

Bauwerksmonitoring mit terrestrischem Laserscanning - eine Machbarkeitsstudie

Klaus MECHELKE, Maren LINDSTAEDT, Harald STERNBERG, Thomas KERSTEN

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Anwendung eines terrestrischen Laserscanners als Sensor in einem geodätischen Monitoringsystem. Durch die Erfassung eines zu überwachenden Objektes in Form einer hochaufgelösten Punktwolke ergibt sich die Möglichkeit, Deformationen flächenhaft zu bestimmen. Für die Registrierung der Punktwolken auf die Null-Epoche bieten sich ICP-basierte Verfahren neben der klassischen Registrierung mit Zielzeichen an. Das Verfahren wurde an einer 2800 Jahre alten Wand des Almaqah-Tempels in Yeha (Äthiopien) getestet. Vergleichsdaten wurden mit einem herkömmlichen geodätischen Monitoringsystem auf Tachymeterbasis erhoben. Dabei hat sich gezeigt, dass die Genauigkeit der aus Laserscans abgeleiteten Deformationen im Bereich 1-2 mm liegt. Möglichkeiten zur Automatisierung bei der Datenerfassung und -auswertung im Rahmen eines Monitoringsystems werden aufgezeigt.

1 Einführung

Terrestrische Laserscanner werden als Sensor in geodätischen Monitoringsystemen 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 bei der 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. Weitere Autoren (LINDENBERGH & PFEIFER 2005, TSAKIRI et al. 2006, MONSERRAT & CROSETTO 2008) setzen terrestrisches Laserscanning für die Analyse von Deformationen ein.

Die hierbei zugrunde liegenden Auswertansätze benutzen oft einen Blockansatz, in dem das zu überwachende Objekt durch ein regelmäßiges Raster aufgeteilt wird und ein das Objekt repräsentierender Punkt durch Mittelbildung aus einem in dem Rasterblock liegendem Teil der Punktwolke gewonnen wird (ELING 2009). Einen anderen Ansatz stellt die profilhafte Erfassung eines Objektes dar, bei dem das Objekt kontinuierlich mit sehr hohen Abstraten und somit hoher zeitlicher Auflösung gescannt werden kann. Vorteil dieser Methoden ist, dass die Einzelpunktgenauigkeit des Laserscanners durch Einsatz geeigneter Mittelbildungs- und Filtermethoden wesentlich gesteigert werden kann.

2 Deformationsanalyse durch 3D-Flächenvergleich

Eine weitere Möglichkeit der Deformationsanalyse besteht in der direkten Verwendung der Punktwolke oder einer daraus modellierten Fläche, z.B. in Form einer Dreiecksvermaschung. Die einzelnen Messepochen werden dabei einem 3D-Vergleich mit der Null-Epoche (Referenzmodell) unterzogen. Hierbei werden lediglich die Differenzen als kürzester Abstand zwischen den Punkten bzw. Flächen der Folgeepoche zum nächstgelegenen Punkt bzw. zur nächstgelegenen Fläche des Referenzmodells berechnet (Abb. 1). Die Einzelpunktgenauigkeit des Laserscanners wird nur insoweit verbessert, als dass die Punktwolken einer Filterung unterzogen werden. Das Referenzmodell oder auch das Modell der Folgeepoche wird dann mit dem sich aus der Größe der Differenz ergebenden Farbwert eingefärbt. Das Gesamtbild ergibt dann das flächenhafte Abbild der Deformation. Es erfolgt also primär keine numerische Ausgabe von Deformationen an diskreten Stellen (Messstellen), sondern zur Beurteilung der Deformation wird die gesamte Objektfläche herangezogen. Die Farbcodierung wird dabei üblicherweise in Deformationsklassen eingeteilt, um die Interpretation zu erleichtern.

