

Entwicklung und Betrieb eines automatisierten Laserscanningsystems zum Monitoring von Buhnen an der Elbe

Felix TSCHIRSCHWITZ, Klaus MECHELKE, Hanne JANSCH und Thomas KERSTEN

Zusammenfassung

Durch den zunehmenden Handelsverkehr mit immer größeren Schiffen auf Seeschiffahrtsstraßen wie der Elbe nimmt die Belastung auf Strombauwerke wie Buhnen durch langperiodische Wellen zu. Bis jetzt gibt es allerdings kaum quantitative Aussagen, die den Zusammenhang zwischen der schiffsinduzierten Belastung und den auftretenden Schäden beschreiben. Dieser Beitrag stellt ein Messsystem vor, mit dem Deformationen an Buhnen quantifiziert werden können. Für diese Aufgabe wurde ein Monitoring-System konzipiert, aufgebaut und anhand eines Projektes erprobt. Mit einem terrestrischen Laserscanner als Messsensor wird automatisch bei jedem Niedrigwasser die Oberfläche der Buhne erfasst, um daraus flächenhaft Deformationen im Vergleich zu einem Referenzmodell abzuleiten. Die Systemkomponenten umfassen neben der Messsensorik und dem Gehäuse auch die notwendige Stromversorgung und Funkanbindung, um den dauerhaften Betrieb an einem entfernten Ort sicherzustellen zu können.

1 Einleitung

Terrestrische Laserscanner (TLS) werden als Sensor für Deformationsanalysen seit einigen Jahren eingesetzt. Erfolgreich arbeiten solche Systeme z.B. bei Hangüberwachungen, wo überwiegend long-range Laserscanner mit Reichweiten größer als 500 m benutzt werden (WIATR et al. 2009). Aber auch für die Überwachung von Ingenieurbauwerken gibt es erfolgreiche Anwendungen. So haben z.B. KUTTERER & HESSE (2006) strukturelle Deformationen eines Schleusentores mit terrestrischem Laserscanning untersucht, während ZOGG & INGENSAND (2008) die lastabhängige Verformung eines Brückenbauwerkes u.a. mit Hilfe eines terrestrischen Laserscanners bestimmten. HOLST & KUHLMANN (2011) nutzten das terrestrische Laserscanning zur Ableitung von Deformationen eines Teleskophauptreflektors und ELING (2009) zeigt den erfolgreichen Einsatz von TLS für die Überwachung von Talsperren. Auch für das Monitoring von rauen Oberflächen wie Steilküstenhängen kommt das TLS bereits seit 10 Jahren zum Einsatz (LIM et al. 2005). Weitere Anwendungen im marinen Bereich liefern etwa KORTH & LÖSCH (2015) beim Monitoring von hölzernen Stützpfählern im abgesicherten Flusslauf.

Automatische Monitoringsysteme, gerade mit vollautomatischer Auswertung, werden hingegen nur äußerst sporadisch eingesetzt. Große Probleme bereiten hier die Auswertung der großen Datenmengen, sowie die zuverlässige Ableitung der geforderten Kennwerte. Hierfür beschreibt etwa OHLMANN-LAUBER (2010) ein „TLS für Felssturzbeobachtungen“. MECHELKE et al. (2012) automatisieren das TLS für unterschiedliche Einsatzzwecke unter Labor und Außendienstbedingungen. Als Anwendungsbeispiel diente die tageszeitliche Verformung einer Tempelwand des historischen Almaqah-Tempels in Äthiopien.

2 Projekt

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Dienststelle Hamburg, berät die für den Bereich der Küstenregionen zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämter (WSÄ) der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) u.a. hinsichtlich Funktion und Stabilität von Strombauwerken an den Seeschiffsstraßen (SeeSchStr) der Nord- und Ostsee sowie am Nord-Ostseekanal. Zu Strombauwerken gehören u.a. Buhnen, welche im Wasserbau in unterschiedlichsten Varianten für diverse Zwecke wie z.B. zum Uferschutz, zur Flussregulierung und zur Kanalisierung eingesetzt werden.

