

Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken?

Eine Fallstudie anhand von Laserscans einer Holzplatte und einer Staumauer

Christoph Holst, Berit Schmitz, Achim Schraven und Heiner Kuhlmann

Zusammenfassung

Zur Analyse flächenhafter Deformationen von Bauwerken auf Basis terrestrischer Laserscans stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Liegen keine Informationen über die Geometrie des gescannten Objekts vor, werden die gesuchten Deformationen oft über Vergleiche von Punktwolken, aufgenommen in zwei Epochen, herausgearbeitet. Diese Punktwolken werden entweder direkt verglichen, vorher vermascht oder aber geometrisch geglättet. Diese einzelnen Methoden sind in Standardsoftware zur Punktwolkenverarbeitung implementiert. Nach der theoretischen Betrachtung der Vergleiche werden sie anhand von zwei Beispielen näher analysiert: der Verformung und Starrkörperbewegung einer Holzplatte sowie der Verformung einer Staumauer. Es wird herausgearbeitet, dass die Punktwolkenvergleiche zur Analyse von Verformungen und Starrkörperbewegungen unter gewissen Umständen geeignet sind. Wichtig ist hierbei die Richtung der Deformation bezogen auf die Objektoberfläche: Deformationen quer zur Oberfläche sind wesentlich besser aufdeckbar als Deformationen entlang der Oberfläche. Allgemein basiert die Interpretation der Ergebnisse allerdings jeweils nur auf einer subjektiven Betrachtung von farbig dargestellten Punktwolkendifferenzen, ein statistisch fundierter Zwei-Epochentest dieser Differenzen wird nicht angewendet.

Summary

For analyzing area-based deformations of buildings based on terrestrial laser scans, several methods exist. If there is no information about the object's geometry, the deformations are analyzed in most cases based on point cloud differences revealed by scanning in two epochs. The point clouds are either compared directly, are previously meshed or they are filtered based on geometric conditions. Standard software packages include these methods. After a theoretical introduction of these point cloud comparisons, they are analyzed based on two examples: the shape deformation and the rigid body movement of a wooden plate and the shape deformation of a water dam. It is revealed that the methods are suited to analyze shape deformations and rigid body movements under certain restrictions. However, more important is the direction of deformation related to the observed surface: out-of-plane deformations are better detectable than in-plane ones. In all cases, the interpretation is only based on inspecting color-coded point cloud differences; a statistical test judging the differences between two epochs is not performed.

Schlüsselwörter: Terrestrisches Laserscanning, Deformationsanalyse, Punktwolkenvergleich, Staumauer, Zwei-Epochentest

1 Motivation

Terrestrische Laserscanner (TLS) 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 punktweisen 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 abzuleiten. Jede Punktwolke besteht zwar wieder aus Einzelpunkten, deren Positionen werden jedoch nicht vorab auf dem Messobjekt festgelegt, sondern sie ergeben sich automatisch durch die Vorgabe eines gleichabständigen horizontalen und vertikalen Winkelrasters, mit dem der Laserscanner das Messobjekt erfasst. Zwar ist die durch dieses Winkelraster vorgegebene Punktverteilung reproduzierbar, die exakte Position der Punkte auf dem Messobjekt jedoch nicht. 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 zwischen als korrespondierend angesehenen Punkten oder abgeleiteten Parametern durchzuführen, 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 und Registrierung, falls mehrere Standpunkte besetzt werden. Zwischen den Epochen müssen die Punktwolken auch wieder registriert oder georeferenziert werden, um in einem einheitlichen Koordinatensystem zu

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

Zur Beurteilung werden in dieser Studie in Kap. 4 und 5 zwei Objekte herangezogen: eine verformbare Holzplatte sowie die Brucher-Talsperre. Die Holzplatte dient dabei als synthetisches Beispiel, bei dem die Deformationen absichtlich und kontrolliert herbeigeführt werden. Hierbei handelt es sich um eine Verformung quer zur Oberfläche und eine Starrkörperbewegung entlang der Oberfläche (siehe Abb. 11 und 15). Es wird analysiert, inwieweit diese Deformationen eines Objekts abhängig von ihrer Bewegungsrichtung in Punktwolkenvergleichen ersichtlich werden und ob sich die Größenordnung der Deformation daraus (signifikant) ableiten lässt. Diese Untersuchungen helfen dabei, die tatsächlich gesuchten Deformationen der Brucher-Talsperre anhand von Punktwolkenvergleichen besser einordnen und analysieren zu können.

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

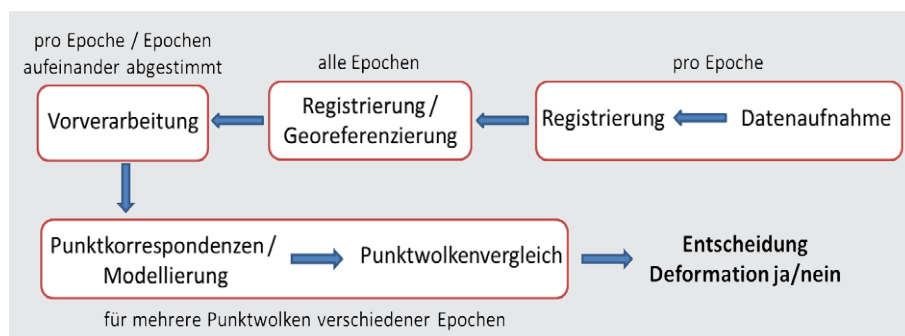


Abb. 1: Vorgehen bei der Messung und Auswertung von Deformation basierend auf terrestrischen Laserscans

werden können. In punktwolkenbasierten Modellen werden Beziehungen zwischen zwei Punktwolken, z. B. durch Koordinatentransformationen, hergestellt. 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 denjenigen Fällen, in denen 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-

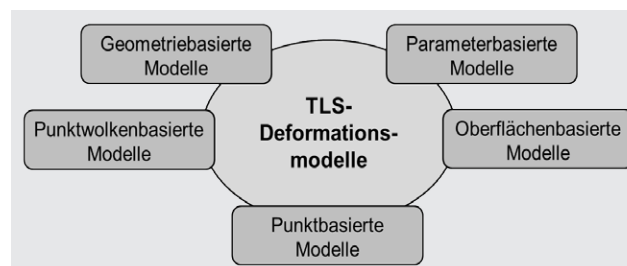


Abb. 2: TLS-basierte Deformationsmodelle

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 sind für die hier dargestellten Untersuchungen jeweils identisch. Prinzipiell soll beim Vergleich der Softwarepakete nicht die jeweilige Software im Vordergrund stehen, sondern die jeweils verwendeten Methoden zum Punktwolkenvergleich. Bei diesen Softwarepaketen stehen die folgenden Punktwolkenvergleiche zur Verfügung (siehe Tab. 1): Cloud-to-Cloud (C2C), Cloud-to-Mesh (C2M), Mesh-to-Mesh (M2M) oder Multiscale-Model-to-Model-Cloud (M3C2). Diese werden

Tab. 1: Mögliche Punktwolkenvergleiche in Standardsoftware

Software	C2C	C2M	M2M	M3C2	Approximation geometrischer Primitive
3DReshaper	X	X	X		X
CloudCompare	X	X	(X)	X	X
Geomagic Studio/Control		X	X		X

in Kap. 3.1 bis 3.4 detaillierter beschrieben. Auf die Approximation geometrischer Primitive im geometrie- oder parameterbasierten Modell, über die auch eine Deformationsanalyse durchgeführt werden kann (z.B. Holst et al. 2015), wird im Folgenden nicht weiter eingegangen.