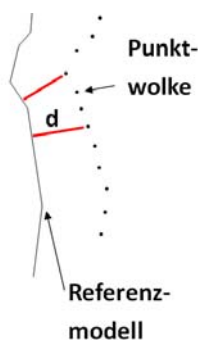


Abb. 1:
Ermittlung der 3D-Abweichung

3 Anwendungsbeispiel

3.1 Testobjekt

Der Einsatz eines Laserscanners als Sensor eines Monitoringsystems und die Ermittlung von Deformationen mit Hilfe eines 3D-Flächenvergleichs wurden an einer Mauer des antiken Tempels von Yeha (Abb. 2 links) in Nord-Äthiopien praktisch erprobt. Das ca. 2800 Jahre alte Bauwerk ist Teil des Forschungsprojektes ‚Ethiopian-German Archaeological Mission to Hawelti, Yeha and surroundings‘ des Deutschen Archäologischen Instituts. Im Rahmen des Projektes sind notwendige Restaurierungsmaßnahmen sind für dieses kulturell bedeutende Bauwerk in Planung.



Abb. 2: Der Große Tempel von Yeha in Äthiopien (links) und Aufnahmekonfiguration (rechts)

Da die bis zu 14 m hohen Außenwände des ca. 15 m x 20 m großen Tempels im bis zu 7 m hohen oberen Mauerbereich bei einer Mauerstärke von nur 30 cm nur noch einschalig anstehen und zudem ohne Fugenmörtel Stein auf Stein gesetzt sind, war die Ermittlung von Bauwerksdeformationen für statische Berechnungen und zur Beurteilung der Standsicherheit notwendig. Überwacht wurde die nordöstliche Außenfassade des Bauwerks von einem ca. 11 m zentral vor der Fassade liegenden Scannerstandpunkt aus (Abb. 2 rechts). Auf Grund örtlicher Gegebenheiten konnte kein weiter entfernt liegender Standpunkt gewählt werden. So waren relativ flache Auftreffwinkel des Messstrahls im oberen Fassadenbereich nicht zu vermeiden. Da aber alle Scans vom gleichen stabilen Standpunkt aus durchgeführt wurden, sind die Vergleiche zur Null-Epoche hiervon unbeeinflusst. Zum Einsatz kam ein terrestrischer Laserscanner IMAGER 5006h von Zoller + Fröhlich. Die für diese Anwendung besonders wichtige Streckenmessgenauigkeit gibt der Hersteller als ‚Entfernungsruschen bei 25 m‘ mit 1-3 mm rms in Abhängigkeit von der Reflektivität der Oberfläche an. Die Scans wurden mit den Qualitätseinstellungen ‚high‘ und ‚normale Qualität‘ durchgeführt. Mit diesen Einstellungen dauerte ein Scan 3 min 22 sec zuzüglich ca. 20 Sek. Initialisierungszeit. In stündlichem Abstand wurde über eine Periode von 27 h jeweils ein Scan durchgeführt. Die Messungen wurden während der Grabungskampagne im Herbst 2011 am 31.10. und 01.11. durchgeführt.

3.2 Datenfilterung

Alle Scans wurden nach einer manuellen Grobselektion der relevanten Teile der Punktwolke einer Datenfilterung unterzogen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, ist es wichtig, dass alle Scans mit den gleichen Filtern und Filterparametern gefiltert werden. Die in Punktwolken von Laserscannern häufig auftretenden Streupunkte auf Grund von Kanteneffekten wurden mit einem Mischpixelfilter eliminiert. Einzelne Punkte, die weiter als ein vorgegebener Schwellwert von 3 cm von Punktgruppen entfernt lagen, wurden als Ausreißer deklariert und gelöscht. Weiterhin wurde das Messrauschen durch einen Glättungsfilter minimiert und abschließend eine Ausdünnung der Punktwolken auf einen minimalen Punktabstand von 2 mm vorgenommen. Die Filterung erfolgte mit den Filterwerkzeugen, die in den Programmen Z+F LaserControl und Geomagic Qualify implementiert waren. Die verbleibenden Punktwolken enthielten nach Filterung ca. 2,5 Mio. Punkte je Epoche.