Seit etwa 2001 treten vermehrt Schäden an Buhnen und Deckwerken auf. Bis etwa 2009 zeigten sich bspw. im Untereibeabschnitt Juellssand Buhnendurchbrüche auf einer Breite von ca. 20 m (siehe Abbildung 1, links). Als Ursache der aufgetretenen Schäden wurden die ansteigenden schiffserzeugten langperiodischen Wellenbelastungen aufgrund der zunehmenden Schiffsgrößen detektiert.



Abb. 1: Durchbruch der Buhnenwurzeln bei Juellssand infolge schiffserzeugter langperiodischer Wellenbelastung (links), Schadensbild trotz optimierter Buhnenform und Bauweise (rechts).

Um den zukünftigen Unterhaltungsaufwand für Buhnenbauwerke an SeeSchStr nachhaltig zu reduzieren, hat die BAW eine Pilotstudie eines Stabilitätstests von optimierten Buhnenvarianten im Rahmen eines Forschungsprojektes initiiert. Ein elementarer Teil der Studie ist die Bauwerksüberwachung der trotz Optimierung auftretenden Bauwerksschäden infolge schiffserzeugter Ereignisse.

Für diese Aufgabenstellung bietet sich ein automatisiertes, flächenhaftes Monitoring mittels terrestrischem Laserscanning an, welches in einer Forschungskooperation zwischen BAW und HafenCity Universität Hamburg derzeit über einen Zeitraum von zwei Jahren realisiert wird. Im Untersuchungsgebiet werden hierbei jeweils zwei Buhnen ertüchtigt, wobei Parameter wie Bauform, Bauweise und Steinklasse zwischen den Bauwerken und Untersuchungszyklen variieren.

Um eine Zuordnung mit den schiffserzeugten Ergebnissen, welche im Rahmen des Projektes auch erfasst werden, zu ermöglichen, erfolgt mit minimalem Epochenabstand (bei jedem Niedrigwasser) eine Erfassung bzw. ein Scanning der Buhne mit maximaler Auflösung. Der

Anspruch an die Genauigkeit liegt im Rahmen der Objektrauigkeit und Definitionsgenauigkeit der verwendeten Wasserbausteine bei einigen Zentimetern. Durch die simultane Erfassung durch zwei identische Messaufbauten ist auch ein direkter Vergleich zweier Bühnenkonfigurationen unter annähernd identischer Belastung möglich.

3 Messsystem

Eine der ersten Aufgaben bei der Konzeption einer Monitoringaufgabe ist nach Festlegung der geforderten Genauigkeit sowie der erwarteten Deformationsgeschwindigkeit die Auswahl der Standpunkte der einzusetzenden Sensorik. Für ein langgestrecktes Objekt mit unterschiedlichen Neigungen wie bei einer Bühne bieten sich folgende Konfigurationen für die Monitoring-Sensorik an: Die Messung von mehreren Standpunkten sowie die Erfassung von einer erhöhten Position. Für die Erfassung von mehreren Standpunkten ist ein Umbau eines Gerätes oder der Einsatz mehrerer Geräte notwendig. Aus wirtschaftlichen und logistischen Gründen stehen beide Möglichkeiten nicht zu Verfügung. Da sowohl die stromzugewandte als auch stromabgewandte Seite der Bühne untersucht werden soll (vgl. Abbildung 1, rechts), sind mit einem Scannerstandpunkt nur Messanordnungen entlang der Achse des Objektes möglich. Betrachtet man weiterhin die sicherheitsrelevanten Aspekte, die eine Einbringung von Objekten in die SeeSchStr einschränken sowie mögliche Auswirkungen auf das Messobjekt selber, müssen weitere Scannerpositionen wie z.B. auf der Bühne oder vor der Bühnenspitze ausgeschlossen werden. Die einzig mögliche und zugleich sinnvollste Position für das Monitoringsystem ist somit auf einem erhöhten Standpunkt am Bühnenfuß, außerhalb des Deckwerks zu wählen. Aufgrund dieser Vorüberlegung wurde durch das WSA HH (ABz. Wedel) ein Messpfeiler direkt hinter dem Sommerdeich installiert (siehe Abbildung 2, links). Der Messpfeiler ist ca. 12 m hoch, mehrere Meter tief gegründet, mit Stahlseilen in unterschiedlichen Richtungen abgespannt und gegen unbefugten Zutritt gesichert.