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), ähnlich zum bereits erwähnten ICP zur Koordinatentransformation bzw. Registrierung von Laserscans. 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, rot gestrichelter Pfeil): 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

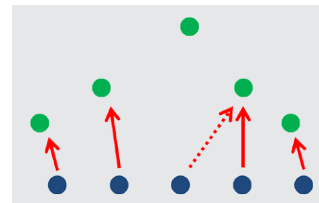


Abb. 3: C2C-Vergleich (rote Pfeile) zwischen Punktwolke aus Epoche 1 (blau) und Epoche 2 (grün) ohne lokale Modellierung

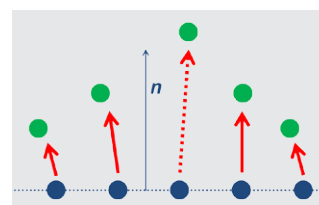


Abb. 4: C2C-Vergleich (rote Pfeile) zwischen Punktwolke aus Epoche 1 (blau) und Epoche 2 (grün) mit lokaler Modellierung

Normalenvektors (Tsakiri und Anagnostopoulos 2015), wie in Abb. 4 dargestellt. In diesem Fall wird nicht nur der absolute Abstand berechnet, sondern das Vorzeichen der Abweichung kann anhand der Richtung des Normalenvektors ermittelt werden, die wiederum davon abhängt, welche Epoche als Referenzeпоche des Vergleichs definiert wird.

Das Ergebnis dieses C2C-Vergleichs ist – wie auch das der folgenden C2M- und M2M-Vergleiche – die farbcodierte Punktwolke, wobei die Farben die Größen der Punktdifferenzen darstellen. Diese Darstellung ist rein quantitativ; es wird kein Signifikanztest durchgeführt, der die Differenzen 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 eine flächenhafte, quadratische Funktion verwendet, berechnet aus einer benutzerdefinierten Nachbarschaft oder innerhalb eines definierten Radius. 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)

Auch kann eine Vermaschung mit einer Punktwolke verglichen werden (Cignoni et al. 1998). Dabei wird der Abstand einer 3D-Vermaschung zu einer Punktwolke berechnet, indem der kürzeste Abstand eines jeden Punktes der einen Punktwolke zu den Dreiecksflächen der vermaschten Punktwolke berechnet wird (Barnhart und Crosby 2013). Laut Lague et al. (2013) kann dieser Ansatz besonders gut bei ebenen Flächen verwendet werden, bei sehr kantigen Objekten oder Punktwolken mit Datenlücken jedoch nicht.

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).

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 sollte jedoch nur bei Datenaufnahme von einem einzigen Standpunkt aus verwendet werden.

Bei einer reinen Vermaschung findet prinzipiell keine Glättung oder Rauschreduktion statt, sodass zufällige Messabweichungen zu einer erschwerten Interpretation der Punktwolkenvergleiche führen. Daher geht die Punkt-

wolkenverarbeitung bei allen Softwareprodukten in der Regel mit einer Glättung einher. So glättet CloudCompare direkt die Punktwolke, Geomagic und 3DReshaper führen (optional) 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 zu vergleichen; jedoch werden von einer der beiden Vermaschungen nur die Knoten 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. Diese stochastische Information dient auch zur Prüfung signifikanter Abweichungen beim Punktwolkenvergleich. 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 wird die Referenzpunktwolke im ersten Schritt auf eine gewisse Anzahl von Kernpunkten reduziert (Lague et al. 2013). Der Abstand der Kernpunkte und damit ihre Anzahl wird manuell vorgegeben. Durch die Bildung dieser Kernpunkte werden zufällige Abweichungen minimiert und die Rechengeschwindigkeit beschleunigt (Lague et al. 2013). Im zweiten Schritt wird für jeden Kernpunkt i ein Normalenvektor $\mathbf{n}$ berechnet. Dazu wird eine Ebene aus den Punkten geschätzt, die in einem definierten Radius $D/2$ um den Kernpunkt i liegen. Aus

den Residuen dieser Schätzung wird eine Standardabweichung $\sigma_i(D)$ berechnet, welche als Maß für die Oberflächenbeschaffenheit der Umgebung von i gilt (innere Genauigkeit). Anschließend wird der Kernpunkt i entlang des Normalenvektors n in beide Punktwolken projiziert (i_1 und i_2), wobei das Rauschen beider Punktwolken vorher durch die Schätzung lokaler Ebenen minimiert wurde, die sogleich die Projektionsebenen darstellen. Die Punktwolkendifferenz gleicht dann letztendlich der Distanz zwischen i_1 und i_2 .

Die Größe dieser lokalen Ebenen ergibt sich durch den in Abb. 5 dargestellten Zylinder mit dem benutzerdefinierten Radius $d/2$. 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

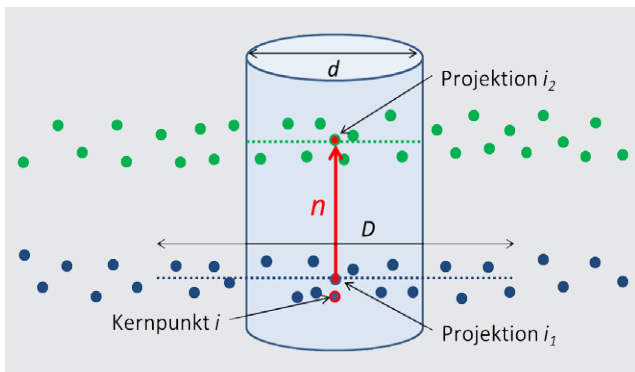


Abb. 5: Vereinfachte Darstellung der Berechnung des Punktwolkenabstandes an einem Kernpunkt (roter Pfeil) zwischen der Punktwolke aus Epoche 1 (blau) und Epoche 2 (grün) mit dem M3C2-Vergleich

genaue Beschreibung des M3C2-Algorithmus und Beispielanwendungen sind in Lague et al. (2013) ausgeführt. Das Verfahren kann den punktwolkenbasierten Modellen zugeordnet werden, da schlussendlich der Abstand zwischen zwei Punkten berechnet wird.