3.3 Referenzierung auf die Null-Epoche

Als Null-Epoche wurde der Scan um 7 h morgens gewählt. Aus diesem Scan wurde zunächst eine modellierte Oberfläche in Form einer Dreiecksvermaschung generiert. Die Registrierung der Folgeepochen auf die Null-Epoche erfolgte über einen ICP-Algorithmus mit der Software Geomagic Qualify. Als Referenzflächen wurden hauptsächlich Teilbereiche (Patches) des unteren Mauerabschnittes des Bauwerkes gewählt. Diese Bauwerksteile können in diesem Fall als stabil und unbeeinflusst von Deformation gelten, was durch unabhängige Messungen u. a. mit Rissmonitoren nachgewiesen wurde. Weiterhin wurden auch natürliche Objekte wie Felsen und eine Felssteinmauer in der näheren Umgebung des Bauwerks als Referenzflächen herangezogen. Der ICP-Algorithmus arbeitet mit einer Teilmenge von max. 10000 Punkten, die von der Software aus den manuell selektierten Patches gewählt wurden (Abb. 3). Die Genauigkeit der Registrierung lag im Mittel bei $\pm 1,5$ mm. Die Auswahl der Patches in der Nullepoche und in den Folgeepochen erfolgte nur genähert an identischen Flächen, durch die Vielzahl der Punkte hatte dies jedoch keinen Einfluss auf die Registrierengenauigkeit.

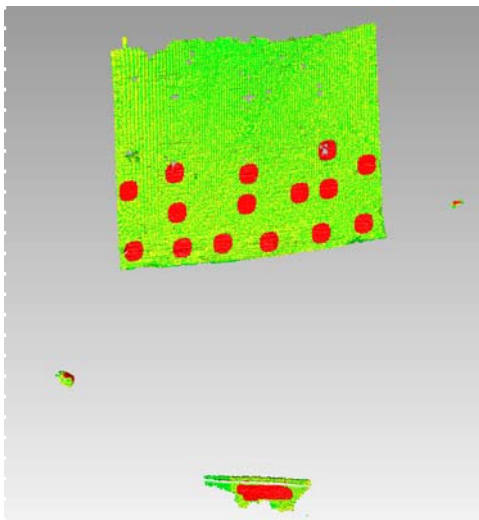


Abb. 3:
Patches (rot) für den ICP-Algorithmus

3.4 Auswertung

Zur Beurteilung der Deformationen wurde ein 3D-Punktvergleich für jede Epoche im Beobachtungszeitraum durchgeführt, in dem die kürzeste Strecke von jedem Punkt der Punktwolke zum Referenzmodell berechnet wird (Abb. 1). Die Differenzen werden dann farbcodiert auf die Referenzpunktwolke gemappt, wobei die Abstufungen der Farbcodierung frei wählbar sind. Zusätzlich wurden für jede Epoche punktuelle Vergleiche vorgenommen. Hierzu wurden alle in einem Umkreis von 4 cm um eine definierte 3D-Position liegenden Punkte gemittelt, wobei anschließend von der erhaltenen Position die kürzeste Strecke zum Referenzmodell gerechnet wurde. Die so ermittelten Differenzen an gewählten diskreten Punkten lassen sich in einer Reportdatei ablegen und stehen für weitere Auswertungen zur Verfügung.

4 Ergebnisse

Für jede Epoche ergibt sich eine aufgrund der Deformationen farbcodierte maßstäbliche Ansicht der Fassade mit den zusätzlich eingetragenen Werten des punktuellen Vergleiches. Die Ergebnisse zeigen in Abb. 4 eine periodische Deformation des oberen, einschaligen Fassadenteiles. Da die Fassade nach Osten ausgerichtet ist, setzt mit Sonnenaufgang eine Erwärmung des Mauerwerks ein, die durch Ausdehnungseffekte eine Ausbiegung in Form einer Beule verursacht. Die maximale Deformation von 6 mm ergibt sich ca. um 10 h vormittags mit einer Zeitverzögerung von 3 h zum Sonnenaufgang. Mit dem Sonnengang um das Bauwerk herum klingt die Deformation langsam ab. Nach Sonnenuntergang um 16 h 30 min und im Laufe der Nacht bildet sich die Beule fast vollständig zurück, um mit Sonnenaufgang des Folgetages einen neuen Zyklus zu beginnen.