Aus der so festlegten Aufnahmegeometrie lassen sich durch Simulation und Testmessungen die Anforderungen an die Messsensorik definieren. Die zu messenden Entfernungen betragen dabei zwischen 15 m und 120 m mit einem Auftreffwinkel von ca. 35° bis 5° . Für die finale Auswahl des Instrumentariums sind allerdings nicht nur technische, sondern auch wirtschaftliche (Preis), logistische (zur Verfügung stehende Software) und sicherheitstechnische Aspekte entscheidend. Beispielsweise ist es am Messort Juelssand aus Sicherheitsgründen nur erlaubt, Laserscanner mit der Laserklasse I und nicht sichtbarem Laser einzusetzen. Aufgrund dieser Kriterien sowie ausführlicher Tests und Voruntersuchungen (KERSTEN & MECHELKE 2013) wurde sich für die Beschaffung und den Einsatz eines IMAGER 5010 von Zoller + Fröhlich entschieden. Die gewünschte, möglichst hohe Auflösung entspricht bei dem System dem horizontalen Winkelinkrement von $0,0002^\circ$, was einem theoretischen Punktabstand von 1 cm selbst an der Bühnenspitze ermöglicht. Der Punktabstand fällt aufgrund des Auftreffwinkels und der Objektrauigkeit allerdings deutlich geringer aus. Die gesamte Bühne wird im Idealfall so mit ca. 65 Mio. Punkten abgebildet.

Im Rahmen weiterer Voruntersuchungen wurde auch ein Schwingungsverhalten des Messpfeilers trotz der Abspannung festgestellt, was Lageänderungen von mehreren Millimetern bei mittleren Windstärken zur Folge hat. Durch die integrierte dynamische Neigungskompensation im IMAGER 5010 lässt sich jedoch die durch die Bewegung vorhandene Neigungskomponente kompensieren.

Die Registrierung der durchgeführten Objektskans in das Referenzkoordinatensystem erfolgt über drei in ca. 120 m Entfernung im Hinterland verteilte Zieltafeln (siehe Abbildung 2, rechts). Diese Tafeln sind mit einem Betonfundament gegründet und durch Verstrebung gegen Winddruck gesichert. Das darauf aufgebrachte Zielzeichen ist ein um 45° gedrehtes schwarz-weißes Schachbrettmuster. Passend zur Entfernung wurde die Dimension der Zielzeichen mit 80×80 cm bemessen, um eine ausreichende Punktdichte auf dem Zielzeichen zur Bestimmung der Scannerposition auch bei widrigen Witterungsbedingungen zu garantieren.



Abb. 2: Komponenten des Messsystems (v.l.n.r.) Messpfeiler, Schutzgehäuse (geschlossen), Plattform des Messpfeilers mit Solarzellen, Windgenerator und Funkantenne, Referenzzielzeichen.