Das Ergebnis dieses M3C2-Vergleichs sind zum einen die eingefärbten Kernpunkte, wobei der jeweilige Farbwert die Distanz zwischen Referenz- und Vergleichspunktwolke repräsentiert. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit denjenigen der vorherigen Methoden. Zum anderen können in CloudCompare jedoch auch signifikante Differenzen, die Standardabweichung der Kernpunkte $\sigma_i(D)$ und die 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 Registrierengenauigkeit 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 Registrierengenauigkeit beliebig skalierbar. Ein stochastisch voll-

ständig fortgeplanzter Signifikanztest analog zum Zwei-Epochenvergleich punktwise Deformationen wird also nicht durchgeführt. Hierfür wäre ein vollständiges stochastisches Modell terrestrischer Laserscans notwendig, dessen Bestimmung momentan Bestandteil ingenieur-geodätischer Forschung ist (z.B. Holst und Kuhlmann 2016, Wunderlich et al. 2016).

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. Zudem wird beim M3C2-Vergleich keine Vermaschung durchgeführt, die bei sehr großen Punktwolken zu einer hohen Laufzeit beim C2M- und M2M-Vergleich führen kann.

4 Deformationsanalyse einer Holzplatte

Dieses Kapitel bespricht die TLS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von Standardsoftware anhand eines synthetischen Beispiels, bei dem Deformationen kontrolliert herbeigeführt werden: 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 ihrer spannungsfreien Lagerung schon Verformungen im Bereich von -6 mm bis $+5 \text{ mm}$, verglichen mit einer bestangepassten 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 Kapiteln näher erläutert werden:

- Untersuchung des Signifikanzbereichs zur Deformationsanalyse: Ohne Deformation der Holztafel wird

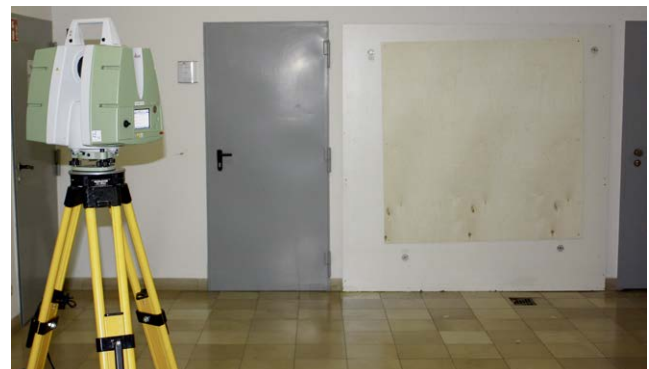


Abb. 6: Aufnahmesituation beim Scanning der unbehandelten Holztafel, die auf einem weißen Brett verschraubt ist.

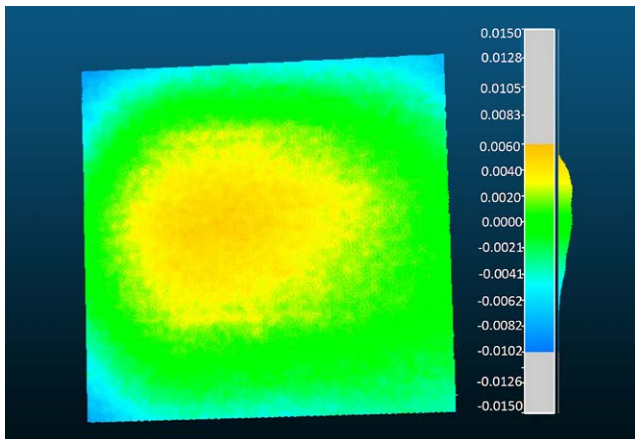


Abb. 7: Verformung der gemessenen Holztafel [m] gegenüber einer bestangepassten Ebene (dargestellt in Cloud-Compare)

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.

- Untersuchung einer Verformung quer zur Oberflächenausdehnung: 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 einem identischen Standpunkt aus gescannt.
- Untersuchung einer Starrkörperbewegung entlang der Oberflächenausdehnung: 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 basierend auf einer vollbesetzten Kovarianzmatrix der Laserscans, die hierfür nötig wäre, durchgeführt. Vielmehr werden 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 Laserscans, 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.

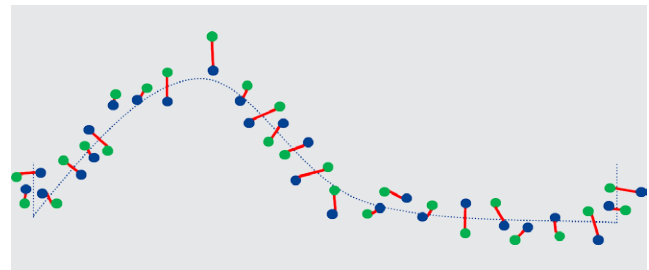


Abb. 8: Abweichungen (rot) zwischen der Punktwolke von Epoche 1 (blau) und Epoche 2 (grün) bei Messung einer Oberfläche (blau gestrichelt) in zwei Epochen ohne Deformation

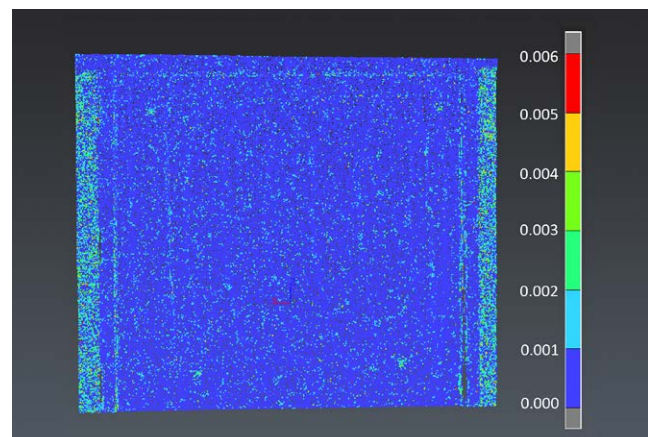


Abb. 9: C2C-Vergleich [m] ohne Deformation bei Messung von identischem Standpunkt in zwei Epochen (3DReshaper)

