

Ein automatisches Monitoringsystem für Buhnen an der Elbe durch terrestrisches Laserscanning

Felix Tschirschwitz, Klaus Mechelke, Hanne Jansch, Klemens Uliczka und Thomas Kersten

Zusammenfassung

Zur Einfahrt in den Hamburger Hafen werden ca. 120 km des tidebeeinflussten Abschnitts der Elbe, die Unter- und Außenelbe, durchquert. Für den Schutz der Uferzonen sind Buhnen, spezielle Strömungsbauwerke, in den Flusslauf eingebracht. Seit ca. 2001 werden Schäden an den Buhnen festgestellt, die eine regelmäßige und teure Ertüchtigung der Bauwerke erforderlich machen. Die Ursache scheint in der erhöhten Elbbefahrung von immer größeren Schiffen gefunden zu sein. Die Schiffe verursachen bei der Durchquerung des Elbabschnittes starke langperiodische Wellenbelastungen, die sowohl Buhnen erodieren lassen, als auch zu Durchbrüchen führen. Im Untereelbeabschnitt Juelsand wird im Rahmen eines Naturversuchs der Bundesanstalt für Wasserbau und des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes Hamburg die Stabilität unterschiedlicher Bauformen und -weisen erprobt, um eine probabilistische Bemessung der Deckwerke zu ermöglichen. Die Dokumentation der Veränderungen erfolgt durch geodätisches Monitoring, welches in Kooperation mit der Hafencity

University Hamburg entwickelt und ausgeführt wird. Gekapselt in ein schützendes Gehäuse werden Laserscans der Buhnenoberfläche jeweils bei Niedrigwasser vollautomatisch durchgeführt. Mit zwei identischen Messsystemen werden jeweils von einer 12 m hohen Messplattform Daten von zwei Buhnen erfasst. Durch einen 3D-Vergleich zu der Nullepoche werden die aufgetretenen Deformationen beschrieben. Ein Zusammenhang zwischen den verursachten Schäden und einzelnen Schiffspassagen kann hergestellt werden. Dafür werden wichtige Parameter zu den vorbeifahrenden Schiffen vom Automatischen Informationssystem (AIS) geliefert, während die schiffsinduzierten langperiodischen Wellenbelastungen mit Hilfe von in der Buhne verteilten Drucksonden gemessen werden.

Summary

To enter the port of Hamburg, a tidal estuary of about 120 km, the Low and Outer Elbe has to be traveled. Groynes, rigid hydraulic structures, were established to help exploitation of the

river as a federal waterway and protect the riverbanks. Since 2001 various damages of groynes have been observed deeming a costly repair and maintenance necessary. The cause was detected in the increasing maritime traffic of larger sized vessels. Vessels induce heavy long-periodic wave loads eroding the structures and creating breakthroughs at the groyne's coastal connection. At the Low Elbe section Juelssand, an in situ pilot study by the Federal Waterways Engineering and Research Institute and the Waterways and Shipping Board, new construction parameters and different shapes at real conditions are tested for a probabilistic assessment of the groyne's revetment. The documentation of the deformation is based on a geodetic monitoring system developed and operated in cooperation between Federal Waterways Engineering and Research Institute and HafenCity University Hamburg. Encapsulated in a secure housing, a laser scanner automatically records the groyne's surface at each low tide. Two identical measurement systems were installed on monitoring platforms at 12 m height documenting two different groyne types. Based on the laser scans, a 3D comparison is calculated to detect changes to a reference epoch to quantify the impact of ship passages. Additionally, important vessel parameters are gathered from the Automatic Information System (AIS) while wave loads are measured with pressure probes installed well distributed at the groynes.

Schlüsselwörter: Bühne, Deformation, Monitoring, Point Cloud Library (PCL), TLS

1 Einleitung

Die Dokumentation und Analyse von Deformationen ist seit vielen Jahren gängige geodätische Praxis im Rahmen von Bauwerksüberwachungen oder Überwachungsmessungen an natürlichen Strukturen. In einem geodätischen Monitoring werden meist mehrere Sensoren in einem Netzwerk gekoppelt, um sowohl die Deformation an sich, als auch die Einflussgrößen für die Deformation zu erfassen. Je nach Größe des Objektes, des erwarteten Deformationsbetrags und der Deformationsgeschwindigkeit kommen diverse Sensoren zum Einsatz. Die unterschiedlichen Anwendungen reichen von kleinen lokalen Verfahren, wie der Messung mit Dehnungsmessstreifen (DMS), zu räumlich begrenzten Anwendungen mittels Totalstationen an vermarkten Einzelpunkten bis hin zu großräumigen Anwendungen mit GNSS oder Fernerkundung. Die Ursachen der Deformation sind hierbei vielfältig, was sich auch in der Fülle der Sensoren für die Einflussgrößen widerspiegelt. Meistens werden dabei Umweltparameter erfasst wie Wasserstände, Temperaturen oder Kräfte, die auf das Objekt wirken.

Im Bereich der räumlich begrenzten Verfahren bieten seit einigen Jahren terrestrische Laserscanner (TLS) eine gute Möglichkeit, die Sensorik um flächenhaft messende Verfahren zu erweitern. Anwendungen für natürliche

Objekte gibt es etwa von Wiatr et al. (2009), die Langstreckenscanner mit Reichweiten > 500 m für die Vermessung von Hangrutschungen nutzen. Im Bereich der Bauwerksüberwachungen zeigen Kutterer und Hesse (2006) die Erfassbarkeit von strukturellen Deformationen an einem Schleusentor durch TLS. Zogg und Ingensand (2008) haben lastabhängige Verformungen von Brückenbauwerken nachgewiesen und Holst und Kuhlmann (2011) haben mittels TLS die Deformation eines Teleskophauptreflektors in unterschiedlichen Systemausrichtungen bestimmt. Beispiele für wassernahe und wasserbauliche Anwendungen sind die Dokumentation von rauen Oberflächen an Steilküsten (Lim et al. 2005), die Überwachung von Staumauern (Eling 2009) oder auch das Monitoring von hölzernen Stützpfählern im abgesicherten Flusslauf (Korth und Lösch 2015).