Eine weitere wichtige Komponente für ein Monitoringsystem im Außeneinsatz ist das Schutzgehäuse (siehe Abbildung 2, Mitte links). Im hier vorgestellten Projekt wird das System über einen Zeitraum von mehreren Monaten betrieben (seit acht Monaten, Stand Februar 2016). Dabei ist das System sowohl unterschiedlichen Wetterbedingungen als auch dem üblichen Tages- und jahreszeitlichen Gang der Temperaturen unterworfen. Das Schutzgehäuse besteht aus zwei konzentrischen Zylindern. Der innere Zylinder ist mit vier Öffnungen versehen, die in Richtung der zu scannenden Zielzeichen bzw. der Bühne angeordnet sind, während der äußere Zylinder nur eine Öffnung hat, die in ihrer Dimension mit dem größten Zielfenster (in Richtung Bühne) übereinstimmt. Zum Messzeitpunkt wird der äußere Zylinder soweit verdreht, dass ein Scanfenster in Richtung des jeweiligen Messobjektes geöffnet wird und die Datenerfassung durchgeführt werden kann. Zum Abschluss der Messepoche wird der äußere Zylinder soweit verdreht, dass alle Öffnungen verschlossen sind. Er ist dann mit einem Verschlussbolzen gegen das Öffnen durch äußere Einflüsse wie Wind gesichert. Befindet sich ein Messsystem an einem abgelegenen Ort oder ist durch äußere Vorgaben nicht direkt an das Internet- und Stromnetz angeschlossen, so muss es per Funk gesteuert und über eine autarke Stromversorgung betrieben werden. Für die Stromversorgung kommt neben einem Solarpanel und einem Windgenerator auch eine Brennstoffzelle zum Einsatz (siehe Abbildung 2, Mitte rechts). Dabei verstehen sich die Wind- und Solarenergie als komplementär, da im Einsatzgebiet meist nur eine Ressource dominierend ist. Für die Überbrückung von Engpässen der regenerativen Energiequellen kommt eine Brennstoffzelle zum Einsatz, als Puffer ist ein Lithium-Ionen-Akkumulator (LiFePO_4 / 135 Ah) angeschlossen, die von den drei stromgebenden Systemen geladen wird. Das hier vorgestellte System erfordert ein regelmäßiges Nachfüllen des Brennstoffs im Rahmen eines zwei- bis vierwöchigen Wartungszyklus.

Um die Stromversorgung zu entlasten, ist die Steuerungs- und Auswertelogik an einen entfernten Ort ausgelagert. In diesem Fall bot sich durch Amtshilfe die Nutzung eines Containers am Strommast Elbekreuzung 2 an. Die Funkverbindung wird über gerichtetes WLAN hergestellt, welches in ca. 35 m Höhe am Strommast installiert ist und damit oberhalb der örtlichen Baumkronen die notwendigen Daten übertragen kann.

4 Betrieb

Der Betrieb des Messsystems erfolgt anhand der voraus kalkulierten Zeiten des Niedrigwassers durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Form einer normierten Tabelle. Betrachtet man die Pegelstände naheliegender Überwachungsstationen (PEGEL ONLINE, 2016), so ist erkennbar, dass ein Zeitfenster von 30 Minuten vor und 10 Minuten nach dem Niedrigwasser den optimalen, weil niedrigsten, Wasserstand aufzeigt. In dieser Zeitspanne erfolgt der Scan der relevanten Objekt Oberfläche. Die Referenzziele sind unabhängig des Wasserstandes sichtbar und werden daher erst im Anschluss gescannt. Für die Erfassung einer gesamten Messepoche benötigt das System in der aktuellen Konfiguration etwas weniger als eine Stunde, dabei werden pro Buhne ca. 500 MByte Daten erzeugt.

Das System arbeitet automatisch, derzeit allerdings noch nicht ohne manuelle Überwachung und Kontrolle. Dafür ist der Steuerungs- und Auswerterechner mit dem Netz der BAW verbunden, sodass Fernwartung und Überwachung möglich ist. Durch diese Konfiguration konnten die gerade im Anfangsstadium auftretenden Betriebsausfälle durch unvorhergesehene Ereignisse schnell behoben werden. Systemausfälle konnten so auf kurze Zeiträume begrenzt werden, da im normalen Arbeitsalltag auf Probleme unmittelbar reagiert werden konnte.