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, der zumindest die innere Genauigkeit der Laserscans umfasst. Abb. 9 zeigt den C2C-Vergleich bei der Messung von einem Standpunkt. Die Abweichungen sind alle positiv, da Punktabstände berechnet werden (siehe Kap. 3.1). Die Größen-

ordnung der Abweichungen auf 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

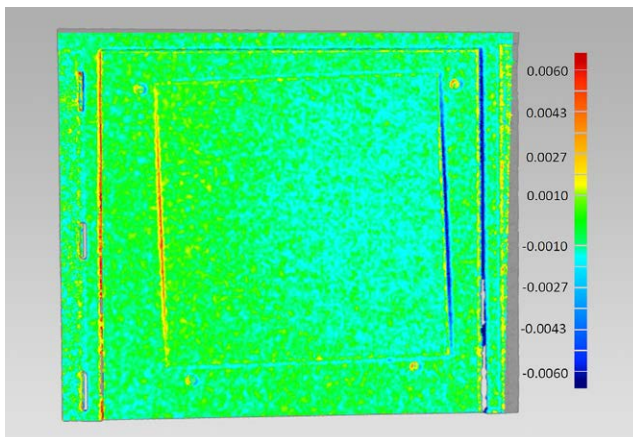


Abb. 10: M2M-Vergleich [m] ohne Deformation bei Messung von unterschiedlichen Standpunkten in zwei Epochen (Geomagic)

einer radial um 5 m 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 Zielzeichen 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 quer zur Oberfläche

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, die quer zur Oberflächenausdehnung verläuft, zeigt Abb. 11 in Anlehnung an Abb. 8. Wie zu sehen ist, treten große Abweichungen in dieser Skizze vor allem an den Positionen großer Verformung auf.

Diese theoretische Betrachtung bzgl. der Verformung 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.

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

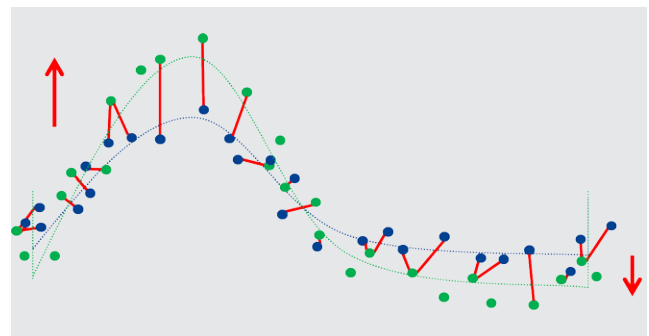


Abb. 11: Abweichungen (rot) zwischen der Punktwolke von Epoche 1 (blau) und Epoche 2 (grün) bei Messung einer Oberfläche (blau und grün gestrichelt) in zwei Epochen vor und nach einer Verformung quer zur Oberfläche (rote Pfeile)

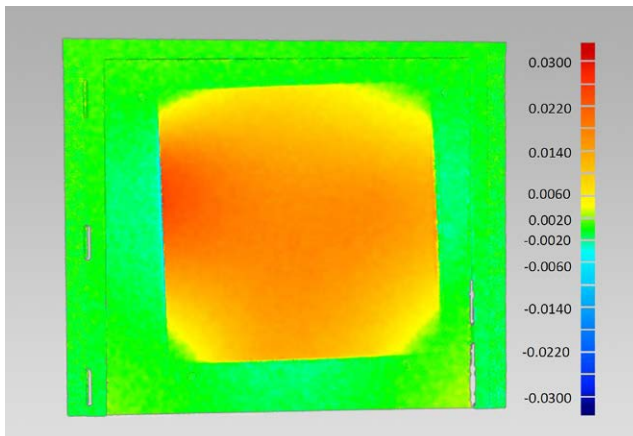


Abb. 12: C2M-Vergleich [m] bei einer Verformung (Geomagic Control)

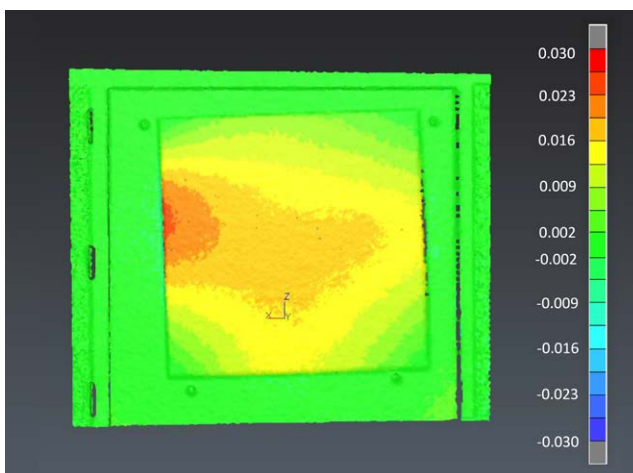


Abb. 13: M2M-Vergleich [m] bei einer Verformung (3DReshaper)

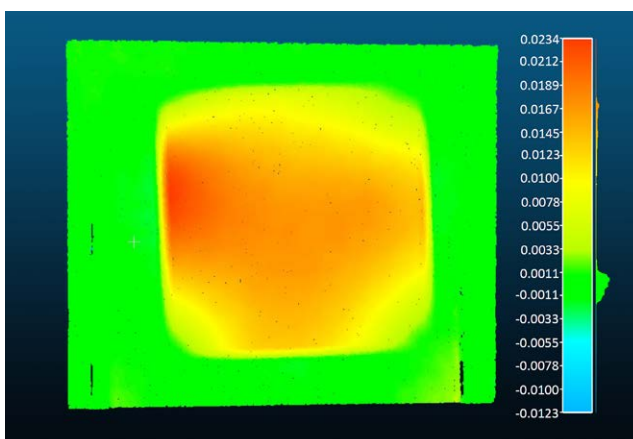


Abb. 14: M3C2-Vergleich [m] bei einer Verformung (CloudCompare)

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 und ist deswegen nicht dargestellt.