Bei einem normalen Arbeitsablauf in der Deformationsbestimmung mit TLS wird die manuelle Vermessung mit manueller bzw. teilautomatischer Auswertung verknüpft. Eine vollautomatische Erfassung und Auswertung von TLS-Daten zur Deformationsanalyse wurde bis heute eher selten realisiert. Die Herausforderung besteht dabei nicht nur in der Verarbeitung der großen Datenmengen, sondern auch in der zuverlässigen Ableitung der geforderten Kennwerte. Erste Entwicklungen finden sich bei Paffenholz et al. (2007), die Objektvergleiche anhand des Differenzbildes hergestellt haben, sowie bei Ohlmann-Lauber (2010), der ein »TLS für Felssturzebeobachtungen« beschreibt. Mechelke et al. (2012) automatisierten das TLS für unterschiedliche Einsatzzwecke unter Labor- und Feldbedingungen. Als Anwendungsbeispiel diente die tageszeitliche Verformung der Wand des historischen Almaqah-Tempels in Yeha, Äthiopien.

Die Auswertemöglichkeiten von durch TLS erfassten Daten ist dabei ebenso vielfältig wie generelle Anwendungen von TLS. TLS bieten in der Regel die drei Messgrößen: Horizontalwinkel durch langsame horizontale Drehung des Scanners, Vertikalwinkel durch hochfrequente Rotation des Spiegels und Strecken. Beschränkt man den Sensor, indem die Spiegelauslenkung verhindert wird, werden weitere Anwendungen möglich. So wird etwa durch das Abschalten beider Rotationen der 1D-Modus verfügbar, der von Grosse-Schwiep et al. (2015) zur hochfrequenten Deformationsanalyse von Windradrotoren eingesetzt wird. Malikov und Ohlmann-Lauber (2014) nutzen den 2D-Profilmodus (Strecke + Spiegelrotation) für die Detektion von Deformationen in Innenräumen. Aber selbst bei Verwendung aller Messgrößen für die Datenerfassung sind teilweise Auswertestrategien sinnvoll, die weniger Dimensionen nutzen. Schneider (2006) leitet bspw. aus aneinandergereihten Profilen der 3D-Punkt- wolke eine Biegelinie für einen Turm ab.

In diesem Beitrag werden nach einer kurzen Vorstellung des Projektes der Aufbau des Monitoringsystems und die Datenprozessierung beschrieben. Die ersten Ergebnisse der Bühnenveränderungen werden anschließend präsentiert und diskutiert.

2 Projekt

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ist eine technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde. Die Dienststelle Hamburg der BAW berät die Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter (WSÄ) der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) u. a. hinsichtlich Funktion und Stabilität von Strombauwerken an den Seeschiffahrtsstraßen (SeeSchStr) der Nord- und Ostsee sowie am Nord-Ostseekanal. Ein Beispiel für Strombauwerke sind Buhnen, welche im Verkehrswasserbau für diverse Zwecke wie z. B. zum Uferschutz, zur Flussregulierung und zur Kanalisierung eingesetzt werden und in verschiedenen Bauformen und -weisen auftreten können.

Eine Zunahme der Schäden an Buhnen und anderen Deckwerken ist seit etwa 2001 dokumentiert (siehe Abb. 1). Im Untereibeabschnitt Juelssand zeigten sich bspw. Buhndurchbrüche auf einer Breite von ca. 20 m (siehe Abb. 2). Als Ursache der aufgetretenen Schäden wurde die schiffserzeugte langperiodische Wellenbelastung durch vorbeifahrende, zunehmend größere Schiffe detektiert.

Um den zukünftigen Unterhaltungsaufwand für Buhnenbauwerke an SeeSchStr nachhaltig zu reduzieren, hat die BAW zusammen mit dem WSA Hamburg eine Pilotstudie eines Stabilitätstests von optimierten Buhnenvarianten im Rahmen eines Forschungsprojektes initiiert. Ein elementarer Teil der Studie ist das geodätische Bauwerksmonitoring, welches die trotz Optimierung auftretenden Bauwerksschäden infolge schiffserzeugter Ereignisse dokumentiert. Terrestrisches Laserscanning bietet sich durch die Automatisierbarkeit bei gleichzeitiger flächenhafter Objekterfassung gut für diese Aufgabenstellung an. Daher wird im Rahmen einer Forschungs Kooperation zwischen BAW und HafenCity Universität Hamburg (HCU) über einen Zeitraum von zwei Jahren ein solches Monitoringsystem realisiert und zur Bestimmung der Deformationen eingesetzt. Im ersten Projektabschnitt werden hierzu zwei Buhnen in unterschiedlicher Bauform und -weise durch das WSA Hamburg ertüchtigt. Eine Buhne (Buhne 31) wurde dazu in klassischer Bauform ausgeführt, d. h. mit symmetrischem Querschnitt, schwacher Längsneigung und Böschungsneigungen von 1:4. Als optimierte Bauform wurde die sog. hinterströmte Buhne ausgewählt (Buhne 29), deren Besonderheit ein ca. 30 m langer Durchbruch zwischen Buhne und Uferdeckwerk beinhaltet. In beiden Fällen werden Wasserbausteine der Klasse CP 90/250, also mit einer Siebgröße von 90 bis 250 mm verwendet. In weiteren Untersuchungszyklen sollen Buhnen mit weiter optimierten Parametern erprobt und deren Deformationen dokumentiert werden.

Die Erfassung der Schiffsdaten erfolgt über das Automatic Information System (AIS), das als UKW-Signal frei verfügbar ausgestrahlt wird. AIS dient der generellen Navigation und Sicherheit des Schiffsverkehrs und übermittelt Schiffsdaten wie Name und Größe sowie Position und Geschwindigkeit. Die Auswirkung der Schiffspassage auf



Abb. 1: Schäden links der Buhnenkrone trotz optimierter Bauform und -weise der Buhnen (Dezember 2014)



Abb. 2: Durchbruch der Buhnenwurzel bei Juelssand infolge schiffserzeugter langperiodischer Wellenbelastung

die Buhne in Form von langperiodischen Primärwellen wird durch Drucksensoren innerhalb des Buhnenkörpers erfasst. Bis zu fünf Sensoren sind an relevanten Positionen der Buhne verteilt und liefern automatisch Welleneignisse mit Bezug zu den AIS-Daten.

Aufgrund der Deformationsursache als ruckartiges Ereignis infolge einer Schiffspassage ist keine apriori-Aussage zu Deformationsgeschwindigkeit oder -betrag möglich. Daraus ergeben sich die Anforderungen an das Messsystem: a) höchstmögliche räumliche Auflösung zur Erfassung auch kleiner Veränderungen und b) maximale zeitliche Erfassungsrate zur eindeutigen Zuordnung zu Schiffereignissen. Durch den zeitenabhängigen Wasserstand der Elbe ist die Buhne meistens überflutet und daher mit optischen Sensoren nicht kontinuierlich zu vermessen. Der minimale, kontinuierliche Epochenabstand wird daher an die Tide angepasst und ist durch den Zeitpunkt des Niedrigwassers bestimmt. Die abschließende Zuordnung erfolgt daher nur auf einer Sammlung von Schiffspassagen innerhalb der vorangegangenen Tide.