Als eine generelle Schwachstelle von Monitoringsystemen ist die Stromversorgung zu identifizieren. War es nach einigen Wochen der Testphase möglich, die meisten softwareseitigen Probleme in der Systemsteuerung zu identifizieren und zu beheben, sind durch die Stromversorgung verursachte Probleme oftmals schwerer zu lokalisieren und auch mit weiterreichenden Folgen verbunden. Im Rahmen der Strombedarfsplanung des Systems wurden die Komponenten der Energieerzeugung auf den möglichen Stromverbrauch der anderen Komponenten abgestimmt. Im Betrieb zeigte sich jedoch, dass kaum Spielraum für außergewöhnliche Ereignisse vorhanden war. Kommt es etwa zu Problemen im Rahmen der Funkübertragung, so arbeitet das System oberhalb seiner Energieversorgungskapazitäten, da der Scanner als größte Verbraucherquelle weiterhin im System eingeschaltet bleibt. Während andere Ursachen oftmals aus der Ferne korrigiert werden können, ziehen Probleme mit der Stromversorgung meistens einen Außendienstesatz nach sich. Hiermit zeigt sich der Nachteil der Verlagerung des Steuerungsrechners an einen entfernten Ort, weil durch die WLAN-Verbindung eine weitere Fehlerquelle entsteht.

Darüber hinaus muss auch festgehalten werden, dass die Temperatur bzw. das Wetter entscheidenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Messsystems nehmen kann. Temperaturen unterhalb von 0°C erfordern bspw. ein gesondertes Vorgehen bei der Durchführung der Scans, wenn die geforderte Scanauflösung am Objekt erzielt werden soll. Grund hierfür sind die eingesetzten Motoren, die ihre konstante Laufgeschwindigkeit bei tiefen Temperaturen nur gewährleisten können, wenn ein Aufwärmprogramm die Sensorik betriebsbereit macht.

Weitere Erfahrungen bei tiefen Temperaturen werden zeigen, ob die getroffenen Anpassungen im Prozessablauf die Messunterbrechungen ausschließen können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist beim Betrieb der Umgang mit Systemausfällen und der Detektion von Fehlerquellen. Zu diesem Zweck wurden unterschiedliche Bereiche der Software als getrennte Komponenten entwickelt, die unabhängig voneinander Daten erfassen und so Rückschlüsse auf Art und Ursache von Ausfällen erlauben. Ein erster Schritt in der Automatisierung dieses Abschnitts liegt in der bereits beschriebenen Fernwartung sowie einer E-Mail-Alarmierung für kritische Systemzustände. Diese Alarmierung soll in Zukunft noch zu einer generellen Kommunikation des Systems ausgebaut werden, die den aktuellen Zustand des Systems nach jeder Epoche regelmäßig meldet und so den manuellen Überwachungsaufwand noch weiter reduziert.

6 Auswertung

Die Auswertung erfolgt durch 3D-Vergleich (siehe Abbildung 3, rechts) der jeweils gemessenen Epoche mit einer Referenzeпоche. Die Messung der Referenzeпоche erfolgte nach Abschluss der Ertüchtigung der beiden Bauwerke im Juli 2015 mit einem terrestrischen Laserscanner IMAGER 5010 bzw. einem Faro Focus3D von ca. 15 Standpunkten auf der Bühne selbst. Durch im Objektraum gut verteilte Zielzeichen erfolgte die Registrierung der Scans mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern mit Maximalabweichungen kleiner 1 cm (siehe Abbildung 3, links).