4.3 Starrkörperbewegung entlang der Oberfläche

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. Damit verläuft die Starrkörperbewegung hauptsächlich entlang der Oberflächenausdehnung. 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 Verschiebung entlang der Oberfläche 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

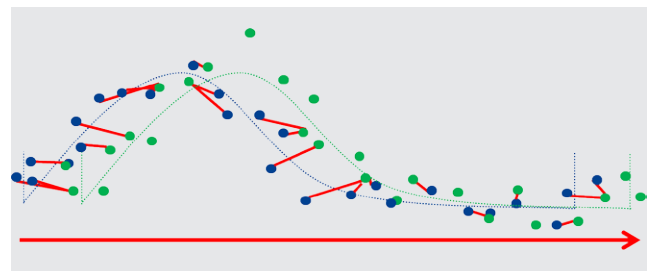


Abb. 15: Abweichungen (rot) zwischen der Punktwolke von Epoche 1 (blau) und Epoche 2 (grün) bei Messung einer Oberfläche (blau und grün gestrichelt) in zwei Epochen vor und nach einer Starrkörperbewegung entlang der Oberfläche (roter Pfeil)

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. Hier wurde mit Hilfe des Messarms eine tatsächliche Verschiebung von 30 bis 50 mm festgestellt. Stattdessen liegt beim Punktwolkenvergleich aber eine Größenordnung von 15 mm vor. Dies verdeutlicht, dass die Punkte der ersten Epoche 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

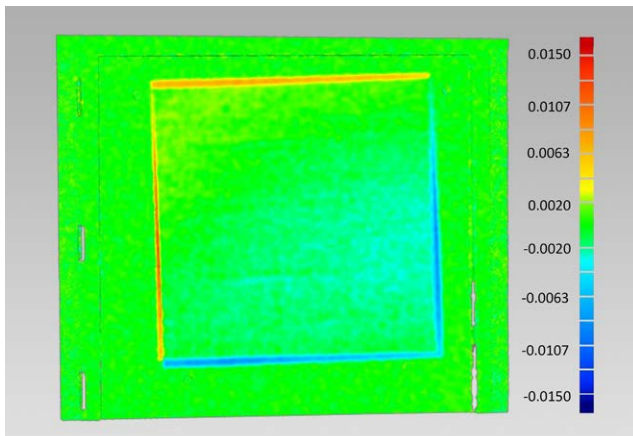


Abb. 16: M2M-Vergleich [m] bei einer Starrkörperbewegung (Geomagic Control)

Betrag der Verschiebung von mehreren Zentimetern aufgrund einer falschen Zuordnung von Punktkorrespondenzen.

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 Punktzusordnungen 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 entlang der Oberfläche 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 Punktwolkendifferenzen, die am Rand des

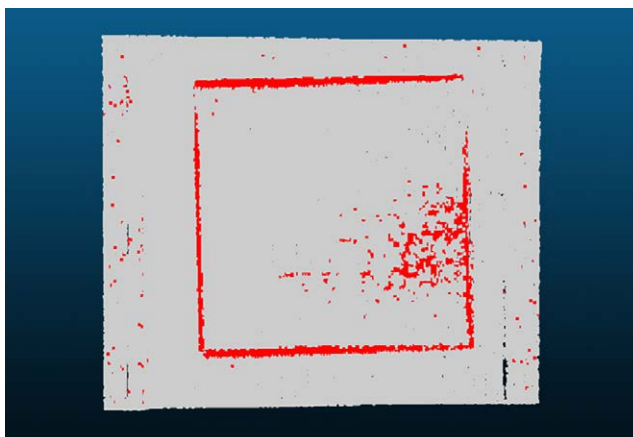


Abb. 17: Signifikante Abweichungen (rot) beim M3C2-Vergleich einer Starrkörperbewegung (CloudCompare)

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 dargestellt.

Diese Erkenntnis kann noch verdeutlicht werden, wenn der M3C2-Vergleich unter Betrachtung der dort nur als signifikant erkannten Punktdifferenzen dargestellt wird (Abb. 17). 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. 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.

5 Deformationsanalyse einer Staumauer

Die Erkenntnisse des vorherigen – eher synthetischen – Beispiels werden nun zur Verifizierung der Ergebnisse eines Realbeispiels herangezogen. Dieses ist die flächen-



Abb. 18: Brucher-Talsperre aus Sicht der Luftseite

hafte Deformationsanalyse der Brucher-Talsperre. Bei dieser Talsperre handelt es sich um eine vom Wupperverband betriebene Gewichtstaumauer in Nordrhein-Westfalen, welche 1913 in Betrieb genommen und zwischen 1990 und 1993 aufgrund von altersbedingten Schäden saniert und an den aktuellen Stand der Technik angepasst wurde. Die bogenförmige Mauer besteht aus Grauwackesteinen und steht heute unter Denkmalschutz (Abb. 18). Installiert wurde die Talsperre zur Brauchwasserspeicherung und zum Hochwasserschutz. Die Staumauer hat eine Kronenlänge von 200 m, die Höhe über der Gründungssohle beträgt 25 m, die Sohlenbreite 17 m und die Kronenbreite 4,50 m. Insgesamt beträgt der Stauinhalt 3,37 Mio. m³ (Wupperverband 2012).

Kap 5.1 beschreibt das Messkonzept. In Kap. 5.2 werden die Ergebnisse der Deformationsanalyse basierend

auf den bereits vorgestellten Methoden der Punktwolkenvergleiche dargestellt und diskutiert.

5.1 Aufstellung des Messkonzepts

Die Staumauer wird halbjährlich vom Fachbereich Vermessung/Planmanagement/CAD des Wupperverbands auf Deformationen untersucht. Die Deformationsanalyse basiert auf einem fest installierten Messpfeilernetz, von dem aus ca. 18 auf der Luftseite der Staumauer fest installierte Zielmarken tachymetrisch eingemessen werden. So können Punktverschiebungen der 18 Zielzeichen aufgedeckt werden, nachdem die Stabilität des Festpunktnetzes geprüft ist. Halbjährliche Punktbewegungen von mehr als 10 mm werden auf Basis einer klassischen geodätischen, punktbasierten Deformationsanalyse beobachtet (Heun-ecke et al. 2013). Ein zusätzliches Nivellement zur Aufdeckung von Höhenänderungen von auf der Dammkrone eingelassenen Höhenbolzen ergänzt diese Deformationsanalyse.

Für die flächenhafte, TLS-basierte Deformationsanalyse wurde die luftseitige Oberfläche der Staumauer in zwei Epochen (März 2016, Juni 2016) von jeweils drei Standpunkten gescannt. Abb. 19 zeigt eine Teilansicht eines

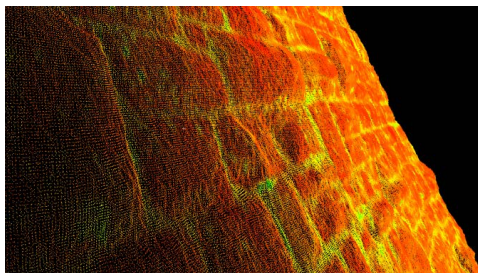


Abb. 19:
Ausschnitt
eines Laser-
scans der
Staumauer
mit farb-
codierten
Intensitäten

Scans. Aufgrund der Länge der Staumauer sowie der Sichtverhältnisse vor Ort und der daraus resultierenden Messkonfiguration, war die Besetzung von drei Standpunkten pro Epoche nötig. Die Registrierung dieser drei Standpunkte wurde zielzeichenbasiert unter Vermarkung der fest installierten Messpfeiler durchgeführt, sowohl epochenweise als auch interepochal.