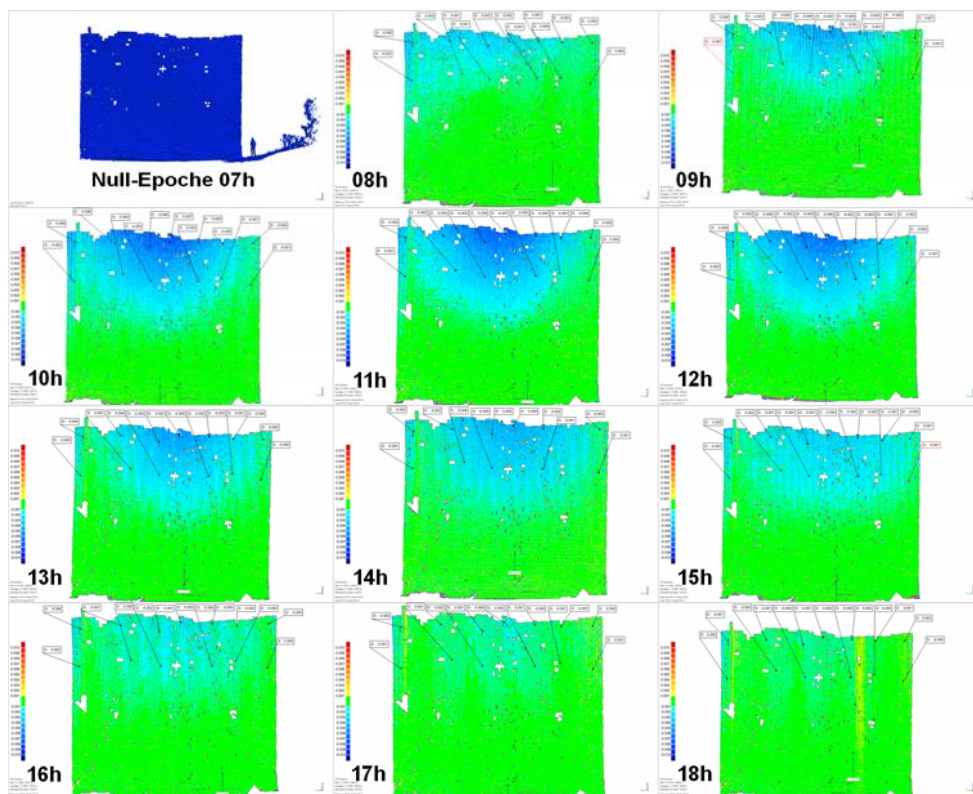


Abb. 4: Epochenvergleich (Ausschnitt) über elf Folgeepochen einer Mauer des äthiopischen Tempels in Yeha

5 Verifizierung

Zur Verifizierung der Laserscandaten wurde ein herkömmliches Monitoringsystem Leica GeoMoS (Abb. 5) mit einem Tachymeter Leica TCRP1201 als Sensor eingesetzt. Der Hersteller gibt die Streckenmessgenauigkeit für dieses Gerät mit $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$ und die

Richtungsmessgenauigkeit mit $\pm 0,3$ mgon an. Zusätzlich eingebunden war ein Meteosensor DTM der Firma Sensor Technik Sirnach AG zur Erfassung des Luftdrucks und der Temperatur. Die Messwerte wurden vom Monitoringsystem automatisch zur Korrektur der gemessenen Strecken herangezogen. Beobachtet wurden sieben Messstellen mit am Bauwerk befestigten Prismen, wobei zwei an der Innenseite der mit dem Laserscanner untersuchten Fassade und ein Prisma an dem von Verformung am stärksten betroffenen Fassadenteil befestigt war. Das System hat über einen Zeitraum von 17 Tagen in einem 20-minütigen Epochenabstand gemessen. Da der Sensor nur auf dem Bauwerk selbst positioniert werden konnte, wurde vor jeder Epoche eine freie Stationierung über vier Stützpunkte durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigen die aus den Laserscandaten abgeleiteten Deformationen (Abb. 5), wenn auch hier nur ein Punkt betrachtet werden konnte. Der in Abb. 6 dargestellte Tagesgang an der in Abb. 5 gezeigten Messstelle weist einen maximalen Betrag von 5 mm auf. Die aus den Laserscandaten ermittelten Deformationen weisen einen Maximalbetrag von 6 mm an dieser Messstelle auf.