3 Aufbau des Messsystems

Der Kern des Messsystems ist ein Laserscanner IMAGER 5010 des Herstellers Zoller + Fröhlich, der berührungslos die Bühne sowie die Referenzzielzeichen erfasst. Basierend auf Voruntersuchungen (Kersten und Mechelke 2013) wurden Kriterien für ein Monitoringsystem aufgestellt



Abb. 3: Messplattform am Fuß des Sommerdeichs (links), verstrebt Pfeiler mit Schwarz-Weiß-Zielzeichen 80 × 80 cm (rechts)

und die am Markt befindlichen Systeme für den geplanten Einsatz überprüft. Als Kompromiss aus rechtlichen, logistisch-wirtschaftlichen und messtechnischen Aspekten wurde pro untersuchter Bühne eine Messplattform auf einem 12 m hohen Messpfeiler (siehe Abb. 3 links) installiert. Die beiden Messpfeiler befinden sich direkt hinter dem Sommerdeich und wurden für das Projekt vom WSA Hamburg (ABz. Wedel) eingespült, mit Stahlseilen abgespannt und gegen unbefugten Zutritt gesichert. Relevante Parameter bei der Systemauswahl sind neben der Einsetzbarkeit (Reichweite oder Steuerungssoftware), auch die verwendete Laserklasse des Scanners, da nur Geräte mit unsichtbarem Laser der Klasse 1 an SeeSchStr betrieben werden dürfen.

Die Sensorpositionierung auf einem erhöhten Standpunkt ermöglicht einen Erfassungsradius mit Reichweiten von 15 bis zu 120 m auf der Bühne. Durch den gegenüber der Bühnenoberkante um 12 m erhöhten Standpunkt ergeben sich Auftreffwinkel des Messstrahls von 5° bis 35°. Die hohe Winkelauflösung des Messsystems von 0,0002° ermöglicht eine theoretische Punktdichte von 1 cm an der Bühnenspitze. Die durch die Objektstruktur und -ausrichtung bedingten Abschattungen reduzieren die Punktdichte jedoch signifikant, sodass bei normalem Niedrigwasser die Bühne mit ca. 65 Mio. Punkten bzw. ca. 500 Mbyte Daten erfasst wird.

Zu Projektbeginn wurde ein Schwingungsverhalten des Messpfeilers bei mittleren Windgeschwindigkeiten von mehreren Millimetern nachgewiesen. Dieses Schwingungsverhalten wird durch eine in der Scanner-Firmware integrierte dynamische Neigungskompensation weitgehend kompensiert. Jede Epoche wird anhand von drei im

Hinterland verteilten Zielzeichen registriert, um evtl. Bewegungen des installierten Messsystems zu detektieren. Die in ca. 120 m Entfernung liegenden Referenzpunkte (siehe Abb. 3 rechts) sind an verstrebt Messpfeilern befestigte 80 × 80 cm große Aluminiumplatten. Ein um 45° gedrehtes Schwarz-Weiß-Muster dient zur Definition des Zentrums auf dem Zielzeichen.



Abb. 4: Nahaufnahme des Schutzgehäuses mit geschlossenem Sichtfenster und Wetterdach (links). Vollständiger Systemaufbau auf Messplattform mit Schutzgehäuse, Solarzelle und Windgenerator (rechts)

Um ein Monitoringsystem über viele Monate (längste dauerhafte Installation derzeit ca. 10 Monate) betreiben zu können, ist eine stabile Kapselung in einem wetterfesten Gehäuse (siehe Abb. 4 links) zwingend notwendig. Als Gehäuse dienen zwei konzentrisch angeordnete Aluminiumzylinder. Der innere Zylinder hat vier Öffnungen, die auf die Bühne und die drei Zielzeichen ausgerichtet sind. Der äußere Zylinder besitzt dagegen nur ein Fenster. Zum Zeitpunkt der Messung wird durch eine Verdrehung des äußeren Zylinders jeweils ein Scanfenster geöffnet. Nach Abschluss der vier Messungen wird der äußere Zylinder erneut verdreht, sodass die äußere Öffnung an einer vordefinierten, geschlossenen Stelle des inneren Zylinders stoppt und mit einem Bolzen gegen ungewollte Verdrehung geschützt wird. Die Auswahl des Messzeitpunktes erfolgt anhand der vorkalkulierten Zeitpunkte für das Niedrigwasser durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Basierend auf Betrachtungen naher Pegelstände (Pegel Online 2016) wurden 30 Minuten vor und 10 Minuten nach Niedrigwasser als optimales Zeitfenster für die Messung der Bühnen ausgewählt.

Da das Projektgebiet innerhalb eines Naturschutzgebietes liegt, ist ein autarker Betrieb notwendig. Die Stromversorgung der Komponenten erfolgt daher durch eine Photovoltaikanlage sowie einen Windkraftgenerator (siehe Abb. 4 rechts). Um in Zeiten ohne regenerative Energie den Betrieb sicherzustellen, wird eine Brennstoffzelle sowie ein Akkumulator (LiFePO₄/135 Ah) eingesetzt. Der Akkumulator wird beim Unterschreiten einer definierten Spannungsschranke geladen und kann auch Ausfälle einzelner Stromerzeuger kurzfristig überbrücken, sodass

ein Techniker vor Ort das Problem analysieren und beheben kann. Weiterhin ist eine manuelle Wartung in einem Zyklus von zwei bis vier Wochen notwendig, um das Methanol für die Brennstoffzelle nachzufüllen.

Um den Stromverbrauch zu reduzieren, ist der Steuerungs- und Auswertungscomputer an einem Ort mit fester Stromversorgung aufgestellt. In der Nähe des Projektgebietes befindet sich der Strommast Elbe Kreuzung 2, welcher die notwendige Infrastruktur zum Betrieb besitzt. Durch seine Höhe bietet er außerdem eine optimale Position, um die Messsysteme über gerichtetes WLAN anzukoppeln. Dazu sind in Höhe von 35 m Antennen für die Kommunikation installiert. Durch die Höhe oberhalb der Baumkronen sind so Entfernungen von über 2 km zu den Messpfeilern überbrückbar. Der automatische Betrieb eines derartigen Systems war besonders in der Anfangszeit von vielen kleinen und großen Herausforderungen begleitet. Daher wurde der Steuerungsrechner an das Intranet der BAW angeschlossen, damit eine Fernwartung der Systemkomponenten und vereinzelt eingreifen bei Problemen möglich ist. Eine detaillierte Betrachtung des Systems und des Betriebes findet sich in Tschirschwitz et al. (2016).