Aufgrund des zeitlichen Abstands zwischen den Epochen von nur drei Monaten wird erwartet, dass sich die Oberfläche um einen Betrag zwischen 5 und 10 mm quer zur Flächenausdehnung, also in Richtung der Wasser- bzw. Luftseite, verformt. Eine Starrkörperbewegung kann ausgeschlossen werden. Den Untersuchungen aus Kap. 4 folgend, können diese Verformungen auf Basis der vorgestellten Methoden theoretisch aufgedeckt werden. Abweichend von dem synthetischen Beispiel aus Kap. 4 liegen hier jedoch erschwerende, wenn auch bei den meisten Anwendungen ähnlich auftretende Umstände vor:

- Mehrere Standpunkte müssen besetzt und die Punktwolken innerhalb jeder Epoche registriert werden. Dies kann zu systematischen Registrierabweichungen führen. Selbst wenn – wie hier – die identischen drei

Standpunkte in beiden Epochen besetzt wurden und daher von ähnlichen Registrierabweichungen in beiden Epochen auszugehen ist, kann dies zu weniger gut interpretierbaren Ergebnissen führen.

- Die Grauwackesteine der Staumauer weisen Kanten und unterschiedliche Reflexionseigenschaften aufgrund von leichten Farbunterschieden und variierenden Oberflächenstrukturen auf (Abb. 19). Dies kann zu systematischen Abweichungen und falschen Punktzuordnungen führen.
- Der Bewuchs der Oberfläche (durch Moos, Flechten und andere kleine Pflanzen) war im Juni ausgeprägter als im März.
- Im März lag annähernd Wasserhöchststand vor, sodass der mittlere Bereich der Talsperre unterhalb der Überlaufstellen zeitweise von fließendem Wasser bedeckt war.

5.2 Ergebnisse der Deformationsanalyse

Zur Analyse der Deformationen werden wieder die verschiedenen Methoden von Punktwolkenvergleichen herangezogen. Abb. 20 stellt den C2M-Vergleich, Abb. 21 den M2M-Vergleich und Abb. 22 den M3C2-Vergleich dar. Der C2C-Vergleich wird nicht dargestellt, da eine Interpretation aufgrund des sehr hohen Rauschens in der Punktwolkendifferenz nicht zielführend ist.

Bei allen Darstellungen wird wieder manuell ein Signifikanzbereich definiert, um festzulegen, bis zu welcher Größenordnung Punktwolkendifferenzen noch in grüner Farbe dargestellt werden. Dieser Signifikanzbereich gleicht aufgrund empirischer Abschätzungen 3 mm; er variiert nicht zwischen den folgenden Darstellungen.

Aus allen drei Abbildungen geht hervor, dass die Bereiche in der Mitte der Staumauer und von dort in linker Richtung die flächenmäßig größten zusammenhängenden Abweichungen aufzeigen (siehe rote Ellipsen in Abb. 20). Während dies beim C2M-Vergleich (Abb. 20) insbesondere für den linken Bereich nur zu erahnen ist, treten die Differenzen beim M2M-Vergleich (Abb. 21) und beim M3C2-Vergleich (Abb. 22) gleichermaßen eindeutig hervor. Die Differenzen liegen in der Größenordnung von –7 bis –5 mm. Da bedeutet, dass sich die Staumauer von März bis Juni in Richtung der Wasserseite bewegt hat. Sowohl die Richtung als auch der Betrag der Verformung sind aufgrund der vorherigen Abschätzungen realistisch und mit dem im Juni vorliegenden geringeren Wasserstand zu begründen.

Neben diesen großflächigen Differenzen sind auch kleinräumigere Abweichungen beider Punktwolken mit positiven und negativen Vorzeichen in allen Abbildungen erkennbar:

- Positive Abweichung von ca. +11 mm, markiert in Abb. 20: Diese positiven Differenzen entstehen hauptsächlich aufgrund des Bewuchses auf der Mauer, der im Juni größer ausgeprägt ist als im März.

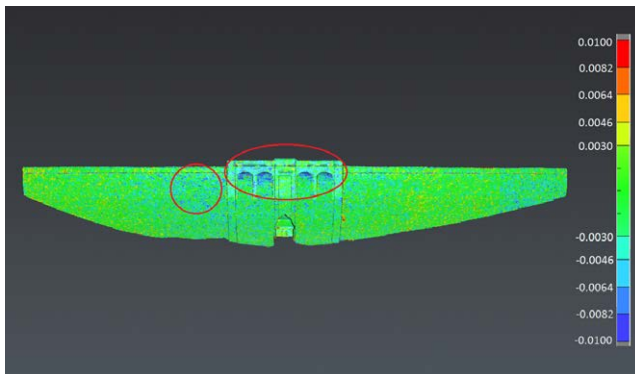


Abb. 20: C2M-Vergleich [m] der Brucher-Talsperre (3DReshaper)

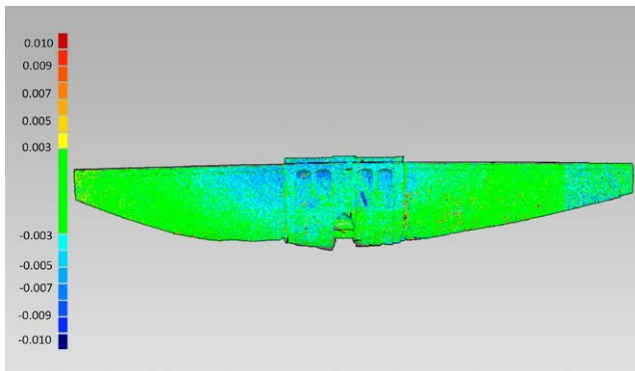


Abb. 21: M2M-Vergleich [m] der Brucher-Talsperre (Geomagic Studio)

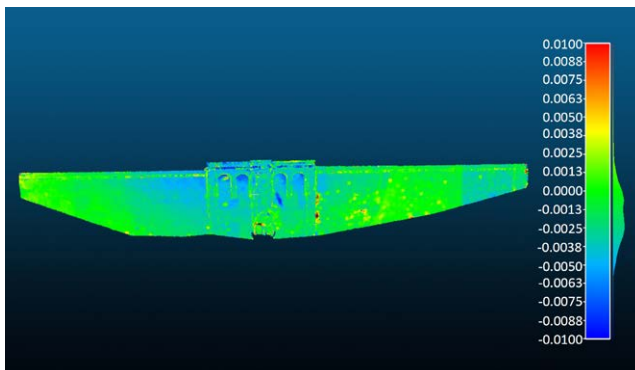


Abb. 22: M3C2-Vergleich [m] der Brucher-Talsperre (CloudCompare)