Abb. 5: Monitoringstation Leica GeoMoS (links), Messstelle (Prisma) an oberer Mauerinnenschale (rechts)

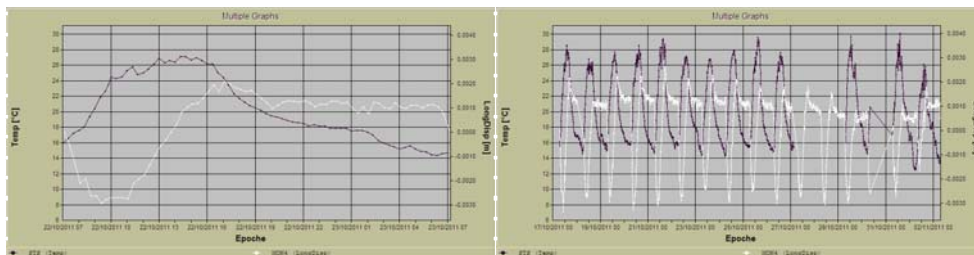


Abb. 6: Messpunkt an der oberen Mauerinnenschale (links) und Tagesgang einer 17-Tages Periode (rechts) mit der Deformation (weiß) und der Temperatur (schwarz)

Weiterhin wurden einzelne Fugen am Bauwerk mit einem Rissmonitor ‚Rissfox Mini‘ mit Datenlogger der Firma Scantronik Mugrauer beobachtet (Abb. 7). Der Sensor weist bei einem Messbereich von 10 mm eine Streckenauflösung von 0,0025 mm auf. Zusätzlich wurden auch Lufttemperatur und –feuchte aufgezeichnet. Die Ergebnisse in Abb. 8 zeigen den gleichen zyklischen Tagesgang der Deformation, der für eine einzelne Fuge im oberen

Fassadenbereich bis zu 0,04 mm beträgt. Auch hier ist eine Abhängigkeit von der Lufttemperatur festzustellen, wobei über dem Tagesgang noch eine langperiodische Schwingung erkennbar ist, die die jahreszeitlichen Schwankungen der Lufttemperatur widerspiegelt.

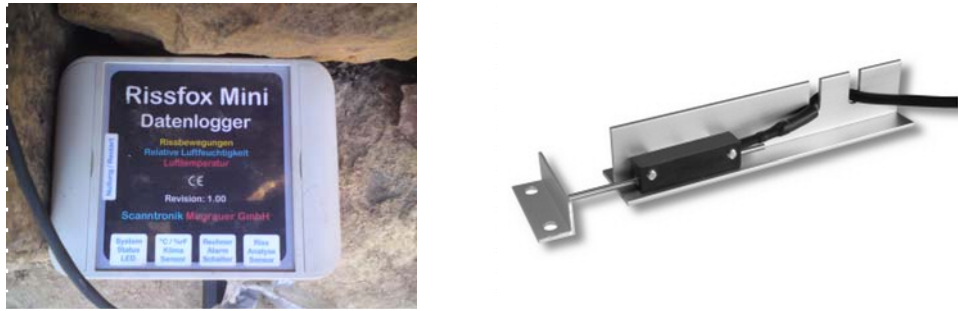


Abb. 7: Datenlogger (links) und Rissensor (rechts)