4 Datenprozessierung

Die Auswertung der Daten erfolgt durch 3D-Vergleich der gemessenen Punktwolke in Bezug zur Vermaschung der Referenzepoche (Abb. 5). Dabei wird für jeden Punkt

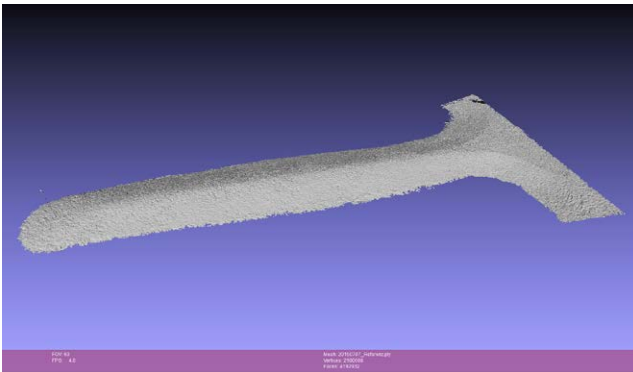


Abb. 5: Vermaschung der Referenzepoche Juli 2015 mit 20 mm Punktabstand

der vertikale Abstand zum Referenzmodell bestimmt. Als finales Ergebnis wird ein Raster mit definierter Kantenlänge erstellt, wobei nur der Mittelwert aller 3D-Vergleiche in der Zelle für weitere Betrachtungen genutzt wird. Die Erfassung der Referenzepoche erfolgte im Juli 2015 durch simultane Vermessung beider Bühnen während eines Niedrigwassers direkt auf dem Bühnenkörper. Da erste Schäden bereits unmittelbar nach Ertüchtigung möglich sind, wurde mit der Messung der Referenzepoche unmittelbar nach Abschluss der Ertüchtigungsarbeiten begonnen. Als Aufnahmesysteme wurden ein

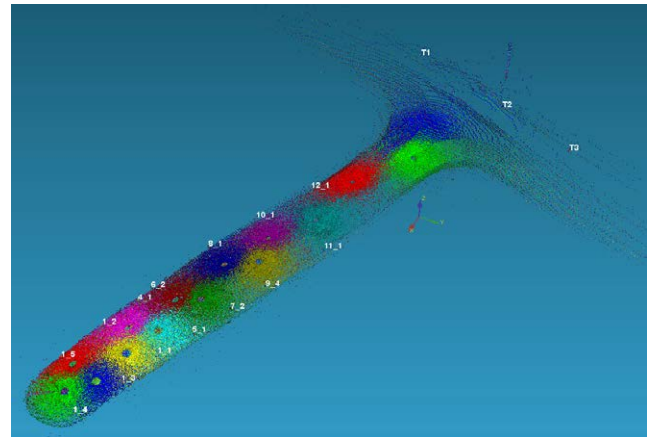


Abb. 6: Punktwolke der erfassten Bühne, farbliche Zuordnung für individuelle Scanneraufstellungen

IMAGER 5010 von Zoller + Fröhlich sowie ein FARO Focus^{3D} X 330 eingesetzt. Für beide Wasserbauwerke wurden ca. 15 Scannerstandpunkte (siehe Abb. 6) benötigt, welche über gut verteilte Zielzeichen zu jeweils einer Punktwolke verknüpft wurden. Fünf Zielzeichen auf der Bühne sowie drei Targets auf dem Sommerdeich wurden mit einem Tachymeter Leica Nova TS60 eingemessen und für die spätere Georeferenzierung der Scans verwendet. Weitere Zielzeichen wurden zwischen den einzelnen Scans umgestellt und als Verknüpfungspunkte verwendet. Auf die Einmessung der Verknüpfungspunkte wurde verzichtet, um eine hohe Standpunktdichte bei zeitlicher Begrenzung durch das auflaufende Wasser zu ermöglichen. Die durchschnittlichen Restklaffen an den Zielzeichen liegen nach der Registrierung bei 2 mm mit Maximalabweichungen von < 1 cm. Die nachfolgenden Abbildungen beziehen sich stets auf Bühne 31.

Prozessiert wurde die Referenzepoche mit der Geräteherstellersoftware Z+F LaserControl unter Verwendung der gängigen Filter für Einzelpunkte, Mixed Pixel, Intensität, Distanz sowie manueller Löschung der Zielzeichen sowie Seezeichen. Die resultierende Punktwolke wurde auf 5 mm Punktabstand ausgedünnt und als Grundlage für eine 2,5D-Vermaschung mit 20 mm Kantenlänge (4,2 Mio. Dreiecken) in Geomagic Wrap genutzt. Die lückenlose 2,5D-Vermaschung (Abb. 5) erlaubt dabei nur eine Dreiecksfläche pro Lageposition, was für die gewählte Auswertestrategie notwendig ist. Manuelle und teilautomatische Operatoren wurden genutzt, um Löcher in der Vermaschung flach bzw. krümmungsbasiert zu schließen, da trotz der hohen Standpunktdichte durch die Steinlage bedingte Verschattungen in den Daten vorliegen.

Für die Berechnung der Differenzen der einzelnen Epochen zur Nullepoche muss die jeweilige Punktwolke in das Koordinatensystem der Nullepoche transformiert werden. Wie eingangs beschrieben, werden zusätzlich zur Bühne drei stabile Zielzeichen im Deichhinterland erfasst und zur Registrierung der Scandaten der jeweiligen Epoche genutzt. Die mit dem IMAGER 5010 erfassten Scans liegen als ZFS-Dateien vor, welche mit Hilfe des proprietären Software Development Kit (SDK) von

Zoller + Fröhlich geöffnet werden können. Das SDK, welches viele der Standardfilter verfügbar macht, ist nur mit einer speziellen Lizenz verwendbar und wird zur Vorverarbeitung der Daten genutzt. Anschließend wird die generierte Punktwolke in die Formate der Point Cloud Library (PCL) überführt und dort weiter verarbeitet. PCL, genutzt in der Version 1.8.0, bietet Datenformate für Punktwolken mit Farbe und Intensität sowie erweiterte Filterfunktionen und Datenvisualisierung (Rusu und Cousins 2011). PCL ist eine Open-Source-Software und wird aktiv mit dem Ziel weiter entwickelt, als Standardbibliothek für 3D-Punktwolkenprozessierung zu fungieren.

