UAV technique allows the detail survey of large structures. The comparison between Dense Point Clouds acquired by Laser Scanner and UAV, explained in the present work, has underlined the potentiality of the non-conventional

photogrammetry by UAV but also some aspects that have to be taken into account in order to obtain an accurate acquisition. The UAV survey cannot yet prescind from a solid topographic confirmation by ground. The application, and the identification, of 417 points between markers and natural points has allowed the correct georeferencing of the model and the centimeter accuracies. The analysis of the distances, between Laser Scanner mesh surfaces, used as Reference, and the Compared Dense Point Cloud by UAV, has highlighted some deviations. They have typically a local character and they refer to those elements of which curvature changes have an extension lower than the “grid” dimension defined by the UAV points. Moreover locally the Laser Scanner acquisition is affected by some grey zones so this less of references could influence the comparison increasing the gap with the compared UAV data, as showed in the specimens B and D. Structural characterizing elements in the three-dimensional modelling of the dam like the construction joints, the pulvino foundation discontinuity or the spillway lights are in every case detectable. Although in some zones the accuracy is a little bit lower, the shape trends are visible by the RGB information associated to the cloud points. The detail level, reached by the 4600 frames at 36 Mpix, allows the identification of the current state of conservation of the construction materials. The detection of potential problems can be discussed in a participated and shared manner by all the technicians who deal with the management, despite being very far away from the structure and in different time. The centimeter precisions of the survey allow then a three-dimensional reconstruction highly faithful to the geometry, being a thousand square meters structure. The identification of the current conservation state of the materials and the three-dimensional reconstruction of the structures are correctly allowed in a short time of acquisition. The UAV acquiring is therefore an effective and efficient technique of inspection and reconstruction of structures with wide surface development.

References

- [1] Achille, C.; Adami, A.; Chiarini, S.; Cremonesi, S.; Fassi, F.; Fregonese, L.; Taffurelli, L. (2015): UAV-Based Photogrammetry and Integrated Technologies for Architectural Applications—Methodological Strategies for the After-Quake Survey of Vertical Structures in Mantua (Italy). *Sensors* 15.7, pp. 15520–15539.
- [2] Andrews, D. P.; Bedford, J.; Bryan, P. G. (2013): A comparison of laser scanning and structure from motion as applied to the great barn at Harmondsworth, UK. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 5.
- [3] Naumann, M.; Geist, M.; Bill, R.; Niemeyer, F.; Grenzdörffer, G. (2013): Accuracy comparison of digital surface models created by unmanned aerial systems imagery and terrestrial laser scanner. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 5.

- [4] Lancini, S.; Masera, A.; Piccinelli, F. G.; Farina F. (2000): Ridracoli dam – A decision support system for managing dam surveillance. 20th Congress ICOLD, Beijing, China, Vol. 3, Q.78 – R.30, pp. 443–453.
- [5] Marini, P. P.; Baldoni, P.; Farina, F.; Cortezzi, F.; Masera, A. (2004): Ridracoli Dam: surveillance and safety evaluation reported on internet page. Long-term Benefits and Performance of Dams: Proceedings of the 13th Conference of the British Dam Society Held at the University of Kent, Canterbury, UK from 22 to 26 June 2004. Thomas Telford, pp. 247–255.
- [6] Romagna Acque Società delle Fonti Spa: Progetto di Gestione.
- [7] Romagna Acque Società delle Fonti Spa (2013): Bilancio di sostenibilità 2013.
- [8] Piccinelli, F.; Bavestrello, F.; Gallico, A. (1985): Ridracoli dam: test and data acquisition. 15th ICOLD Congress, Lausanne, Switzerland, Vol.1, Q.56 – R.73, pp. 1415–1438.
- [9] Consorzio Acque per le Province di Forlì e Cesena (1991): L'acquedotto della Romagna.
- [10] www.italdron.com.
- [11] Google Maps.
- [12] Grassi, S. (2015): Relazione Tecnica, Rilievo del corpo della diga e delle aree limitrofe mediante aeromobile a pilotaggio remoto e attività topografiche a terra di supporto. Servizio di supervisione e verifica delle modalità operative adottate dall'esecutore del rilievo e dei risultati ottenuti.
- [13] Italdron, S. p. A. (2015): Relazione Tecnica, Rilievo del corpo Diga e delle aree limitrofe mediante aeromobili a pilotaggio remoto e attività topografiche a terra di supporto.
- [14] Barberini, M. (2016): Conference Capaccio, The survey by UAV for the control and the maintenance of dams – The experience of Romagna Acque – The photogrammetric survey by UAV of Ridracoli dam, 20/01/2016.

Kontakt

Giulia Buffi | Silvia Grassi | Piergiorgio Manciola
University of Perugia, Institute of Civil and Environmental Engineering
Via G. Duranti, Perugia, Italy
giulia.buffi@gmail.com

Wolfgang Niemeier
Technische Universität Braunschweig, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Pockelsstraße 3, 38106 Braunschweig
w.niemeier@tu-bs.de

Alle Facetten des terrestrischen Laserscannings in ein Seminar aufzunehmen, gestaltet sich schwierig: Das liegt einerseits daran, dass immer genauere, effizientere und damit einhergehend komplexere Messtechniken und Algorithmen entwickelt werden. Andererseits führt dieser technische Fortschritt dazu, dass terrestrische Laserscanner in einer kaum zu überblickenden Vielfalt eingesetzt werden.

Der Fokus dieses Bandes liegt auf der Vielfalt verschiedener Anwendungen und dem enormen Potential von Laserscannern zur geometrischen Erfassung und Analyse von Oberflächen. Drei Bereiche erscheinen besonders aktuell und werden daher neben verschiedenen Grundaspekten des terrestrischen Laserscannings hervorgehoben:

- Flächenhafte Deformationsanalysen
- Umgang mit großen Datenmengen und Praxisberichte
- Anwendungen und Zukunftsfelder



ISBN: 978-3-95786-106-1



9 783957 861061

Schriftenreihe des DVW
Band 85 / 2016
Printversion: 28,80 Euro
PDF: kostenfrei
www.geodaesie.info