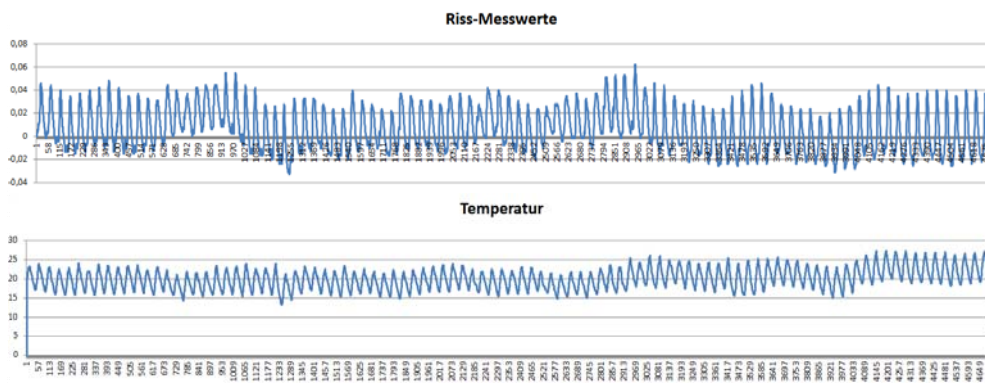


Abb. 8: 3-Monats Messreihe des Rissensors

6 Automatisierung

Für den Einsatz eines terrestrischen Laserscanners in einem Monitoringsystem sollten sowohl Mess- als auch Auswerteprozess automatisierbar sein. Die Automatisierung des Messprozesses lässt sich relativ einfach realisieren, wenn das Scansystem über ein WLAN-Modul und die Möglichkeit der Fernsteuerung z.B. über ein WEB-Interface bietet. Auch die Übertragung der relativ großen Datenmengen (ca. 190 MB bei dem verwendeten Scansystem) zu einer Auswertesoftware ist über WLAN möglich. Da aber die Übertragung einige Minuten in Anspruch nimmt, ist bei kürzeren Epochenabständen mit Problemen zu rechnen, so dass hier eventuell auf schnellere Kabelverbindungen zurückgegriffen werden muss.

Die Automatisierung der Auswertung lässt sich mit gängigen Softwarepaketen wie Geomatic Qualify durch eine einfache Makro- und Batchjob-Programmierung realisieren. Eine Alarmierung bei Erreichen kritischer Deformationswerte ist hingegen momentan nur mit zusätzlichen Programmen möglich, wobei nach Bedarf externe Module anzusteuern sind. So wäre z. B. zur Alarmierung das Versenden einer SMS über ein GSM-Modul denkbar.

7 Bewertung und Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen das Potential von terrestrischen Laserscannern als Sensor in einem geodätischen Monitoringsystem. Die Darstellung von Deformationen in Form von flächenhaften 3D-Vergleichen lassen Auflösungen im Millimeter-Bereich zu. Der Vorteil der Methode liegt in der Darstellung von Deformationen über die gesamte Fläche eines zu beobachtenden Objekts. Insbesondere bei komplexen Deformationen mit Mischformen von Biegungen, Dehnungen und Torsionen spielt die flächenhafte Erfassung ihre Stärken aus. Mit einem konventionellen Monitoringsystem auf Basis eines Tachymeters wäre dies nur mit erheblich größerem Signalisierungsaufwand möglich. Zudem steigt mit der Anzahl der zu beobachtenden Punkte auch der Messaufwand proportional an und somit auch die damit verbundene Zeitspanne für die Messung einer Epoche.

Noch zu untersuchen ist der Einfluss wechselnder Reflektionseigenschaften des Objektes auf die Messgenauigkeit. Dies ist insbesondere zu beachten, wenn über längere Zeiträume beobachtet werden soll und das Objekt Witterungseinflüssen (insbesondere Regen, Schnee) ausgesetzt ist.

Literatur

- Eling D. (2009): *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission. München, Reihe C, Heft Nr. 641.
- 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.
- Lindenbergh, R. & N. Pfeifer (2005): *A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock*. Optical 3-D Measurement Techniques VII, A. Grün & H. Kahmen (Hrsg.), Wien, Volume 2, S. 61-70.
- Monserrat, O. & M. Crosetto (2008): *Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least square 3D surface matching*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 37(B5), S. 591-595.
- Tsakiri, M., Lichti, D. & N. Pfeifer (2006): *Terrestrial Laser Scanning for Deformation Monitoring*. 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden.
- 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.

Adressen:

Thomas Kersten

HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning
Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg, email thomas.kersten@hcu-hamburg.de

Maren Lindstaedt

HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning
Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg, email maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de

Klaus Mechelke

HafenCity Universität Hamburg, Geodätisches Labor
Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg, email klaus.mechelke@hcu-hamburg.de

Harald Sternberg

HafenCity Universität Hamburg, Geodätisches Labor
Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg, email harald.sternberg@hcu-hamburg.de