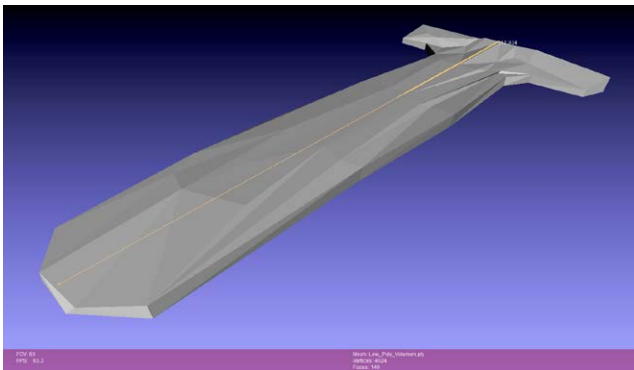


Abb. 7: »CropHull« – räumliche Plausibilitätsprüfung basierend auf 140 Dreiecken

Das Scannen dunkler und zeitweise feuchter Wasserbausteine ist problematisch, da ein Großteil des Signals absorbiert wird. Der Betrieb bei jedem Wetter und jeder Jahreszeit erschwert das Monitoring zusätzlich, sodass Fehlmessungen als grobe Fehler regelmäßig in den Daten vorliegen. Als erster Schritt in der Vorverarbeitung wird daher ein Bereich festgelegt, in dem Messungen als plausibel gelten und daher für die weitere Prozessierung verwendet werden. PCL bietet dafür die Funktion CropHull, welche feststellen kann, ob ein Punkt innerhalb oder außerhalb einer lückenlosen Vermaschung liegt und entsprechend verwendet oder verworfen werden soll (siehe Abb. 7). Die Hülle wird definiert über den sichtbaren Umring der Bühne in Bezug auf die Vermaschung der Referenzepeche. Da eine Erosion erwartet wird, grenzt die Hülle von oben an die Bühnenkrone und folgt der Querneigung mit ca. einem Meter Abstand, um Platz für eventuelle Auflagerungen zu lassen.

Trotz der Eliminierung grober Fehler durch die räumliche Plausibilitätsprüfung sind weiterhin Punkte in den Daten enthalten, die nicht den Ansprüchen des geodätischen Monitorings als formgebende Elemente entsprechen. Abb. 8 zeigt einen Ausschnitt des Scans eines einzelnen Wasserbausteins. Je weiter ein Stein vom Sensor entfernt ist, desto mehr Punkte liegen auf der Seitenkante des Steins und nicht an der formgebenden Oberseite. Diese Punkteverteilung ergibt sich aus der Position des Steins im Sichtfeld des TLS, da die Oberkante nur einen kleineren Winkel einnimmt. Weiterhin ist das Reflektionsverhalten einer reflektorlosen Distanzmessung auch

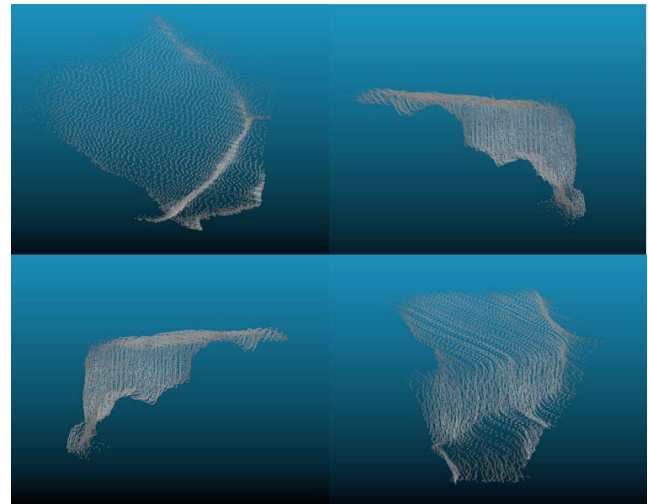


Abb. 8 (v.l.n.r.): Draufsicht, Ansicht – links, Ansicht – vorne und Iso-Ansicht eines einzelnen geschnittenen Wasserbausteins (30 x 40 x 20 cm)

vom Auftreffwinkel bestimmt, sodass die Qualität der Messungen auf der Seitenfläche des Steins höher ist und seltener als Fehlmessung verworfen wird. Die Auswertegenauigkeit wird daher nicht nur von der Mess- und Registrierungsgenauigkeit bestimmt, sondern vor allem auch von der Definitionsgenauigkeit am Objekt, was von Punktverteilung und Standpunktwahl maßgeblich bestimmt wird.

Um den Einfluss der teilweise ungünstigen Punktverteilung zu reduzieren, wird eine Voxel-basierte Filterung vorgenommen. Dafür wird der Schwerpunkt der Punktwolke in einer Rasterzelle bestimmt und als einzelner neuer Punkt der Zelle gespeichert. Wird die Kantenlänge des Volumens nicht konstant in allen drei Koordinatenrichtungen gewählt, lässt sich der Einfluss der Kantenpunkte reduzieren. Dies ist relevant, da das geforderte abschließende Ergebnis von der großen Anzahl von Punkten auf den Kanten beeinflusst wird. Die Voxel-basierte Filterung wird weiterhin in sensornahen Bereichen zur Reduktion der Datenmenge genutzt und ist auch für dünnere Objektbereiche unproblematisch, da dort die geringe Punktdichte nicht weiter reduziert wird.

Die nun vorliegende ausgewertete Punktwolke wird in einem letzten Schritt zu Rasterzellen von 1 x 1 m zusammengefasst. Dieses geschieht auf Basis der Geometrie der Bühnenkrone (Mittelachse des Bauwerks), weswegen sich 50 % der Gitterzellen auf der stromzu- und 50 % der Gitterzellen auf der stromabgewandten Seite befinden. Dies erlaubt eine leichtere Interpretation der Daten, da zu erwarten ist, dass beide Bühnenseiten unterschiedlich stark deformiert werden. Durch die Bühnengröße bietet sich eine Rasterausdehnung in Längsrichtung der Bühne von 128 m bzw. 2⁷ Zellen an. Die Querausdehnung ist mit 32 m ebenfalls ein Vielfaches von zwei, was zu einer Verkürzung der Rechenzeit führt, da ein binärer Baum verwendet werden kann.

Alle hier genutzten Filter liegen in PCL nur in einer sequenziellen Form vor. Durch die heutige Verfügbarkeit

von Mehrkernprozessoren sowie Grafikkartenschnittstellen wie CUDA und OpenCL bietet sich eine Beschleunigung der Prozessierung durch Parallelisierung an. Da der genutzte Auswerterechner allerdings nur über eine interne Grafikkarte verfügt, beschränkt sich die Parallelisierung nur auf die CPU. Dagum und Menon (1998) haben mit OpenMP eine Schnittstelle geschaffen, die es erlaubt, fertigen Quelltext durch vorangestellte C++ Befehle, sog. Pragma Direktiven, sehr einfach zu parallelisieren. Durch die Lastaufteilung lässt sich pro Systemkern theoretisch eine hundertprozentige Steigerung der Prozessierungsgeschwindigkeit erreichen, wobei Ungleichheiten in der Lastverteilung, Engpässe in der Speicherausnutzung sowie die Lastverteilung selbst zu Abweichungen vom Idealfall führen. In den zugrunde liegenden Algorithmen sind Geschwindigkeitssteigerungen von 30 bis 80 % pro Kern erzielt worden.