- Eine einzige kleinräumige negative Abweichung von ca. -10 mm, z.B. in Abb. 21, in der Mitte der Staumauer: Während der Messung im März ist Wasser den sich dort befindenden Überlauf hinabgeflossen.
- Positive, kleinräumige Abweichungen von wenigen Millimetern am linken Rand und im mittleren rechten Bereich der Staumauer: Evtl. auch Bewuchs oder aber auch zufällige Abweichungen aufgrund eines zu optimistischen Signifikanzbereichs von 3 mm.
- Vornehmlich negative Abweichungen am rechten Rand der Staumauer, scharf abgegrenzt: Hier wird vermutet, dass das Stativ des Laserscanners kurz vor Ende der Messung im März von einem der drei Standpunkte in den gefrorenen Boden eingesunken ist.



Abb. 23: Signifikante Abweichungen (rot) beim M3C2-Vergleich der Brucher-Talsperre (CloudCompare)

All diese klein- und großräumigen Abweichungen treten am deutlichsten beim M3C2-Vergleich hervor (Abb. 22). Dies ist mit der hier stärkeren Filterung der Messdaten aufgrund der Kernpunktbildung zu erklären: Messrauschen wird demnach bei der Analyse reduziert, lokale Abweichungen aber auch überzeichnet. Als Parameter dienen bei diesem M3C2-Vergleich der Durchmesser des Zylinders von $d = 1$ m und der Durchmesser der Ebene von $D = 1$ m. Werden beide Parameter kleiner gewählt, wirken sich die kleinräumigen Abweichungen geringer auf das Endresultat aus, das Rauschen ist aber auch wieder höher. Hier ist also ein Kompromiss zu finden.

Verdeutlicht werden können die Punktwolkendifferenzen noch durch den Signifikanztest des M3C2-Vergleichs. Bei einer Registriergenauigkeit von 1,5 mm folgt Abb. 23. Hier treten klar die bereits als deformiert erkannten Bereiche hervor, zusätzlich noch weitere vereinzelte Abschnitte der Oberfläche. Dies ist durch die o.a. Umstände zu erklären.

6 Fazit und Ausblick

Sollen Oberflächendeformationen zwischen Punktwolken, aufgenommen in unterschiedlichen Epochen, analysiert werden, gibt es eine Fülle von möglichen Methoden, die sich den fünf in Abb. 2 dargestellten 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 der untersuchten Fallbeispiele können folgende Rückschlüsse gezogen werden:

- Zwischen den Punktwolken liegen immer Abweichungen vor. Diese sind – wie auch bei punktwolkenbasierten Deformationsanalysen – der Messunsicherheit zuzuschreiben. Eine genaue Abschätzung dieser Messunsicherheit – wie es bei der Tachymetrie durchgeführt

wird – ist beim Laserscanning aufgrund noch nicht vollständig bekannter Einflüsse allerdings bislang nicht möglich. Ferner liegen aber auch Abweichungen zwischen den Punktwolken vor, da Scanpunkte aus zwei Epochen nicht identisch sind, sondern einen Abstand abhängig von der Messauflösung besitzen. Aus beiden Gründen ist es schwierig zu beurteilen, ab wann Abweichungen signifikant sind. Daher ist ein Zweiepochentest zur Prüfung signifikanter Abweichungen, wie er bei punktweisen Deformationsanalysen 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 quer zur Oberfläche lassen sich die tatsächlichen Formabweichungen mit Hilfe von Punktwolkenvergleiche herausarbeiten.
- Für eine Starrkörperbewegung quer zur Oberfläche (nicht gezeigt hier) gilt diese Aussage in ähnlicher Weise. Eine Starrkörperbewegung als solche zu identifizieren, ist dennoch schwieriger, da die Punktwolkendifferenzen aufgrund verschiedener Einflüsse in vielen Fällen nicht räumlich konstant um den tatsächlichen Verschiebungsbetrag schwanken. Daher erscheint eine Starrkörperbewegung bei Punktwolkenvergleichen vielfach als eine Deformation, die zusätzlich noch von einer Verformung überlagert ist.
- Aus einer Starrkörperbewegung entlang der Oberfläche 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.
- Gleiches gilt für eine Verformung entlang der Oberfläche (nicht gezeigt hier). Dieser Fall ist bei Bauwerken jedoch eher selten, da er einer Fließbewegung entlang der Oberfläche ähneln würde. Vielmehr ist dieser Fall für die Deformationsanalyse natürlicher Oberflächen relevant (z.B. Hangrutschungen).
- 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.
- Bei allen Vergleichen wird (optional) eine Glättung durchgeführt. Die Glättung des M3C2-Algorithmus ist durch die Bildung der Kernpunkte geometrisch nachvollziehbar.
- Am Beispiel der Staumauer wird deutlich, dass das Messrauschen bei der Glättung zwar minimiert wird, aber gleichzeitig auch Objektdetails verschwimmen

oder kleinräumige systematische Abweichungen – je nach Aggressivität der Glättung – hervorgehoben werden.

- Die erzielten Ergebnisse hängen bei allen Softwarepaketen auch immer von den gewählten Einstellparametern während der Prozessierung ab: Stärke der Glättung, Punktreduktion, Art der Vermaschung, Anzahl an Kernpunkten, usw.

Diese Ergebnisse beziehen sich auf die hier betrachteten Beispiele der deformierten Holzplatte sowie der Brucher-Talsperre. Während das erste Beispiel aufgrund nur eines Standpunktes und der homogenen Oberfläche als recht gutmütig erscheint, sind die Anforderungen an die Deformationsanalyse beim zweiten Beispiel höher: es liegt eine komplexere Oberfläche mit Kanten und resultierenden Datenlücken vor sowie inhomogene Oberflächeneigenschaften (Material, Farbe, Reflexionsverhalten). Hier wird offensichtlich, dass, wie Lague et al. (2013) auch feststellten, der C2C- und C2M-Vergleich an Aussagekraft verlieren. Aus dem M2M-Vergleich sowie dem M3C2-Vergleich sind die Verformungen der Talsperre jedoch gut zu detektieren. Aufgrund der Integration von Messunsicherheit und der geometrischen Interpretierbarkeit der Glättung über Kernpunkte bietet der M3C2-Vergleich hier jedoch noch weitere Vorteile gegenüber dem M2M-Vergleich.