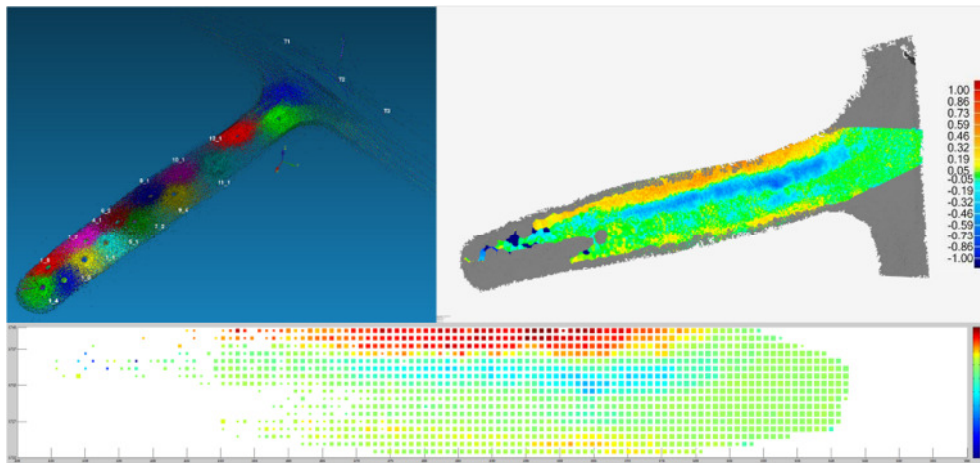


Abb. 3: Nullmessung der Bühne 31 im Juli 2015 (oben links), Vorauswertung der Deformationen am 27.09.15 (oben rechts), Rasterzellendarstellung der erzielten Ergebnisse (unten).

Mithilfe der drei gescannten Referenzziele wird die Orientierung des Messsystems bestimmt und der Scan der jeweiligen Epoche in ein lokales Objektkoordinatensystem registriert. Anschließend werden die Daten über Plausibilitätskontrollen von groben Fehlern befreit und die Punktzahl auf die gewünschte Auswertedichte reduziert. Der anschließende Vergleich mit

der Referenzeпоche erfolgt ausschließlich in der Höhenkomponente, sodass eine Auf- bzw. Abtrag von Material (Volumen) an einem definierten Ort bestimmt werden kann. Für die anschließende Bemessung der Belastung erfolgt eine weitere Reduktion der Daten in ein definiertes Gitter mit einer Kantenlänge von 1×1 m (siehe Abbildung 3, unten).

7 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein neues Monitoringsystem vorgestellt, welches die Anforderungen zur quantitativen Dokumentation von Wasserbauwerken durch terrestrisches Laserscanning erfüllt. Die eingesetzte Methodik erlaubt dabei eine Bewertung der Deformationen im Zyklus des Niedrigwassers zur anschließenden Korrelation mit Schiffspassagen. Aufgrund der ersten Ergebnisse lässt sich die Stabilität der getesteten Bauform und Bauweise quantifizieren. Deformationen im Dezimeterbereich sind nachweisbar und zeigen eine Erosion des Bauwerks (siehe Abbildung 3, oben rechts). Der Abtrag ist hauptsächlich parallel zu der Kronenlinie einer Seite der Buhne (Strom abwärts) erkennbar, wobei das bewegte Material in Teilen noch im bei Niedrigwasser sichtbar werdenden Bereich der Buhne verbleibt.

Aufgrund vorhandener Ausfallzeiten liegen Datenlücken der Messepoсhen aus dem Jahr 2015 vor. Für diese epochenweisen oder mehrtägigen Ausfälle werden keine Werte interpoliert, da von einem ruckartigen Deformationsverlauf aufgrund der schiffsinduzierten Ereignisse ausgegangen wird.

Im nächsten Entwicklungsschritt des Projektes soll eine neue, größere Steinklasse in den Bühnen erprobt werden. Es ist davon auszugehen, dass sich der Beginn der Deformationen dadurch zeitlich nach hinten verschiebt sowie ihr Betrag verringert. Die genaue geometrische Verteilung der Deformationen soll dann eine Optimierung hinsichtlich der Längs- und Querneigungen der Bühnenböschungen ermöglichen.