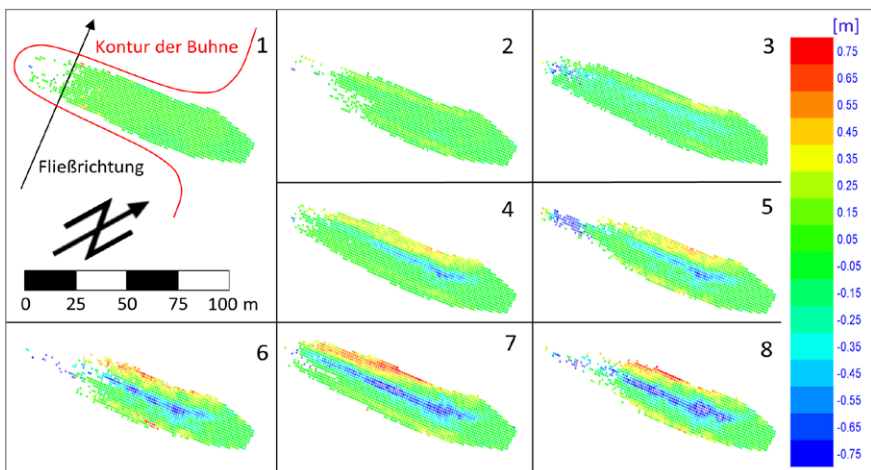


Abb. 9: Visualisierung der Deformationen von Buhne 31 basierend auf dem 1×1 m Raster. Epochenabstand ca. ein Monat. Erster Datensatz (1) während der Referenzmessung Anfang Juli 2015 (o.l.). Letzter Datensatz (8) Ende Januar 2016 (u.r.). Positive (rote) Bereiche beschreiben eine Anlagerung und negative (blaue) eine Erosion des Objektes.

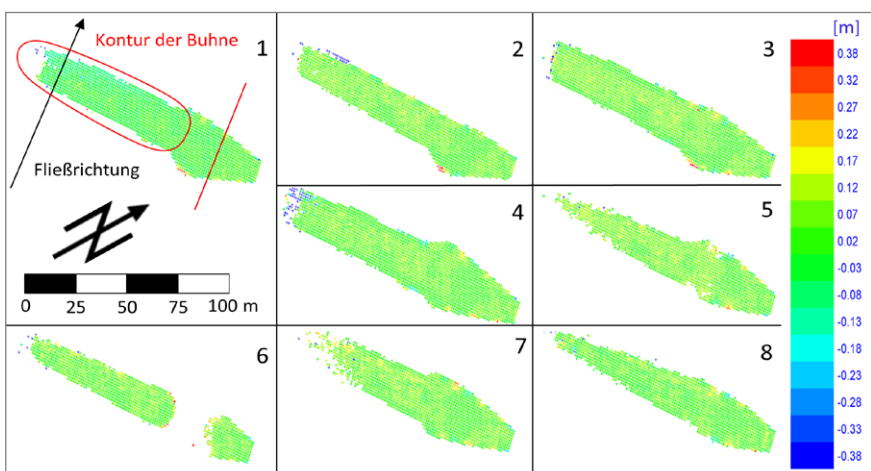


Abb. 10: Visualisierung der Deformationen von Buhne 29 basierend auf dem 1×1 m Raster. Epochenabstand ca. ein Monat. Erster Datensatz (1) drei Tage nach Ertüchtigung Anfang Juli 2015 (o.l.). Letzter Datensatz (8) Ende Januar 2016 (u.r.). Positive (rote) Bereiche beschreiben eine Anlagerung und negative (blaue) eine Erosion des Objektes.

5 Erste Ergebnisse

Bevor die Deformationen der Buhnen beschrieben und bewertet werden können, muss darauf hingewiesen werden, dass jede Messung nur einen Teil der Wirklichkeit abbilden kann und systemimmanente Aspekte sowie äußere Einflüsse die Auswertung beeinflussen. Die äußeren Einflüsse umfassen Parameter wie bspw. das Wetter, welches sich durch Mehrfachreflexionen sowie generelle Abschwächung der Signalstärke auf die Datendichte und -qualität auswirkt. Ein weiterer großer Einflussfaktor ist die Tide. Zwar ist die Messung anhand der voraus kalkulierten Zeitpunkte des Niedrigwassers geplant, allerdings unterscheidet sich der Wasserstand bei Niedrigwasser teils erheblich. Weitere Faktoren, die den Zeitpunkt und vor allem den Wasserstand bei Niedrigwasser beeinflussen, sind Umweltfaktoren wie die Windstärke und -richtung,

welche nicht voraus kalkuliert werden können. Durch die unterschiedlichen Wasserstände dokumentieren die Daten nur Teile der Buhne, da in teilüberflutetem Zustand bzw. in Randbereichen durch die Feuchtigkeit auf dem dunklen Material nur eine sehr geringe Signalstärke zu erwarten ist. Als systemimmanente Parameter kommen die Auswahl des Standpunktes sowie die daraus resultierende Punktdichte hinzu. Die Punktdichte ist bei einem Sensor mit festem Winkelinkrement vor allem vom Abstand des Messpunktes zum Gerätestandpunkt abhängig. Die Messgenauigkeit ist neben dem Abstand auch vom Auftreffwinkel abhängig (z.B. Kersten et al. 2009 oder Zámečnicková et al. 2015), sodass die Oberseiten von weit entfernten Bereichen der Buhne schlechter erfasst werden. Darüber hinaus führen Deformationen zu einer einseitigen Abtastung, da Bereiche des Objektes verdeckt sind, etwa vorderseitige Böschungen bei Mulden oder rückwärtige Böschungen bei Ablagerungen.