Generell wird anhand der vorliegenden Studie deutlich, dass punktweise Deformationsanalysen nicht einfach in flächenhafte überführt werden können, wenn die hier betrachteten Punktwolkenvergleiche herangezogen werden: Deformationen entlang der Oberfläche lassen sich aufgrund falscher Punktzusordnungen bei der Differenzbildung beider Punktwolken nur begrenzt detektieren. Ferner kann aufgrund des fehlenden stochastischen Modells beim Punktwolkenvergleich und der fehlenden Zuordnung zwischen den Einzelpunkten verschiedener Epochen 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 und Kuhlmann 2016, Holst et al. 2016).

Aus diesem Umstand folgt unmittelbar, dass zur zielführenden Analyse der Punktwolkendifferenzen sowohl messtechnische Kompetenz als auch Objektkennntnis gefordert sind. Ansonsten sind Punktwolkendifferenzen, die durch Registrierungsabweichungen, systematische Messabweichungen, Abschattungen oder Objekteigenschaften zustande kommen, nicht von tatsächlichen Deformationen zu trennen. Die endgültige Darstellung eines jeden Punktwolkenvergleichs, siehe Abb. 9 bis 17 und 20 bis 23, ist ohne diese Kenntnisse nicht zu interpretieren und somit nahezu wertlos.

Diese Erläuterungen führen zu dem Schluss, dass die hier vorgestellten und verwendeten Methoden unter ge-

wissen Umständen zwar einen Rückschluss auf quantitative Veränderungen zwischen zwei Punktwolken zulassen, jedoch nicht von einer qualitativen 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). Für Letzteres fehlt bisher – wie bereits beschrieben – ein realistisches stochastisches Modell von Laserscans. Dieser Nachteil flächenhafter Deformationsuntersuchungen wird momentan in einer Vielzahl ingenieurgeodätischer Veröffentlichungen thematisiert und weiter analysiert (siehe z.B. die Sonderhefte 6/2016 und 11-12/2016 der avn zum Thema TLS-basierte Deformationsanalyse: Bureick et al. 2016, Holst et al. 2016, Kauker et al. 2016, Neuner et al. 2016, Wujanz et al. 2016, Wunderlich et al. 2016, Holst und Kuhlmann 2016), sodass hier zukünftig von Weiterentwicklungen auszugehen ist.

Literatur

- Akca, M.D.: 3D modeling of cultural heritage objects with a structured light system. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 12(1), 139–152, 2012.
- Barnhart, T.B., Crosby, B.T.: 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, 2013.
- Besl, P.J., Mc Kay, N.D.: A Method for Registration of 3D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256, 1992.
- Bureick, J., Neuner, H., Harmening, C., Neumann, I.: Curve and Surface Approximation of 3D Point Clouds, *Allgem. Verm. Nachr.*, 11-12/2016, 315–327, Wichmann Verlag, Berlin, 2016.
- Cignoni, P., Rocchini, C., Scopigno, R.: Metro: measuring error on simplified surfaces. *Computer Graphics Forum*, 17(2), 167–174, 1998.
- CloudCompare: User Manuel. www.danielgm.net/cc/, letzter Zugriff 25.04.2016, 2015.
- Girardeau-Montaut, D., Roux, M., Marc, R., Thibault, G.: 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, 2005.
- Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W., Eichhorn, A., Neuner, H.: *Handbuch Ingenieurgeodäsie. Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. 2. Auflage. Wichmann, Heidelberg, 2013.
- Holst, C., Kuhlmann, H.: Challenges and Present Fields of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses, *J. Appl. Geodesy*, 10(1), 17–25, 2016.
- Holst, C., Nothnagel, A., Blome, M., Becker, P., Eichhorn, M., Kuhlmann, H.: Improved area-based deformation analysis of a radio telescope's main reflector based on terrestrial laser scanning, *J. Appl. Geodesy*, 9(1), 1–14, 2015.
- Holst, C., Neuner, H., Wieser, A., Wunderlich, T., Kuhlmann, H.: Calibration of Terrestrial Laser Scanners, *Allgem. Verm. Nachr.*, 6/2016, 147–157, Wichmann Verlag, Berlin, 2016.
- Kauker, S., Holst, C., Schwieger, V., Kuhlmann, H., Schön, S.: Spatio-Temporal Correlations of Terrestrial Laser Scanning, *Allgem. Verm. Nachr.*, 6/2016, 170–182, Wichmann Verlag, Berlin, 2016.
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J.: 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, 2013.
- Mukupa, W., Roberts, G.W., Hancock, C.M., Al-Manasir, K.: A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures, *Survey Review*, 2016.
- Neuner, H., Holst, C., Kuhlmann, H.: Overview on current modelling strategies of point clouds for deformation analysis, *Allgem. Verm. Nachr.*, 11-12/2016, 328–339, Wichmann Verlag, Berlin, 2016.
- Niemeier, W.: *Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden*. 2. Auflage. Walter de Gruyter, Berlin, 2008.
- Ohlmann-Lauber, J., Schäfer, T.: Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In: *Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011 mit TLS-Challenge*, DVW-Schriftenreihe Band 66, 147–157, Wißner-Verlag, Augsburg, 2011.
- Tsakiri, M., Anagnostopoulos, V.: Change Detection in Terrestrial Laser Scanner Data Via Point Cloud Correspondence. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 4(3), 476–486, 2015.
- Wujanz, D., Holst, C., Neitzel, F., Kuhlmann, H., Niemeier, W., Schwieger, V.: Survey Configuration for Terrestrial Laser Scanning, *Allgem. Verm. Nachr.*, 6/2016, 158–169, Wichmann Verlag, Berlin, 2016.
- Wunderlich, T., Niemeier, W., Wujanz, D., Holst, C., Neitzel, F., Kuhlmann, H.: Areal deformation analysis from TLS point clouds – the challenge. *Allgem. Verm. Nachr.*, 11-12/2016, 340–351, Wichmann Verlag, Berlin, 2016.
- Wupperverband: Brucher- und Lingssee-Talsperre. Informationsflyer, 2012.

Anschrift der Autoren

Dr.-Ing. Christoph Holst | B.Sc. Berit Schmitz | Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann
 Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation
 Nußallee 17, 53115 Bonn
c.holst@igg.uni-bonn.de | s7beschm@uni-bonn.de | heiner.kuhlmann@uni-bonn.de

Dipl.-Ing. Achim Schraven

Wupperverband, Fachbereich Vermessung/Planmanagement/CAD
 Untere Lichtenplatzer Straße 100, 42289 Wuppertal
schr@wupperverband.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.