Die automatische Erfassung von flächenhaften Deformationen ist nicht nur im Wasserbau interessant. Auch für Ingenieurbauwerke oder geotechnische Prozesse ist eine kontinuierliche und flächenhafte Erfassung sinnvoll. Gerade durch die hohe Punktdichte des Laserscannings ist es möglich, das Genauigkeitspotenzial etwa durch die Ableitung von Mittelwerten und Regelgeometrien zu steigern. Im dem hier vorgestellten System sind weitere Automationsstufen sowie geringe Epochenabstände realisierbar. Die Software ist in ihrer Struktur und Funktion erweiterbar, sodass eine Übertragung auf andere Überwachungsaufgaben denkbar und sinnvoll ist. Die Weiterentwicklung der momentan eingesetzten Auswertalgorithmen zur Optimierung des Systems ist für die nächsten Monate vorgesehen. Dadurch bietet dieses neue Monitoringsystem auch großes Potential für weitere interessante Aufgaben.

Literatur

- Eling D. (2009): *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission. München, Reihe C, Heft Nr. 641.
- Holst, Ch. & H. Kuhlmann (2011): *Bestimmung der elevationsabhängigen Deformation des Hauptreflektors des 100m-Radioteleskops Effelsberg mit Hilfe von Laserscannermessungen*. Schriftenreihe des DVW, Band 66 „Terrestrisches Laserscanning - TLS 2011 mit TLS-Challenge“, Wißner Verlag, Augsburg, S. 161-180.

- Kersten, T. & K. Mechelke (2013): *Einsatz von terrestrischen 3D-Laserscannern beim Monitoring von Strombauwerken*. Pilotstudie für die Bundesanstalt für Wasserbau, interner Bericht, 20 S.
- Korth, W. & P. Lösch. (2015): *Deformationsmessungen an Uferbefestigungen mit Laserscanning*. In: 18. Internationale Geodätische Woche Obergurgl. Hanke, K. & Weinold, T. (Hrsg.), Herbert Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH, Berlin/Offenbach.
- Kutterer, H. & Ch. Hesse (2006): *High Speed Laser Scanning for Near Real-Time Monitoring of Structural Deformations*. Dynamic Planet IAG Symposia, P. & C. Rizos (Hrsg.), Vol. 130, Springer, S. 776-781.
- Lim, M., D. N. Petley, N. J. Rosser, R. J. Allison, A. J. Long & D. Pybus (2005): *Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cliff evolution*. The Photogrammetric Record, 20 (110), S. 109-129.
- Mechelke, K., F. Keller & H. Sternberg (2012): *Ein Monitoring-System mit TLS Sensor*. Terrestrisches Laserscanning 2012 (TLS 2012), Schriftenreihe des DVW, Band 69, Beiträge zum 121. DVW-Seminar am 13. und 14. Dezember 2012 in Fulda, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 105-126.
- Ohlmann-Lauber, J. (2010): *TLS für Felssturzbeobachtungen*. Terrestrisches Laserscanning TLS 2010 – mit TLS-Challenge, Schriftenreihe des DVW, Band 64, Beiträge zum 101. DVW-Seminar am 6. und 7. Dezember 2010 in Fulda, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 129-138.
- Pegel Online (2016): *Gewässerkundliches Informationssystem der Wasser und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)* <https://www.pegelonline.wsv.de/webservices/files/-Wasserstand+Rohdaten/ELBE/HETLINGEN> (16.02.2016).
- Wiatr, T., Fernandez-Steeger, T. & K. Reicherter (2009): *Untersuchung von Massenbewegungen und Störungsflächen mit terrestrischem Laserscanning*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009, Th. Luhmann & Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 118-126.
- Zogg, H.-M. & H. Ingensand (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.

Tschirschwitz, Felix
HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning
Felix.Tschirschwitz@hcu-hamburg.de

Mechelke, Klaus
HafenCity Universität Hamburg, Geodätisches Labor
Klaus.Mechelke@hcu-hamburg.de

Jansch, Hanne
Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg
Hanne.Jansch@baw.de

Kersten, Thomas
HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning
Thomas.Kersten@hcu-hamburg.de