Nachdem, wie bereits in Kap. 4 beschrieben, die Differenzen zur Nullepoche berechnet sind, kann die jeweilige Deformation der Buhne betrachtet werden. In Abb. 9 sind die Ergebnisse der klassischen Buhnenform dargestellt, während Abb. 10 die Veränderungen an der optimierten, hinterströmten Bauform darstellt. Der Abstand zwischen den einzelnen Darstellungen beträgt ca. einen Mo-

nat und umfasst damit den fast achtmonatigen Zeitraum von Anfang Juli 2015 bis Ende Januar 2016. In den Daten sind größere Ausreißer vorhanden (siehe z. B. Abb. 9 (4)), die aufgrund der Lage und des Betrags als grobe Fehler identifizierbar sind. Sie finden daher in dieser ersten Auswertung keine Berücksichtigung.

Die Deformationen an Buhne 31 sind klar sichtbar und im mittleren Dezimeterbereich ausgeprägt. Bereits nach wenigen Wochen ist eine Erosion der Buhnenkrone sowie Auflagerung des Materials an der stromauf- sowie stromabwärtigen Seite sichtbar. Dabei ist davon auszugehen, dass das abgetragene Material ebenfalls für die Auflagerung verantwortlich ist und andere umgelagerte Materialien wie Sand vom Flussbett einen Einfluss unterhalb weniger Zentimeter besitzen. Die stärkste Ausprägung des Abtrags der Buhnenkrone liegt bei ca. 30 % der Buhnenlänge, wo die Buhne die höchste Position besitzt und daher voraussichtlich den größten schiffserzeugten langperiodischen Wellenbelastungen ausgesetzt ist. Nach drei Monaten ist die Buhnenkrone daher dort bereits stark erodiert und eine verstärkte Ablagerung auf der stromabwärtigen (nordwestlichen) Seite ca. 10 m parallel zur Buhnenkrone wird erkennbar. Dies ist durch den Passierabstand der Schiffe zu erklären, die beim Verlassen des Hamburger Hafens die Buhne in geringem Abstand passieren (rechte Seite der Fahrwinne) und daher stärkere Wellenbelastungen auslösen. Bei der Einfahrt in den Hafen ist dagegen der Passierabstand groß genug, sodass nur ein sehr geringer Einfluss dieser Schiffspassagen vorliegt.

Weiterhin ist in dem Datensatz nach fünf Monaten ein Wellenmuster zu erkennen, welches sich in abwechselnden Auf- und Ablagerungen in Längsrichtung der Buhne zeigt (Abb. 9 Mitte rechts). Weitere Analysen müssen zeigen, worin die Gründe für diese Deformationen liegen und wie diese reduziert werden können.

Die Daten für Buhne 29, die in optimierter Bauform ertüchtigt wurde, sind in Abb. 10 dargestellt. Die Farbskala stellt nur den halben Wertebereich der in Abb. 9 gezeigten Deformationen dar, weil hier sehr viel geringere Deformationen aufgetreten sind. Es zeigt sich ein eher unregelmäßiges Muster an geringen Auf- und Ablagerungen entlang des Buhnenkörpers. In Abb. 10 (Mitte rechts) ist eine Epoche dargestellt, die aufgrund des Wasserstandes keine Information zur Deformation im hinterströmten Bereich besitzt. Weiterhin ist gut sichtbar, wie in unterschiedlichen Messepochen die Punktabdeckung der Buhne variiert.

Um diese Ergebnisse näher bewerten zu können, sind Messungen mit übergeordneter Genauigkeit und sinnvoller Punktauswahl notwendig. Durch Profilmessungen mittels Tachymetrie lassen sich Profile aus Steinoberflächen bilden, welche der Objektfläche sehr genau folgen und durch menschliche Auswahl keine Repräsentation unbestimmter Objektbereiche enthalten. Da diese Kontrollmessungen noch nicht vorliegen, wird die Genauigkeit des gemittelten Gitterwertes durch die Anzahl

und die Varianz der Punkte innerhalb einer Rasterzelle beschrieben.

Der nächste Schritt, neben der Verbesserung der Prozessierung, ist nun die Korrelation der Deformationen mit den Schiffspassagen um eine 1:1 oder 1:n Beziehung herstellen zu können. Hierfür werden die Unterschiede zweier aufeinander folgender Epochen ausgewertet, da sich darin der Einfluss einzelner Schiffspassagen zeigt.

6 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine neue Methodik für ein TLS-Monitoringsystem vorgestellt, welches die Anforderungen der quantitativen Beschreibung von Deformationen an Wasserbauwerken wie Buhnen erfüllt. Mit diesem System ist eine hochfrequente, automatische Erfassung und Auswertung von Deformationen möglich. Durch die Korrelation der Deformationen mit Daten von AIS sowie der Drucksonden wird sich die Auswirkung von einzelnen Schiffspassagen auf die Bauwerksstabilität beurteilen lassen. Deformationen im Bereich einiger Dezimeter wurden an den Buhnen nachgewiesen und zeigen sehr eindrucksvoll die großen Ansprüche, die an SeeSchStr durch immer größere Schiffe gestellt werden. Während ein Großteil des umgelagerten Materials im sichtbaren Bereich der Buhne verbleibt, wird ebenso Material in das umliegende Buhnenfeld transportiert und teilweise bei Springniedrigwasser sichtbar. Dieser Bereich, der teilweise vom Monitoringsystem erfasst wird, könnte in Zukunft ebenfalls ausgewertet werden, um noch genauere Erkenntnisse über die Bewegung der Steine von Deckschicht und Deckwerk zu erhalten.

Durch die genaue Kenntnis der Verlagerung der Steine kann eine optimierte Bauform und -weise von Buhnen konzipiert werden. In weiteren Projektphasen wird die Funktion dieses Konzeptes nachgewiesen werden, damit der erhebliche Unterhaltungsaufwand dieser wichtigen Strömungsbauwerke weiter gesenkt werden kann. Kein menschliches Bauwerk wird den Belastungen auf Dauer standhalten können, sodass Wartung und ertüchtigung in Zukunft weiter nötig sein werden. Die Ergebnisse an Buhne 29 lassen allerdings erwarten, dass größere Deformationen an der optimierten Buhnenform erst deutlich später auftreten und daher die Stabilität und Funktion der Buhne über einen längeren Zeitraum sichergestellt werden können.

Der Mess- und Auswertebefehl wird weiterhin optimiert. Durch die Erweiterung der Überwachung der Systemkomponenten wie bspw. der Brennstoffzelle soll ein geringerer manueller Wartungsaufwand erreicht sowie die Gefahr von kompletten Systemausfällen weiter reduziert werden. Verbesserungen am Auswerteprozess sollen helfen, die Anzahl und Auswirkungen von Ausreißern und Systematiken zu senken. Ein zu berücksichtigender Ansatz stellt dabei die Verwendung eines stochastischen

Modells zur Beschreibung der Genauigkeit von Punktwolken analog zu Wujanz et al. (2016) dar. Durch die dann mögliche gewichtete Mittelung der Rasterzellen wird die Aussagekraft des Ergebnisses deutlich gesteigert.

Weiterhin soll die Lage der Punkte auf dem Objekt besser berücksichtigt werden. Die dafür notwendige Information kann bspw. anhand des Normalenvektors gewonnen werden und sollte so zu einer besseren Repräsentation der Objektoberfläche beitragen. Durch die sequenzielle Auswertung der Messepochen kommt auch der temporalen Filterung ein besonderes Augenmerk zu. Auswirkungen von Treibgut und anderen unerwünschten Objekten ließen sich so reduzieren.

Das automatische, flächenhafte Monitoring ist nicht nur für Wasserbauwerke interessant. Unterschiedliche ingenieurtechnische Objekte können so zuverlässig dokumentiert werden, um Aussagen über Veränderungen treffen zu können sowie den Zusammenhang von Ursache und Wirkung genauer studieren zu können. Weiterhin erlaubt die hohe Punktdichte eine sehr genaue Bestimmung von Kenngrößen wie bspw. die Parameter von Regelgeometrien. Durch die flexible Methodik in Steuerung und Auswertung hat das System großes Potenzial, auch in anderen Projekten angewandt und weiter verbessert zu werden.

Literatur

- Dagum, L., Menon, R. (1998): OpenMP: an industry standard API for shared-memory programming. *Computational Science & Engineering*, IEEE, 5, S. 46–55.
- Eling, D. (2009): *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung*. Dissertation. Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Heft Nr. 641.
- Grosse-Schwiep, M., Piechel, J., Luhmann, T. (2014): Measurement of Rotor Blade Deformations of Wind Energy Converters with Laser Scanners. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 524 (1), IOP Publishing.
- Holst, C., Kuhlmann, H. (2011): Bestimmung der elevationsabhängigen Deformation des Hauptreflektors des 100m-Radioteleskops Effelsberg mit Hilfe von Laserscannermessungen. In: *Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011 mit TLS-Challenge*, DVW-Schriftenreihe Band 66/2011, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 161–180.
- Kersten, T., Mechelke, K., Lindstaedt, M., Sternberg, H. (2009): Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, Heft 4, S. 301–316.
- Kersten, T., Mechelke, K. (2013): Einsatz von terrestrischen 3D-Laserscannern beim Monitoring von Strombauwerken. Pilotstudie für die Bundesanstalt für Wasserbau, interner Bericht, 20 S.
- Korth, W., Lösch, P. (2015): Deformationsmessungen an Uferbefestigungen mit Laserscanning. In: Hanke, K., Weinold, T. (Hrsg.): 18. Internationale Geodätische Woche Oberurg, Herbert Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH, Berlin/Offenbach.
- Kutterer, H., Hesse, C. (2006): High Speed Laser Scanning for Near Real-Time Monitoring of Structural Deformations. In: Tregoning, P., Rizos, C. (Hrsg.): *Dynamic Planet IAG Symposia*, Vol. 130, Springer, S. 776–781.
- Lim, M., Petley, D.N., Rosser, N.J., Allison, R.J., Long, A.J., Pybus, D. (2005): Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cliff evolution. In: *The Photogrammetric Record*, 20 (110), S. 109–129.
- Malikov, S., Ohlmann-Lauber, J. (2014): A contribution to the application of the 2D laserscanner SICK LMS511 for deformation analysis. In: *Blue Series Books at the Chair of Geodesy*, 22, 12/2014.
- Mechelke, K., Keller, F., Sternberg, H. (2012): Ein Monitoring-System mit TLS Sensor. In: *Terrestrisches Laserscanning 2012 (TLS 2012)*, DVW-Schriftenreihe Band 69/2012, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 105–126.
- Ohlmann-Lauber, J. (2010): TLS für Felssturzbeobachtungen. In: *Terrestrisches Laserscanning – TLS 2010 mit TLS-Challenge*, DVW-Schriftenreihe Band 64/2010, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 129–138.
- Paffenholz, J.-A., Neumann, I., Kutterer, H. (2007): Entwicklung eines remote-monitoring Systems für den HDS 4500. In: Luhmann, T., Müller, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007*, Heidelberg, Wichmann Verlag, S. 188–195.
- Pegel Online (2016): Gewässerkundliches Informationssystem der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). www.pegelonline.wsv.de/webservices/files/Wasserstand+Rohdaten/ELBE/HETLINGEN, letzter Zugriff 12.09.2016.
- Rusu, R., Cousins, S. (2011): 3D is here: Point Cloud Library (PCL). *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 9.–13. Mai, Shanghai, China.
- Schneider, D. (2006): Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams. In: *Proceedings of 3rd IAG/12th FIG Symp.*, Baden, Österreich, Mai 2006, S. 22–24.
- Tschirschwitz, F., Mechelke, K., Jansch, H., Kersten, T. (2016): Entwicklung und Betrieb eines automatisierten Laserscanningssystems zum Monitoring von Bühnen an der Elbe. In: Luhmann, T., Schumacher, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016*, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 50–57.
- Wiatr, T., Fernandez-Steeger, T., Reicherter, K. (2009): Untersuchung von Massenbewegungen und Störungsflächen mit terrestrischem Laserscanning. In: Luhmann, T., Müller, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009*, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 118–126.
- Wujanz, D., Burger, M., Mettenleiter, M., Neitzel, F. (2016): Modellbasierte Standpunktplanung für terrestrische Laserscanner (TLS) unter ingenieurgeodätischen Gesichtspunkten. In: Luhmann, T., Schumacher, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016*, Wichmann Verlag, S. 60–71.
- Zámečnicková, M., Neuner, H., Pegritz, S., Sonnleitner, R. (2015): Investigation on the influence of the incidence angle on the reflectorless distance measurement of a terrestrial laser scanner. In: *Vermessung & Geoinformation 2+3/2015*, S. 208–218.
- Zogg, H.-M., Ingensand, H. (2008): Terrestrial Laser Scanning for Deformation Monitoring – Load Tests on the Felsenau Viaduct (CH). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 37(B5), S. 555–561.

Anschrift der Autoren

Felix Tschirschwitz, M.Sc. | Dipl.-Ing. Klaus Mechelke | Prof. Dipl.-Ing. Thomas Kersten
HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning
Überseeallee 16, 20457 Hamburg
felix.tschirschwitz@hcu-hamburg.de
klaus.mechelke@hcu-hamburg.de
thomas.kersten@hcu-hamburg.de

Dipl.-Ing. (FH) Hanne Jansch | Dr.-Ing. Klemens Uliczka
Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg
Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg
hanne.jansch@baw.de | klemens.uliczka@baw.de

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